

**Betriebsweise, Emissionen und Kraftstoffverbrauch von Motorrädern**

**- Grundlagen für realitätsnahe Meß- und Prüfmethoden -**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

**Dipl.-Wirtsch.-Ing. Frank Schröder**

aus Biedenkopf

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. B. Breuer
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. G. Hohenberg
Tag der Einreichung:	23. Mai 2000
Tag der mündlichen Prüfung:	28. Juni 2000

Darmstadt 2000  
D 17



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand aus meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Breuer, dem Leiter des Fachgebiets, für die Schaffung der Möglichkeit, mich mit dieser interessanten Thematik beschäftigen zu können sowie für die wissenschaftliche Betreuung und Unterstützung in der Durchführung der Arbeiten. Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Hohenberg, Leiter des Fachgebiets Verbrennungskraftmaschinen der TU Darmstadt, danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats zu dieser Arbeit.

Allen Kollegen und Mitarbeitern des Fachgebiets Fahrzeugtechnik gebührt mein besonderer Dank für die inhaltliche Unterstützung sowie für die menschlich äußerst angenehme Arbeitsatmosphäre, die sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Ohne die äußerst motivierte und motivierende Mitarbeit der Studentinnen und Studenten in Form von Diplom- und Studienarbeiten sowie als Hilfskräfte wären die nun beendeten Untersuchungen nicht durchführbar gewesen. Allen Beteiligten gilt hierfür mein herzlichster Dank.

Für die zuvorkommende Überlassung der Versuchsfahrzeuge danke ich der BMW AG, München, der Honda R&D Europe GmbH, Offenbach sowie der Suzuki Deutschland GmbH, Heppenheim. Die dargestellten Abgasmessungen wurden freundlicherweise durchgeführt vom TÜH Automotive Test Center, Friedrichsdorf, wofür den Verantwortlichen mein Dank gilt.

Den Experten führender Institutionen, u.a. von Umweltbundesamt, Berlin, TÜV Automotive, Herzogenrath und TNO, Delft, danke ich für fruchtbare Diskussionen und wertvolle Anregungen, die mit zu den vorliegenden Ergebnissen beigetragen haben.

Darmstadt, im Mai 2000

Frank Schröder



## Inhalt

Zusammenfassung .....	IX
1 Einleitung - Motorisierte Zweiräder im Verkehrsgeschehen .....	1
1.1 Historie, aktuelle Situation und Ausblick .....	1
1.2 Motivationen zur Nutzung von Motorrädern .....	4
1.3 Technische Daten und Fahrleistungspotentiale von Motorrad und Pkw .....	6
1.4 Umweltverträglichkeit von Krafträdern, Maßnahmen und Potentiale .....	9
1.4.1 Abgasemissionen – Stand der Technik.....	10
1.4.2 Lärmemissionen – Stand der Technik.....	17
1.4.3 Kraftstoffverbrauch.....	20
1.4.4 Ressourcenverbrauch und weitere Aspekte.....	22
1.5 Fazit aus Kapitel 1 .....	23
2 Ziele und Abgrenzung der vorliegenden Arbeit .....	24
3 Aktuelle Meß- und Prüfbedingungen .....	25
3.1 Abgasvorschriften .....	25
3.1.1 Abgasmessungen in der Europäische Union .....	26
3.1.2 Abgasmessungen in den USA .....	28
3.1.3 Abgasmessungen in Japan und in weiteren Ländern.....	28
3.1.4 Realitätsnähe und Vergleich der Abgasprüfverfahren.....	29
3.2 Messung des Kraftstoffverbrauchs .....	30
3.3 Geräuschvorschriften .....	30
3.3.1 Ablauf der Geräuschemessungen.....	30
3.3.2 Kritik an den Geräuschmeßverfahren .....	33
3.3.3 Bestehende Verbesserungsvorschläge für Geräuschemessungen .....	34
3.4 Auswirkungen der aktuellen Vorschriften auf die Fahrzeuggestaltung .....	35
3.5 Abhängigkeiten zwischen Emissionen und Verbrauch .....	38
3.6 Fazit aus Kapitel 3 .....	39
4 Typischer Betrieb von Motorrädern .....	41
4.1 Versuchskonzept und –durchführung .....	41
4.1.1 Ermittlung aktueller Daten zum Einsatz von Motorrädern .....	41
4.1.2 Fahrerkollektiv, Fahrerklassifizierung .....	46
4.1.3 Fahrstrecken und Navigation im öffentlichen Verkehr.....	47
4.1.4 Versuchsfahrzeuge .....	51
4.1.5 Wesentliche externe Einflußparameter .....	53
4.2 Betriebsweise im realen Verkehr .....	55
4.2.1 Vergleich von Fahrleistungen und Reisezeiten .....	55
4.2.2 Kraftstoffverbrauch und Gesamtwirkungsgrade .....	57
4.2.3 Einfluß der Fahrerkollektive und der Versuchsstrecken .....	65
4.2.4 Identifikation von Parametern mit Einfluß auf die Betriebsweise.....	67
4.2.5 Typische Betriebspunkte und Antriebsleistungen.....	74
4.2.6 Schaltpunkte und Schaltstrategien.....	78
4.2.7 Zusammenfassende Quantifizierung typischer Betriebsbedingungen .....	80

---

4.3	Abhängigkeit des Fahrgeräuschs vom Betriebszustand .....	82
4.4	Geräuschemissionen im realen Verkehr .....	83
4.5	Fazit aus Kapitel 4 .....	88
5	Empfehlungen für realitätsnahe Meß- und Prüfbedingungen .....	90
5.1	Abgas- und Verbrauchsmessung .....	90
5.2	Fahrgeräuschkmessung .....	95
5.3	Fazit aus Kapitel 5 .....	101
6	Ausblick: Verringerung der Umweltbelastung durch motorisierte Zweiräder .....	102
6.1	Technische Maßnahmen am Fahrzeugtyp „Leistungsstarkes Motorrad“ .....	102
6.2	Neuartiger Fahrzeugtyp Gebrauchsmotorrad .....	104
6.3	Definition eines umweltverträglichen Motorrads .....	105
Anhang	.....	107
	Technische Daten der Versuchsfahrzeuge .....	107
	Fragebogen und Antworten zum Fahrerverhalten von Motorradfahrern .....	108
	Verwendete Meßtechnik .....	109
	Zeitverlauf des vorgeschlagenen Fahrzyklus DDC .....	112
Literatur	.....	114

## Abkürzungen

ACEM	Association des Constructeurs Européens de Motocycles
AGR	Abgasrückführung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BVDM	Bundesverband der Motorradfahrer e.V.
CARB	California Air Resources Board
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CVT	Continuously Variable Transmission
DDC	Darmstadt Driving Cycle (Darmstädter Motorrad-Fahrzyklus)
DK	Drosselklappe, Drosselklappenstellung
ECE	Economic Commission for Europe
EDC	European Driving Cycle (Europäischer Stadtfahrzyklus)
fzd	Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
GPS	Global Positioning System
HC	(unverbrannte) Kohlenwasserstoffverbindungen
ISO	International Organisation for Standardisation
IVM	Industrie-Verband Motorrad Deutschland e.V.
MKZ	Motorbetriebskennzahl
MMI	Man Machine Interaction / Versuchsstrecke A
MSFC	Mean Specific Fuel Consumption
MVEG	Motor Vehicle Emission Group, Expertengremium der EU-Kommission
NEDC	New European Driving Cycle
NMHC	Non-methanic Hydrocarbons
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxid-Verbindungen
StVO	Straßenverkehrsordnung
StVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung
TUD	Technische Universität Darmstadt
VMS	Verbrauchsmeßstrecke / Versuchsstrecke B

## Formelzeichen und Indizes

$\alpha$ [°]	Steigungswinkel
$a$ [m/s <sup>2</sup> ]	Beschleunigung
$B_S$ [l/100 km]	Streckenkraftstoffverbrauch
$A$ [m <sup>2</sup> ]	Stirnfläche
$c_p$ [J/kgK]	Wärmekapazität bei konstantem Druck
$c_v$ [J/kgK]	Wärmekapazität bei konstantem Volumen
$c_w$	Luftwiderstandsbeiwert
$e_m$	Massenfaktor
$\varepsilon$	Verdichtungsverhältnis
$f$ [Hz]	Frequenz
$\eta$	Wirkungsgrad
$f_{\text{Roll}}$	Rollwiderstandsindex
$F_w$ [N]	Widerstandskraft
$F_{w, \text{Beschl}}$ [N]	Beschleunigungswiderstand
$F_{w, \text{Luft}}$ [N]	Luftwiderstand
$F_{w, \text{Rad}}$ [N]	Radwiderstand

---

$F_{w, St}$ [N]	Steigungswiderstand
$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung (9,81 m/s <sup>2</sup> )
$\kappa$	Adiabatexponent
$m$ [kg]	Masse
$m_{ges}$ [kg]	Gesamtmasse (Fahrzeug + Fahrer)
$M_{Motor}$ [Nm]	Motormoment
$n$ [1/min]	Motordrehzahl
$\pi$	Kreiszahl (3,1415...)
$p_{me}$ [bar]	Effektiver Mitteldruck
$P_{Motor}$ [kW]	Motorleistung
$P_w$ [kW]	Fahrwiderstandsleistung
$q$ [%]	Steigungsmaß
$R$ [m]	Radius
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$T$ [°C, K]	Temperatur
$t_R$ [s/km]	Streckenbezogene Reisezeit
$v$ [km/h]	Geschwindigkeit
$V_H$ [cm <sup>3</sup> ]	Hubvolumen
$v_{rel}$ [km/h]	Relativgeschwindigkeit (zwischen Umgebungsluft und Fahrzeug)
$W$ [kJ, kWh]	Mechanische Arbeit
$\emptyset$	Durchschnittswert

## Zusammenfassung

In der Einleitung dieser Arbeit werden anhand statistischer Daten der aktuell bestehende Bestand und die Fahrleistungen verschiedener Kraftfahrzeugarten gezeigt, um den Anteil motorisierter Zweiräder am Verkehrsgeschehen zu verdeutlichen. Dabei wird der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich der umweltrelevanten Problemfelder der Abgas- und Geräuschemissionen, des Kraftstoffverbrauchs und weiterer Aspekte wie Ressourcen- und Verkehrsflächenbedarf dargestellt und diskutiert.

Anschließend werden die derzeit gültigen gesetzlichen Bestimmungen für die Zulassung von Motorrädern zum Verkehr vorgestellt und bestehende Kritik an den vorgeschriebenen Meßverfahren sowie Vorschläge zu deren Fortschreibung beschrieben. Soweit erforderlich, werden die für andere Fahrzeugarten geltenden Vorschriften vergleichend betrachtet. Die Darstellungen konzentrieren sich auf die in Deutschland, innerhalb der europäischen Union sowie in den USA geltenden Situationen. Die teilweise erheblichen Rückwirkungen, die gesetzliche Anforderungen auf die Fahrzeuggestaltung und – abstimmung seitens der Hersteller besitzen, werden aufgezeigt.

Der Hauptteil der Arbeit beschreibt die Entwicklung konkreter Maßnahmen für den Bereich der Gesetzgebung mit dem Ziel, die Praxisnähe der bestehenden Vorschriften zu erhöhen und dadurch den während der Prüfungsdurchführungen erkennbaren Nutzen von technischen Optimierungsmaßnahmen am Fahrzeug auch in der alltäglichen Fahrpraxis zur Geltung kommen zu lassen.

Dazu werden zunächst Ergebnisse von umfangreichen Fahrversuchen im öffentlichen Straßenverkehr präsentiert, deren Versuchsbedingungen auf der Basis einer Umfrage unter Motorradfahrern definiert wurden. Mit Fahrerkollektiven aus insgesamt 35 Fahrern wurden mit drei unterschiedlichen Motorrädern und zwei Pkw insgesamt ca. 12.000 km Fahrstrecke unter Aufzeichnung relevanter Größen wie Fahrgeschwindigkeit, Motordrehzahl, Längsbeschleunigung usw. zurückgelegt. Die Auswertung konzentriert sich auf typische Fahrleistungen, statistische Betrachtungen zur Häufigkeit von Betriebspunkten im Motorkennfeld und die Betätigung der Schaltgetriebe. Relevante Parameter, die das Fahrerverhalten und die Betriebsweise im realen Verkehr beeinflussen, werden anhand statistischer Modelle identifiziert.

Hinsichtlich der Geräuschemissionen wird aufgezeigt, daß das derzeitige Meßverfahren zur Bestimmung des Fahrgeräuschs nicht die in der alltäglichen Fahrpraxis auftretenden Maximalgeräusche reproduziert.

Basierend auf bereits vorliegenden Empfehlungen und Vorschlägen anderer Institutionen und den in den Fahrversuchen gewonnenen neuen Erkenntnisse zum realen Fahrerverhalten werden Vorschläge für Meßverfahren für zukünftige Abgas-, Verbrauchs- und Geräuschemessungen erarbeitet und mit mehreren Motorrädern hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit erprobt. Hieraus resultieren ein Vorschlag für einen Fahrzyklus mit motorradtypischer Fahrdynamik, der für Abgas- und Verbrauchsmessungen auf Rollenprüfständen eingesetzt werden sollte, sowie für einen geänderten Meßablauf der Fahrgeräuschemessung, bei dem sich der zu prüfende Betriebszustand an der Nenndrehzahl des jeweiligen Fahrzeugs orientiert.

Im abschließenden Kapitel werden über die Gestaltung von neuen Meß- und Prüfabläufen hinaus technische Möglichkeiten diskutiert, die zu einer Verringerung von Umweltbelastungen durch motorisierte Zweiräder führen können.

Aufgrund des geringen Anteils der Motorräder an den Gesamtemissionen des Straßenverkehrs sollte eine vollständige Gleichbehandlung von Motorrädern und Pkw auch unter dem Aspekt der gesamtwirtschaftlichen Kosten nicht angestrebt werden. Dennoch wird die Umsetzung von Veränderungen der gesetzlichen Bestimmungen für Motorräder, wie sie in dieser Arbeit vorgeschlagen werden, dringend empfohlen, um eine realitätsbezogene Abstimmung und damit Praxiswirksamkeit technischer Maßnahmen zu erzielen. Langfristig läßt sich nur durch eine zunehmende Orientierung an den Entwicklungen anderer Fahrzeugkategorien die Stellung des Motorrads als Bestandteil des Individualverkehrs sichern.

# 1 Einleitung - Motorisierte Zweiräder im Verkehrsgeschehen

## 1.1 Historie, aktuelle Situation und Ausblick

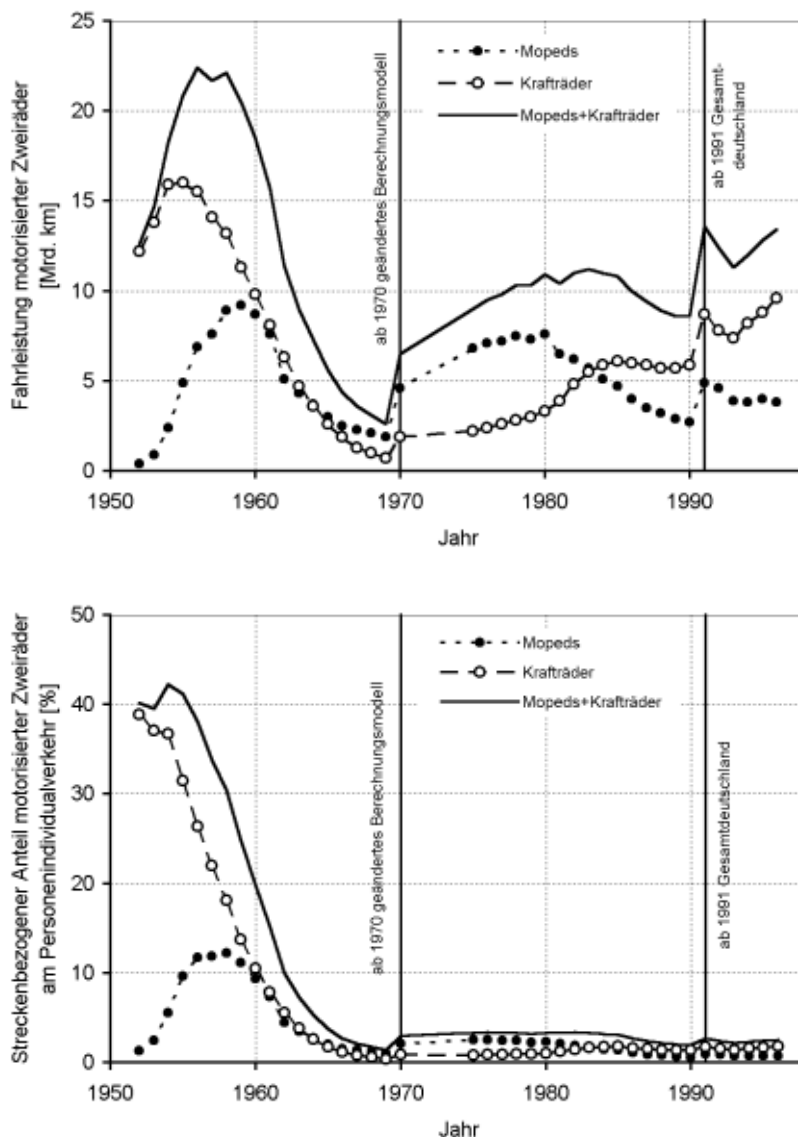
Das Motorrad war aus Kostengründen in der Vergangenheit in Deutschland lange Zeit das am weitesten verbreitete motorisierte Verkehrsmittel. Anfang der 50er Jahre lag bei höherem Fahrzeugbestand die jährliche Fahrleistung motorisierter Zweiräder mit einem Anteil von ca. 40 % an der Gesamtfahrleistung in ähnlicher Größenordnung wie die von Personenkraftwagen, **Bild 1.1**.

Mit zunehmender Verbreitung von Pkw ließ in Deutschland die Bedeutung des motorisierten Zweirads seit Ende der 50er Jahre deutlich nach und bewegte sich für einige Zeit auf annähernd vernachlässigbarem Niveau, **Bild 1.1**. Anfang der 70er Jahre wurde dann, hauptsächlich von japanischen Herstellern, ein neuer Motorradmarkt entdeckt und

mit einer geänderten Form von Fahrzeugen bedient. Überwiegend stellte sich in dieser Zeit eine freizeitlich orientierte Nutzung des Motorrads ein, was die Hersteller zur Entwicklung von Motorrädern mit hohen Fahrleistungen und daraus resultierendem Fahrvergnügen veranlaßte.

Aufgrund der rapide ansteigenden Motorleistungen, die in Verbindung mit Fahrwerksschwächen und mangelnden Rahmensteifigkeiten zu problematischem Fahrverhalten führten, stiegen in dieser Zeit die Unfallzahlen motorisierter Zweiräder deutlich an, **Bild 1.2**.

Bezogen auf die zurückgelegten Wegstrecken lag das Risiko einer Verletzung oder Tötung für Motorradfahrer im Vergleich zu Pkw-Insassen in den 70er Jahren in etwa um den Faktor 50 höher, **Bild 1.2**. Hieraus sowie aus



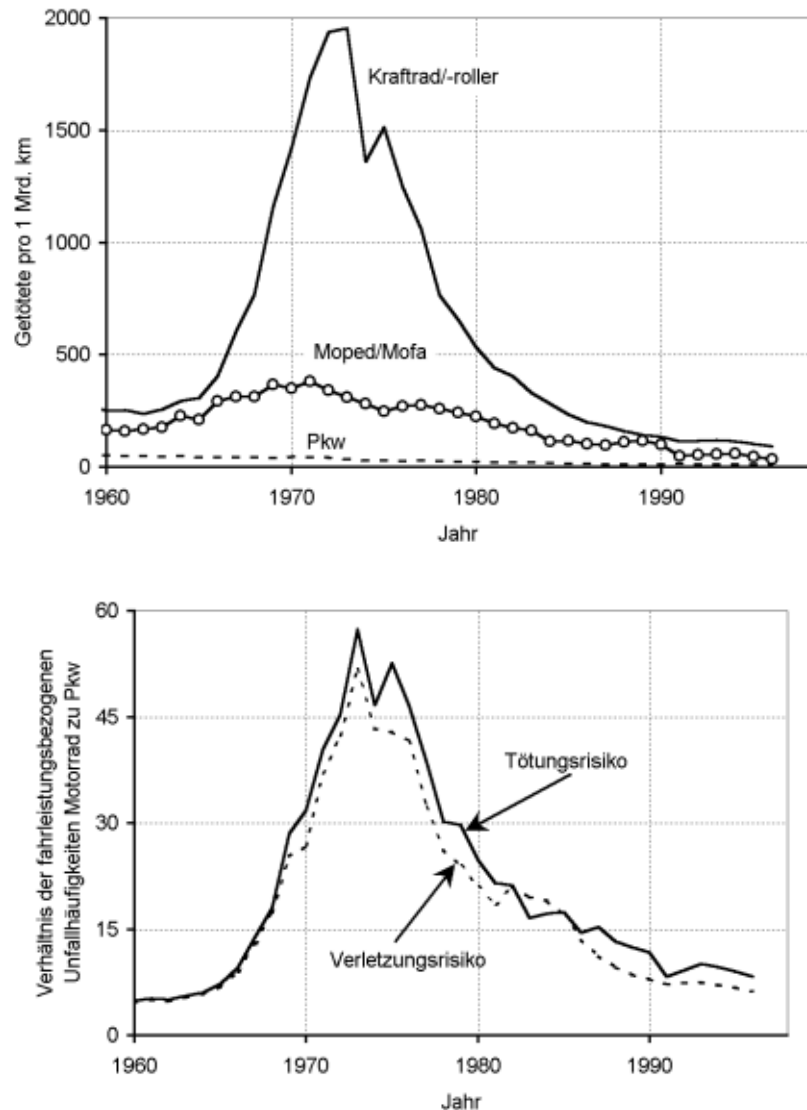
**Bild 1.1:** Geschätzte Verkehrsleistung motorisierter Zweiräder in Deutschland, Anteil am motorisierten Individualverkehr

dem Auftreten verschiedener Gruppierungen unter den Motorradfahrern entstanden zudem Image-Probleme des Motorrads als ernstzunehmende Lösung für auftretende Verkehrsprobleme.

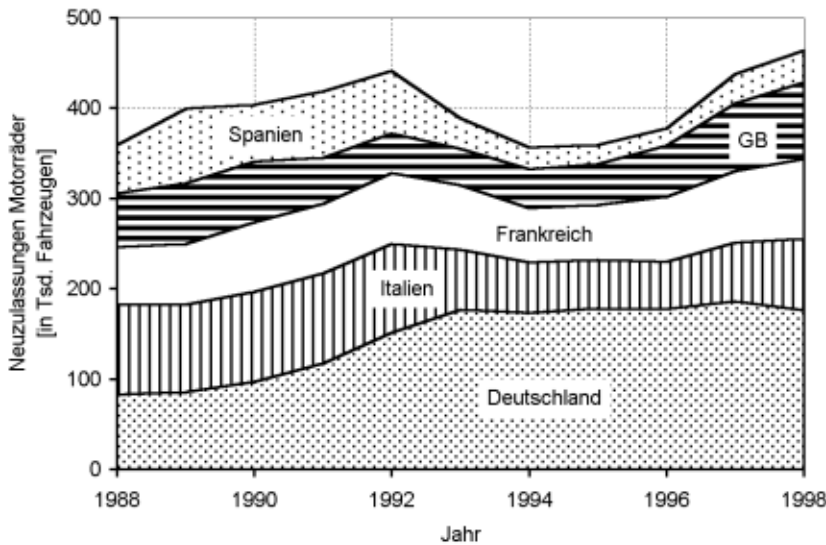
Mit fortschreitender technischer Entwicklung konnten im Bereich der Fahrdynamik und Fahrstabilität deutliche Verbesserungen erzielt werden, die zusätzlich durch gesetzgeberische Maßnahmen wie Helmpflicht, Tageslicht für motorisierte Zweiräder und Stufenführerschein für Motorräder flankiert wurden. Dennoch ist heute von einer im Vergleich zum Pkw ca. um den Faktor 6 (Verletzung) bzw. 8 (Tötung) höheren streckenbezogenen Unfallrate von Motorradfahrern auszugehen.

Diese statistischen Betrachtungen beziehen sich allein auf die Unfallhäufigkeit, lassen also die beim Motorrad tendenziell höhere Verletzungsschwere im Falle eines Unfalls außer acht. Daher ist bei einer Beurteilung des Risikos im Sinne der ingenieurwissenschaftlichen Definition als Produkt von Wahrscheinlichkeit und Tragweite auch heute noch von einem deutlich höheren Risiko des Motorrads im Vergleich zum Pkw auszugehen, das Maßnahmen zur Steigerung der aktiven und passiven Fahrsicherheit auch weiterhin dringend geboten erscheinen läßt [6, 72, 103].

Dennoch führten die bereits realisierten Verbesserungen im Bereich der Fahrsicherheit sowie gesellschaftliche Entwicklungen in Richtung zu steigenden Freizeitaktivitäten in den Folgejahren zu einer deutlichen Zunahme des Motorradbestands und der jährlichen Fahrleistungen. Das Image des Motorrads wandelte sich vom Transportmittel für wenige Individualisten zum Freizeitgerät für weite Bereiche der Bevölkerungsschichten. Zusätzliche Nachfrage wurde durch die Neuregelung des Führerscheins in Deutschland



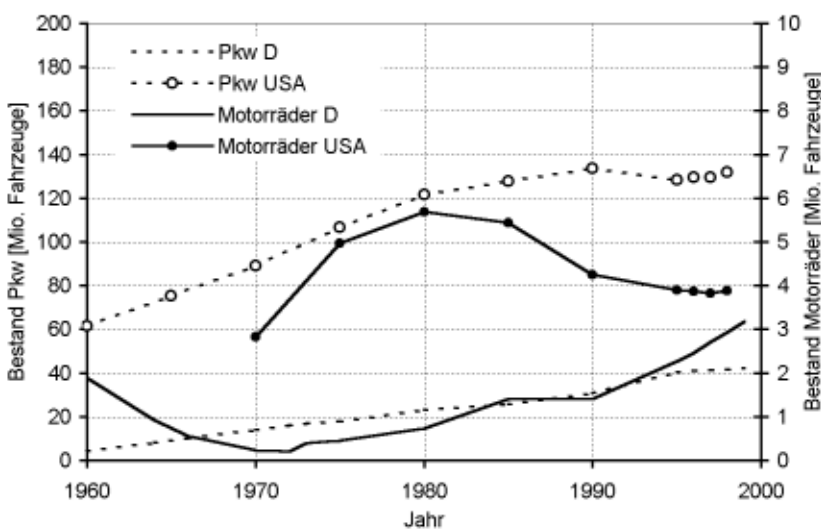
**Bild 1.2:** Entwicklung des Unfallgeschehens und der Unfallhäufigkeiten motorisierter Zweiräder, Zahlenwerte nach [23]



**Bild 1.3:** Motorrad-Neuzulassungen in den Hauptmärkten der EU [53]

seit 1995 leicht rückläufig ist. Die vier Länder Deutschland, Frankreich, Großbritannien und Italien stellen zur Zeit über 90 % des europäischen Motorradmarkts dar.

Im weltweiten Vergleich besitzt Deutschland derzeit den zweitgrößten Markt hinter den USA [55]. Wie **Bild 1.4** zeigt, betrug das Verhältnis zwischen Motorradbestand und Pkw-Bestand in den USA zu Beginn der 70er Jahre ca. 1:21 und verringert sich seitdem kontinuierlich auf den heutigen Stand von ca. 1:34. Seit 1980 sind auch die absoluten Bestandszahlen der Motorräder in den USA rückläufig, während die Entwicklung des Motorradbestands in Deutschland seit den 70er Jahren einen deutlich positiven Trend aufweist, dessen Wachstumsgeschwindigkeit noch über der von Pkw liegt.



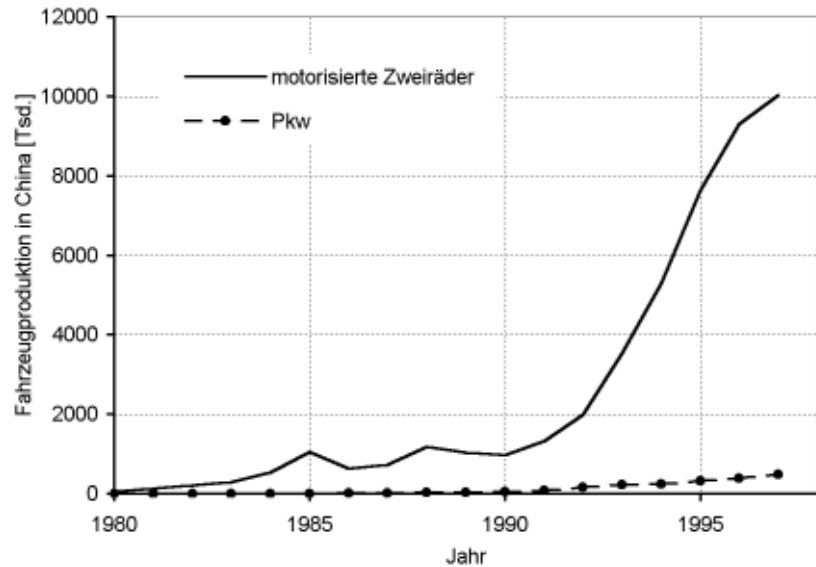
**Bild 1.4:** Bestand an Motorrädern und Pkw in Deutschland und USA, Zahlen nach [62, 96]

im Jahr 1996 geschaffen, z.B. durch die Freigabe von 125 cm<sup>3</sup>-Motorrädern an ältere Fahrer mit langjährigem Führerscheinbesitz.

Nach einem ausgesprochenen Boom zu Beginn der 90er Jahre hat sich der deutsche Motorradmarkt zwischenzeitlich auf hohem Niveau stabilisiert. Innerhalb Europas nimmt das vereinte Deutschland mit ca. 40 % Marktanteil dabei die führende Position ein, **Bild 1.3**, wobei dieser Anteil

1999 betrug das Verhältnis Motorräder zu Pkw hierzulande ca. 1:13. Im Hinblick auf neue Gesetzgebungen, z.B. zum Abgasverhalten von Motorrädern in den genannten Ländern, erklärt sich allein aus diesen Bestandszahlen, daß das Interesse an einer Fortschreibung der für Motorräder geltenden Bestimmungen in den USA geringer ist als in Deutschland [99].

In den Schwellenländern übertrifft die wirtschaftliche und verkehrstechnische Bedeutung motorisierter Zweiräder noch heute diejenige von Pkw. So wurden in China, einem der zukünftig wohl bedeutendsten Wachstumsmärkte für Verkehrsgüter, 1997 ca. 21 Mal so viele Motorräder (Hubraum zwischen 50 und 750 cm<sup>3</sup>, hoher Anteil kleinvolumiger Zweitakter) wie Pkw hergestellt, **Bild 1.5**, auch wenn die jährlichen Zuwachsraten bei Pkw seit Mitte der 80er Jahre Motorrädern überlegen



**Bild 1.5:** Motorrad- und Pkw-Produktion am Beispiel China, Angaben nach [25]

Emissionsreduzierungen an motorisierten Zweirädern besitzen daher über die Märkte der heutigen Industrienationen hinaus eine erhebliche globale umweltstrategische Bedeutung. Aufgrund der sehr hohen Verkehrsdichten in wirtschaftlich hoch entwickelten Zentren Asiens wie Hongkong oder Taiwan bestehen Umweltbelastungen durch den Verkehr, deren Eindämmung nur durch strenge gesetzliche Vorschriften, wie in Taiwan bereits in Kraft [27, 105], sowie den Einsatz moderner Technologien auch für Zweiräder erreicht werden kann. Hierzu ist über die in dieser Arbeit vorgestellten Überlegungen hinsichtlich Motorrädern hinaus ein wesentliches Augenmerk auf die als Stadtfahrzeuge konzipierten Mopeds und Motorroller zu legen, die heute nahezu ausnahmslos durch Zweitaktmotoren mit Verlustschmierung angetrieben werden.

## 1.2 Motivationen zur Nutzung von Motorrädern

Für die Diskussion der typischen Nutzung von Motorrädern sind Forschungen zur Freizeitmobilität, die den überwiegenden Teil des Motorradverkehrs ausmacht, von Bedeutung. In [35] wird dargestellt, daß zwischenzeitlich ca. 50 % der gesamten Verkehrsleistung in Deutschland auf den Freizeitverkehr zurückzuführen sind, wobei diese Entwicklung eine steigende Tendenz aufweist. Ca. 40 % des Freizeitverkehrs findet am Wochenende statt, wobei der Pkw mit ca. 90 % das überwiegende Verkehrsmittel darstellt.

Aus der umfassenden Fahrleistungserhebung der Bundesanstalt für Straßenwesen [45] ergeben sich übliche Fahrleistungen von Motorrädern von ca. 4.500 km pro Jahr. Die Frauenquote lag sowohl unter den Motorrad-Haltern als auch bezüglich der Fahrleistung in 1990 bei ca. 10 %. Im Jahr 1998 waren bei einem Kraftradbestand von 2,8 Mio. Fahrzeugen bereits 14 % auf weibliche Halter zugelassen [62].

Auch in [79] wird gezeigt, daß der Anteil von Frauen sowohl bezogen auf die Fahrzeughalter als auch hinsichtlich der tatsächlichen Fahrleistung einen mit der Zeit steigenden Trend aufweist. Unter den bis zu 25 Jahre alten Haltern betrug ihr Anteil schon 1992 15 %, wobei der Anteil an der Fahrleistung sogar darüber liegen dürfte.

Als maßgebliche Einflußfaktoren für die Nutzung des Motorrads als Verkehrsmittel wurden in [45] das Lebensalter, das Geschlecht sowie die Verfügbarkeit eines Pkw für den Befragten ermittelt. Sofern den Befragten ein Pkw zur Verfügung stand, lag die Jahresfahrleistung der Motorräder bei durchschnittlich 4.100 km. Motorradfahrer, die nicht über einen Pkw verfügen konnten, legten hingegen jährlich 6.500 km mit dem Motorrad zurück. Mit zunehmendem Lebensalter nahm laut dieser Erhebung die jährliche Motorradfahrleistung ab. Die durchschnittliche Fahrleistung von Frauen lag nach dieser Studie nur wenig unterhalb der von Männern (4.300 km gegenüber 4.500 km).

Nach [78, 79] haben sich die Gründe für die Fahrzeugnutzung gegenüber dem reinen Mobilitätsbedürfnis stark gewandelt. Die hauptsächliche Motivation besteht heute überwiegend im Erlebnis des Fahrens und den damit verbundenen, positiven Gefühlen. Motorradfahren wird daher als intrinsisch, d.h. um der reinen Durchführung der Sache willen, motivierte Sportart angesehen. Psychologische Motivationen für das Motorradfahren finden sich getrennt nach dem Geschlecht der Fahrer z.B. in [79, 80].

In einer eigenen Datenerhebung im Rahmen der in der vorliegenden Arbeit dargestellten Untersuchungen wurde eine Umfrage unter Motorradfahrern durchgeführt mit dem Ziel, die typischen Bedingungen und Gründe für die Nutzung von Motorrädern zu bestimmen [107, 108], deren Ergebnisse im weiteren noch ausführlich dargestellt werden (siehe auch Kap. 4, Seite 41 ff.).

Die Frage, welcher Prozentsatz der Motorradfahrten Fahrten mit anderen Verkehrsmitteln ersetzt, wurde im Mittel mit ca. 40 % der Fahrstrecke beantwortet. Dies deckt sich gut mit den Antworten auf die Frage nach der überwiegenden Fahrmotivation, die bei ca. 40 % der Fahrten darin besteht, „ein Fahrziel zu erreichen“. Die übrigen Fahrten wurden als „Urlaubsfahrten oder Fahrten im Urlaub“ (ca. 20 %) und als reine „Spaß-/Freizeitfahrten“ (ca. 40 %) bezeichnet. Es ist also davon auszugehen, daß der Freizeitgedanke in mehr als der Hälfte der Motorradfahrten die überwiegende Motivationsquelle darstellt.

Durch diesen im Vergleich zu Pkw deutlich höheren Anteil der durch Freizeitgedanken motivierten Fahrten kommt es zu einer anderen Nutzungsstruktur des Straßennetzes. Ca. 60 % der Motorradfahrstrecken wird nach den Umfrageergebnissen auf Landstraßen zurückgelegt, während die Autobahnen (ca. 20 %) sowie der Stadtverkehr (ca. 20 %) eine erheblich geringere Bedeutung besitzen als beim Pkw.

Die Auswahl der Motorradfahrstrecken während der Freizeitfahrten erfolgt dabei überwiegend nach den Kriterien „landschaftlich reizvoll“ (59 % der Antworten, Mehrfachnennungen möglich) und „fahrerisch reizvoll“ (63 %). 24 % der Fahrer gaben an, die Streckenwahl überwiegend „zielorientiert“ vorzunehmen, während 18 % die Fahrstrecke häufig „zufällig“ auswählen.

Wie erwartet, zeigt sich in diesen Einschätzungen die auch in der Tagespresse oft formulierte Problematik räumlich und zeitlich stark konzentriert auftretenden Motorradverkehrs in für Motorradfahrten reizvollen Gegenden. Zeitlich korrelieren diese stark mit

dem Erholungswunsch der nicht Motorrad fahrenden Bevölkerung, so daß sich aus Geräusch- und Schadstoffemissionen von Motorrädern lokal und zeitlich starke Konflikte ergeben.

Aus der beschriebenen, häufig freizeitorientierten Benutzung von Motorrädern lassen sich hohe Anforderungen an die Umweltverträglichkeit dieser Fahrzeuge ableiten, da sich abgesehen vom individuell gewünschten Entspannungs- oder Erlebniseffekt oftmals keine für die Allgemeinheit sinnvollen Ergebnisse wie die Erfüllung vorhandener Mobilitäts- oder Transporterfordernisse ergeben, die den Ressourceneinsatz gesellschaftlich rechtfertigen. Für die Allgemeinheit erscheinen die Belästigungen durch Motorradfahrten daher häufig besonders leicht vermeidbar, wobei auch die Verwendung manipulierter Fahrzeuge durch einige Motorradfahrer die sachliche Diskussion und technische Weiterentwicklung stark erschwert.

### **1.3 Technische Daten und Fahrleistungspotentiale von Motorrad und Pkw**

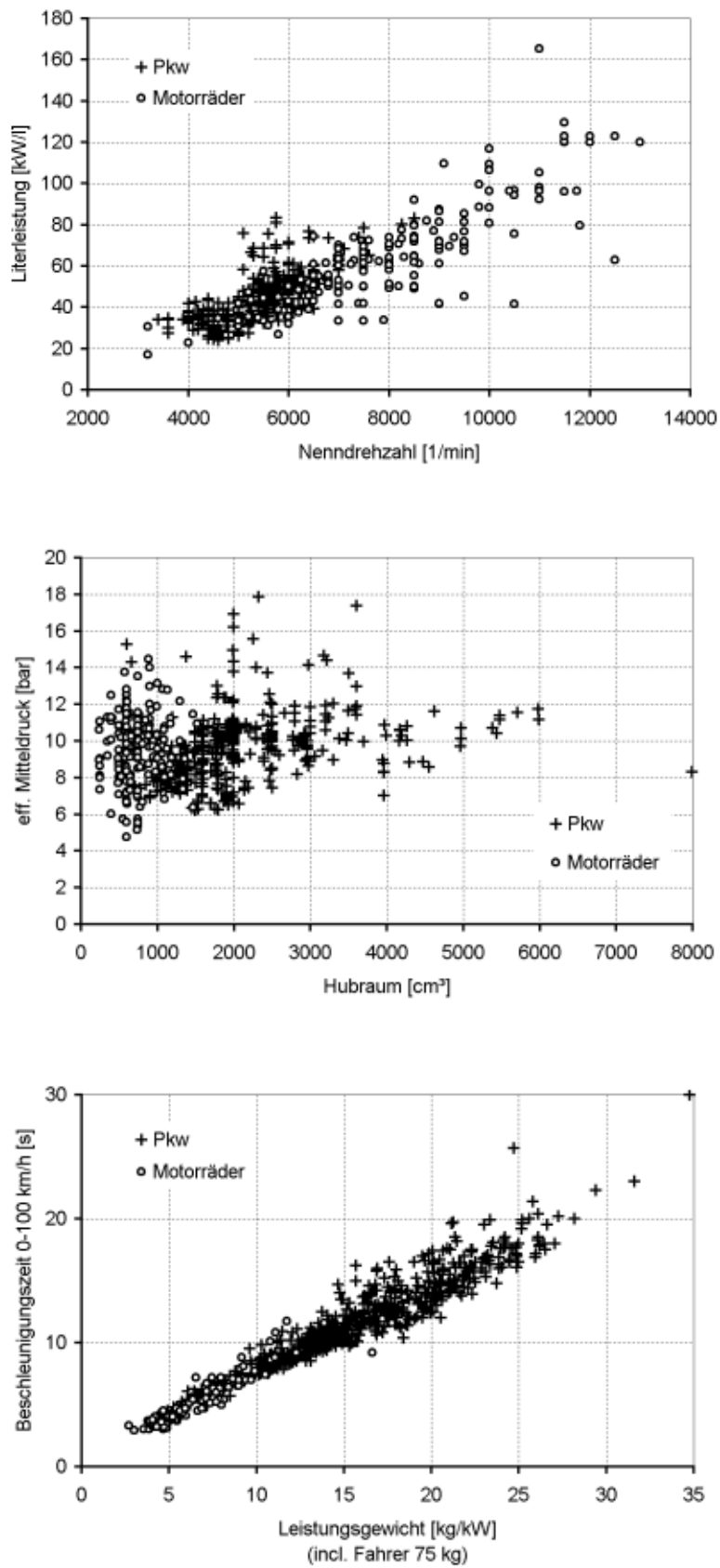
Ein Vergleich für die Fahrleistung relevanter technischer Daten aktueller Fahrzeuge zeigt das unterschiedliche Potential von Motorrädern und Pkw. Motorisch werden die hohen Literleistungen heutiger Motorräder überwiegend durch hohe Nenndrehzahlen erzielt, **Bild 1.6**. Dies erleichtert bei gegebener Leistung aufgrund kleiner Drehmomente eine bauraum- und gewichtsoptimierte Bauweise der Fahrzeuge.

Die effektiven Mitteldrücke der aus verschiedenen Gründen ohne Aufladung arbeitenden Viertakt-Motorradmotoren liegen im Mittel nicht höher als die nicht-aufgeladener Pkw-Otto-Motoren.

Die sehr hohen möglichen Längsbeschleunigungen sportlich ausgelegter Motorräder stellen für viele Fahrer einen besonderen Reiz beim Motorradfahren dar. Heutige Sportmotorräder erreichen dabei im unteren Geschwindigkeitsbereich eher die Fahrgrenze des Beschleunigungsüberschlags als eine Begrenzung der Fahrleistung aufgrund ausgeschöpfter Motorleistung. Die im Vergleich zu üblicher Pkw-Bereifung mit stärkerer Ausrichtung auf das Kraftschlußverhalten unter Verzicht auf Pkw-Reifen-übliche Lebensdauern entwickelten Reifen von Motorrädern gestatten dabei eine höhere spezifische Kraftübertragung auf die Straße.

Unter dem Aspekt des Kraftstoffverbrauchs besitzt das Motorrad gegenüber dem Pkw den deutlichen Vorteil der geringen Masse, die im Hinblick auf das Verbrauchesparungspotential beim Pkw die zentrale Größe darstellt, **Bild 1.7**.

Wie z.B. eine Gegenüberstellung von Streckenkraftstoffverbräuchen mit der Leermasse aktueller Pkw zeigt [14, 28], dürfte ein Fahrzeug mit konventioneller Technologie im fahrfertigen Zustand eine Masse von maximal ca. 600–700 kg aufweisen, um Verbrauchswerte um 3 l/100 km zu erzielen.



**Bild 1.6:** Vergleich technischer Daten aktueller Motorräder und Pkw (Quelle: Auswertung div. Testberichte)

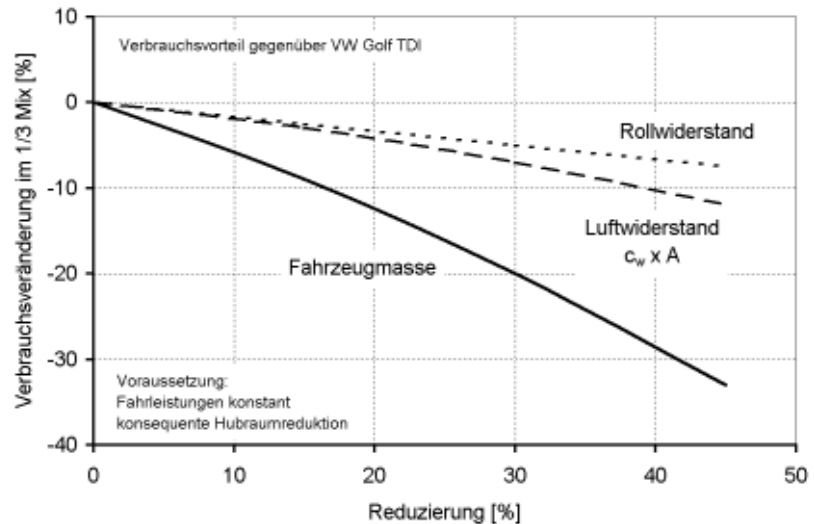
Neueste Pkw-Entwicklungen mit direkt einspritzenden, aufgeladenen Dieselmotoren erreichen unter Ausnutzung weiterer Maßnahmen diesen Verbrauchswert bei Gesamtmassen der Fahrzeuge zwischen 800 und 900 kg [3, 30, 90]. Dabei werden neben konsequentem Leichtbau von Einzelkomponenten auch verlustleistungsminimierte Nebenaggregate eingesetzt sowie aerodynamische Optimierungen von Fahrzeugkarosserie und Unterboden vorgenommen.

Von wesentlichem Einfluß auf die Verbrauchseinsparungen sind darüber hinaus automatisierte Schaltgetriebe, die im überwiegenden Anteil der möglichen Betriebszustände nach verbrauchsoptimalen Schaltkennfeldern betätigt werden.

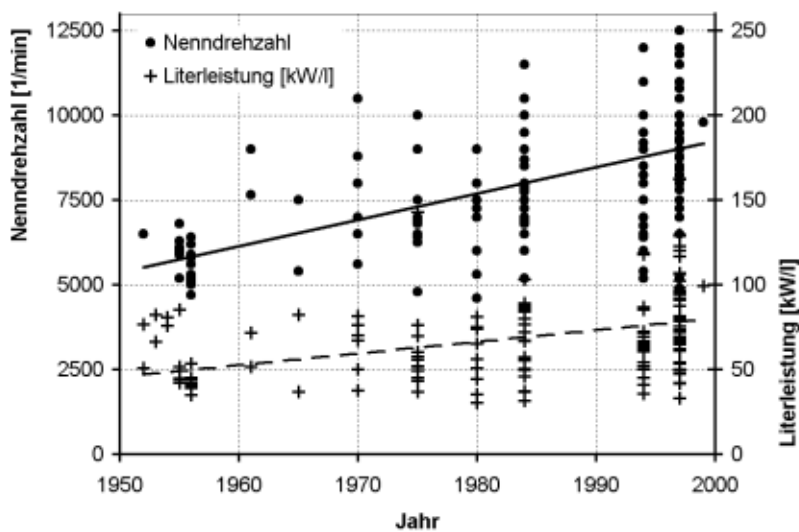
Im direkten Vergleich von Kraftstoffverbräuchen zwischen Otto- und Dieselmotor ist allerdings immer der unterschiedliche Energieinhalt einer volumetrisch gemessenen Kraftstoffmenge zu berücksichtigen, der beim Diesel aufgrund der höheren Dichte bei annähernd gleich hohem spezifischem Heizwert gegenüber Superkraftstoff um ca. 8 % höher liegt [13].

Motorräder unterschreiten die oben genannten Massen unter Berücksichtigung der Masse des Aufsassens bei weitem, selbst schwere Fahrzeuge haben bei voller Zuladung selten Gesamtmassen von mehr als 500 kg. Dennoch liegen die Streckenkraftstoffverbräuche aktueller Modelle, sowohl unter Zugrundelegung des Drittelmix-Verfahrens wie auch aus Beobachtungen im praktischen Fahrbetrieb, deutlich oberhalb dieses Werts bei durchschnittlich ca. 6 l/100 km (Umfrageergebnis, vgl. Kap. 4, Seite 41). Hierfür sind neben fahrzeugspezifischen Besonderheiten von Motorradmotoren auch die auf sehr hohe Maximalleistungen ausgelegten Motorisierungen mit ungünstigen Wirkungsgraden im Betriebsbereich der unteren Teillast verantwortlich.

Von verschiedenen Motorradzeitschriften werden zuweilen Vergleiche zwischen Pkw und Motorrad hinsichtlich Fahrleistungen und Kraftstoffverbrauch durchgeführt und veröffentlicht. In [5] kommt als Ergebnis zum Ausdruck, daß bei ähnlicher Fahrweise auf Rennstrecken sowie im öffentlichen Straßenverkehr bei verschiedenen Paarungen zwischen Motorrad und Pkw das Motorrad bei besseren Fahrleistungen einen mittleren Verbrauchsvorteil von ca. 50 % gegenüber dem jeweiligen Vergleichs-Pkw (i.a. ähnliche Marktzugehörigkeit, z.B. Sportfahrzeug, Geländefahrzeug) aufweist. In [40] werden Verbrauch, Abgas und Geräuschemissionen von 16 verschiedenen Motorrädern und einem Pkw im EU-Fahrzyklus und bei Konstantfahrt verglichen. Aus den Ergebnissen



**Bild 1.7:** Einfluß von Fahrzeugmasse, Luft- und Rollwiderstand auf den Kraftstoffverbrauch eines Pkw [28]



**Bild 1.8:** Entwicklung von Motorleistung und Nenn Drehzahl von Motorrädern über der Zeit, Quelle: Testberichts ausgewertungen

leitet sich u.a. die Forderung nach einem praxisnahen Fahrtstest für Motorräder ab, da der derzeit vorgeschriebene Fahrzyklus (EDC=EU-Stadtfahrzyklus) den realen Betrieb von Motorrädern in keiner Weise repräsentiert.

Über der Zeit ist für Motorräder ein deutlicher Trend zu höheren Nenn Drehzahlen und damit steigenden Motorleistungen erkennbar, **Bild 1.8**. Bezüglich der resultierenden Geräuschemissionen ist diese Entwicklung allerdings kontraproduktiv.

Wie im folgenden noch gezeigt wird, haben auch die derzeit gültigen Meß- und Prüfverfahren für neue Fahrzeuge, besonders die Meßvorschrift für das Fahrgeräusch, einen gravierenden Einfluß auf die von den Herstellern gewählte Fahrzeugauslegung. Eine Anpassung dieser Vorschriften an aktuelle Entwicklungen mit dem Ziel, die zum Teil unerwünschten Entwicklungsrichtungen in der Fahrzeuggestaltung zu erschweren, erscheint daher dringend geboten.

Aus einer Betrachtung des Straßenverkehrs in der Praxis kann allerdings bereits erwartet werden, daß die oben gezeigten Fahrleistungspotentiale leistungsstarker Motorräder im realen Verkehr allenfalls temporär umgesetzt werden können. Für eine realitätsbezogene Anpassung von Meßverfahren und Vorschriften sollten daher nicht die theoretischen Potentiale einer Fahrzeugkategorie, sondern deren tatsächlicher Einsatz im Straßenverkehr als Maßstab herangezogen werden.

#### 1.4 Umweltverträglichkeit von Krafträdern, Maßnahmen und Potentiale

Die Emissionen des Straßenverkehrs sind zumindest in Deutschland mit Ausnahme des Kohlendioxids seit Beginn der 90er Jahre durch den zunehmenden Anteil schadstoffärmerer Kraftfahrzeuge im Sinken begriffen und werden aktuellen Prognosen zufolge trotz steigenden Verkehrsaufkommens noch weiter reduziert werden. Der Kraftstoffverbrauch des Personenverkehrs ist seit dieser Zeit weitgehend konstant, d.h. die am Einzelfahrzeug erreichten Verbesserungen werden momentan durch die Trends zu größeren Fahrzeugen und die steigende Gesamtfahrleistung aufgezehrt [94]. Nach aktuellen Modellrechnungen ist davon auszugehen, daß sich der Durchschnittsverbrauch neuer Pkw bis zum Jahr 2020 in etwa halbiert und der Kraftstoffkonsum aller Pkw in Deutschland bis zum Jahr 2020 um ca. 25 % zurückgeht, was sich in gleicher Höhe auf die durch den Pkw-Verkehr bedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen auswirken würde [29].

Der derzeit mehr oder weniger konstante Schadstoffausstoß und Kraftstoffkonsum der Motorräder wird hingegen bei unveränderten technischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen voraussichtlich auch in den kommenden Jahren bestehen bleiben und dadurch zu einem Anstieg der relativen Umweltbelastungen durch motorisierte Zweiräder führen.

Grundsätzlich gehen von motorisierten Zweirädern ähnliche Umweltbelastungen aus wie von sonstigen Fahrzeugen mit verbrennungsmotorischem Antrieb, so daß sich auch vergleichbare Ansatzpunkte für Optimierungsmaßnahmen bieten:

- Ressourcenverbrauch für die Rohstoffherzeugung und die Fahrzeugproduktion,
- Kraftstoff- und Betriebsmittelverbrauch während des Betriebs,
- Materialverbrauch zur Instandhaltung während der Lebensdauer,
- Flächenbedarf während der Nutzung und der Stillstandszeiten,
- Emissionen z.T. toxisch wirkender Abgase,
- Partikelemissionen,
- Geruchsbelästigungen, besonders bei Zweitaktern und im Fahrzeugstillstand,
- Lärmemissionen,
- Abfallbeseitigung oder Wiederverwertung nach Ende der Lebensdauer.

Gesetzlich beschränkt und mit Hilfe von vorgeschriebenen Prüfverfahren einmalig oder periodisch überwacht werden derzeit für Motorräder lediglich die Abgasemissionen hinsichtlich der Schadstoffkomponenten HC, CO und NO<sub>x</sub> sowie die Lärmemissionen. Die jeweils anzuwendenden Vorschriften unterscheiden sich hierbei international deutlich und werden im folgenden Kapitel 2 ab Seite 24 näher erläutert. Daneben werden im Rahmen periodischer Fahrzeuguntersuchungen die für das Geräusch- und Abgasverhalten relevanten Bauteile einer Sichtprüfung unterzogen. Gesetzliche Anforderungen an die Höhe des Kraftstoffverbrauchs oder an die Recycling-Fähigkeit der eingesetzten Materialien bestehen nicht.

#### **1.4.1 Abgasemissionen – Stand der Technik**

Der Einfluß von motorisierten Zweirädern auf die gesamten verkehrsbedingten Schadstoffemissionen wird von heutigen Berechnungsmodellen in unterschiedlicher Weise bestimmt. Nach Angaben in [73] tragen Motorräder 1997 zu ca. 4 % zum CO-Ausstoß der gesamten Verkehrsemissionen in Europa bei, zu HC mit ca. 3,1 % und zu NO<sub>x</sub> mit ca. 0,2 %. Bis zum Jahr 2010 werden je nach Marktentwicklung im Bereich der Motorräder und des übrigen Verkehrs für den CO- und den HC-Anteil leichte Rückgänge, für den NO<sub>x</sub>-Anteil hingegen ein leichter Anstieg prognostiziert.

Nach Ergebnissen von Emissionsabschätzungen des ifeu-Instituts mit Hilfe des sogenannten TREMOD-Modells (=Transport Emission Estimation Model), eines Daten- und Rechenmodells, das im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt wurde, betrug der Anteil aller motorisierten Zweiräder an den Kohlenwasserstoffemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland im Jahr 1996 ca. 9 %. Aufgrund des bei guten Witterungsverhält-

nissen steigenden Zweiradaufkommens im Verkehr kann dieser Anteil nach den Ergebnissen des Rechenmodells auf bis zu 18 % (Sonntag im Juni) ansteigen und damit in ähnlicher Größenordnung liegen wie der Anteil der Flotte der mit geregelter Katalysator ausgerüsteten Pkw, obwohl deren Fahrzeugbestand um den Faktor 5 und die Fahrleistung ca. um den Faktor 20 höher liegt. Besonders bei Ozon-Wetterlagen könnte das Motorrad nach diesen Ergebnissen einen nennenswerten Anteil am Ausstoß von Vorläufersubstanzen haben [21].

Diese und ähnliche Prognosen basieren auf Emissionsfaktoren in Gramm einer Schadstoffkomponente pro Kilometer Fahrstrecke für die einzelnen Fahrzeugkategorien. Zur Ermittlung dienen hierbei Prüfstandsmessungen mit ausgewählten Fahrzeugen in vorgegebenen Fahrzyklen. Die Ergebnisse werden üblicherweise auf den jeweiligen Fahrzeugbestand des untersuchten Landes hochgerechnet. Diese Vorgehensweise berücksichtigt daher nicht die tatsächlichen Fahrstrecken sowie die sehr unterschiedlichen Betriebsweisen verschiedener Fahrzeuge. Je nach Annahmen können sich die Ergebnisse verschiedener Modellrechnungen dadurch stark unterscheiden, so daß ein zuverlässiger Vergleich verschiedener Fahrzeugkategorien erheblich erschwert wird.

Für Deutschland kommen Abgasmessungen auf Rollenprüfständen an Motorrädern und Pkw für das Jahr 1990 zu dem Ergebnis, daß Motorräder hinsichtlich der Schadstoffkomponenten unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenmonoxid (CO) den ca. 11- bis 14-fachen Ausstoß pro Kilometer aufweisen wie Pkw [93]. Einzelmessungen des ADAC im Jahr 1992 ergeben in einem Vergleich von 15 nach Verkaufszahlen und Abgasreinigungssystemen ausgewählten Motorrädern mit einem Mittelklasse-Pkw mit geregelter Katalysator für die genannten Schadstoffkomponenten ca. 30-fachen (Summenwert HC+NO<sub>x</sub>) bzw. 40-fachen (CO) Ausstoß der Motorräder im Vergleich zum Pkw, jeweils gemessen im EU-Stadtfahrzyklus [40]. Demgegenüber weisen Untersuchungen des Umweltbundesamtes Österreich in Zusammenarbeit mit der TU Graz als Emissionsfaktoren des Jahres 1995 für Motorräder lediglich den dreifachen (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe) bzw. zweifachen (CO) Ausstoß pro Kilometer im Vergleich zu Pkw aus [95].

Weitgehende Einigkeit herrscht in den genannten Berechnungen über die Annahme, daß der NO<sub>x</sub>-Ausstoß von Motorrädern geringer ist als der von Pkw, was aufgrund der heute üblichen, vorwiegend im fetten Gemischbereich betriebenen Motorradmotoren nachvollziehbar erscheint. Hieraus leitet sich die Empfehlung ab, für Motorräder verstärkt Grenzwerte im Sinne einer deutlichen HC-Reduzierung, evtl. auf Kosten eines leichten Anstiegs beim NO<sub>x</sub> zu definieren, und die mit Blick auf den Gesamtverkehr erforderlichen NO<sub>x</sub>-Reduzierungen bei anderen Fahrzeugen auf kosteneffizientere Art zu erreichen [73].

Je nach Berechnungsverfahren werden in die Modelle noch Annahmen über Kaltstart- und Verdunstungsemissionen eingebracht, wobei auch hier nach derzeitigem Datenbestand noch Forschungsbedarf besteht.

Aufgrund der genannten Unsicherheiten und Abweichungen in der Ermittlungsmethodik für die bestehenden Rechenmodelle erscheint eine Absicherung der Zahlenwerte hinsichtlich hinreichend genauer Annahmen zu tatsächlichen Fahrleistungen und Emissionsfaktoren dringend erforderlich. Da die tatsächlich erzeugten Schadstoffe neben der eingesetzten Technik auch sehr stark von den jeweiligen Betriebsbedingungen abhängen,

gen, vgl. Kapitel 5.1 ab Seite 90, ist auch zur Erhöhung der Prognosesicherheit von Schadstoffberechnungsmodellen ein realitätsnaher und an den tatsächlichen Betriebsbedingungen orientierter Fahrzyklus von hoher Wichtigkeit.

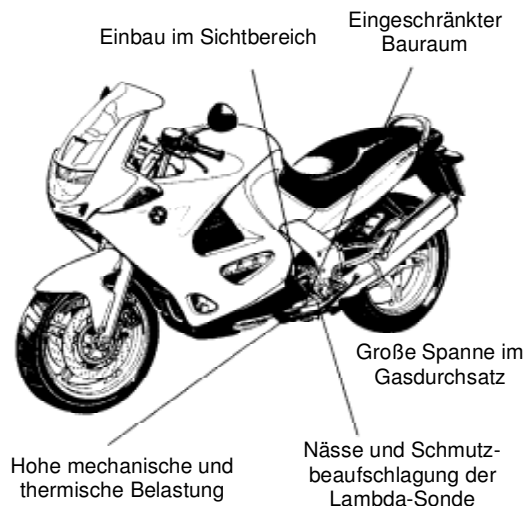
Die Entstehung der Schadstoffemissionen bei einer Fahrt im realen Verkehr ist trotz vielfältiger Erfahrungswerte noch nicht hinreichend beschrieben, was wegen der Vielzahl der sich überlagernden Einflüsse auch zukünftig schwerfallen wird. Als wesentliche Parameter für die Bildung der limitierten Schadstoffkomponenten (HC, NO<sub>x</sub>, CO) sind anzusehen [27]:

- Motor- und Brennraumgestaltung,
- Verdichtungsverhältnis,
- Ventilöffnungszeiten,
- Gemischbildungsgüte,
- Zündzeitpunkt,
- Luftverhältnis Lambda,
- Motor- und Umgebungstemperatur,
- Kraftstoffeigenschaften,
- Motordrehzahl und –last.

Maßnahmen zur Reduzierung von Schadstoffen können zum einen innermotorisch ansetzen und eine Verringerung der Rohemissionen bewirken. Alternativ können Einrichtungen zur nachträglichen Abgasreinigung eingesetzt werden, die auf einer chemischen Veränderung des Abgases basieren, was speziell beim Pkw aufgrund der heute üblichen strengen Grenzwerte unverzichtbar erscheint.

### *Rohemissionen reglementierter Schadstoffkomponenten*

Heutige Motorradmotoren arbeiten zumeist nach dem Viertakt-Ottoprinzip und verfügen in der Regel über 1 bis 4 Zylinder bei Hubräumen zwischen ca. 250 und 1500 cm<sup>3</sup>. Zweitakt-Motoren finden zum Teil noch bei Enduro- und Geländemotorrädern Anwendung, ihr Marktanteil im Bereich von überwiegend im Straßenverkehr eingesetzten Fahrzeugen ist in Deutschland allerdings vernachlässigbar. Der weltweit größte Zweiradhersteller hat bereits angekündigt, ab dem Jahr 2003 zumindest europaweit auch die heute üblichen Zweitakter für Mopeds und Roller durch Viertakter zu ersetzen [49]. Im Motorrad-Straßenrennsport werden derzeit ebenfalls Reglementsänderungen mit einem Wechsel zu Viertakt-Motoren diskutiert. Aktuell ist ein Fahrzeug eines italienischen Herstellers [59] mit direkteinspritzendem (DI) Zweitaktmotor auf dem Markt erhältlich. Aus diesem Prinzip ergeben sich wesentliche Vorteile im Abgasverhalten durch die deutliche Reduzierung der Spülverluste, die eventuell auch den 2-Takter aufgrund seiner hohen spezifischen Leistung als zukünftigen Motor wieder interessanter erscheinen lassen. Aufgrund der in Deutschland derzeit geringen Bedeutung beschränken sich die praktischen Untersuchungen in dieser Arbeit hingegen auf Motorräder mit Viertakt-Motoren.



**Bild 1.9:** Randbedingungen für den Katalysator am Motorrad [89]

Die Gemischaufbereitung bei Motorrädern erfolgt zumeist mit Gleichdruckvergasern unterschiedlicher Anordnung, wobei in den meisten Fällen jeder Zylinder von einem eigenen Vergaser bedient wird. Einspritzanlagen mit elektronischer Steuerung finden besonders im Bereich hochwertiger, großvolumiger Motorräder zunehmend Verbreitung, bilden zahlenmäßig aber noch immer die Minderheit.

Aus Gründen der Leistungsentfaltung, der Spitzenleistung und der Stabilisierung des Motorlaufs bei geringer Last und Drehzahl werden Motorradmotoren häufig im fetten Gemischbereich betrieben. Die Verdampfungsenergie des Kraftstoffs trägt dabei

wesentlich zur Innenkühlung speziell bei hohen Drehzahlen bei. Aus dieser Abstimmung resultieren aufgrund der unvollständigen Verbrennung vergleichsweise hohe HC- und CO-Rohemissionen.

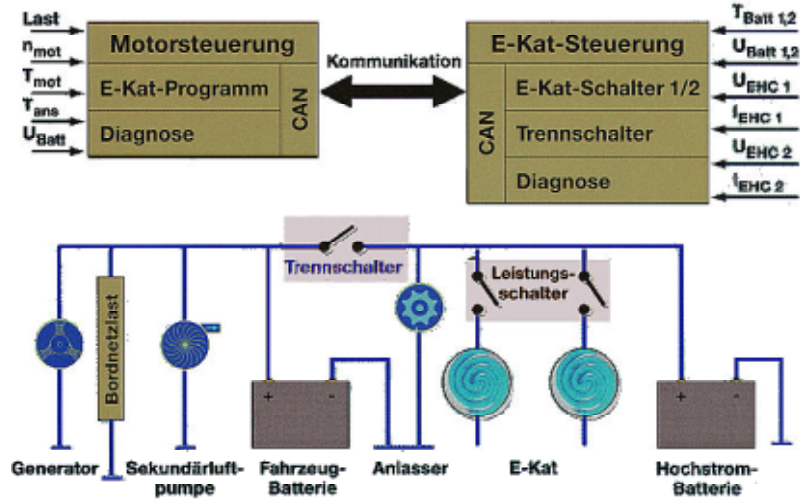
### Abgasreinigungssysteme

Abgasreinigungssysteme zur nachträglichen Konvertierung der schädlichen Emissionskomponenten werden von einigen Herstellern zwischenzeitlich vermehrt angeboten [75, 88], haben jedoch häufig keine zu Pkw vergleichbare Wirkung. Hierfür existieren, wie im folgenden erläutert wird, sowohl technische als auch marktwirtschaftliche Gründe, und letztlich beeinflusst auch die umweltpolitische Einstellung der Motorradhersteller und -fahrer die Auswahl der eingesetzten Technologie.

Angesichts des vergleichsweise geringen Marktpreises von Motorrädern sowie der im Vergleich zur Pkw-Produktion kleinen Stückzahlen bei Motorrädern schlagen besonders die Entwicklungskosten von Zusatzsystemen stark auf die Gesamtkosten pro Fahrzeug durch. Die Produktionszahlen von Großserienherstellern liegen in der Größenordnung von einigen 100.000 Einheiten pro Jahr, für Kleinhersteller hingegen betragen sie nur einige 1.000 bis 10.000 Einheiten. Im Vergleich zu Pkw-Herstellern unterscheiden sich diese Stückzahlen um eine Zehnerpotenz. Außerdem entsteht durch verschärfte Anforderungen an die Umweltverträglichkeit ein Marktvorteil für große Hersteller, weshalb z.B. in den USA über Ausnahmen von Kleinserienherstellern von kommenden Grenzwertverschärfungen diskutiert wird.

Häufig beschränken sich die Anbieter auf die technisch, gewichtsmäßig und unter Kostenaspekten günstige Lösung in Form eines Sekundärluftsystems, bei dem Frischluft in den Abgaskrümmen eingeblasen wird. Dies führt dazu, daß die besonders im fetten Betrieb in hoher Konzentration entstehenden CO- und HC-Emissionen durch eine Nachverbrennung in der Auspuffanlage oxidiert werden.

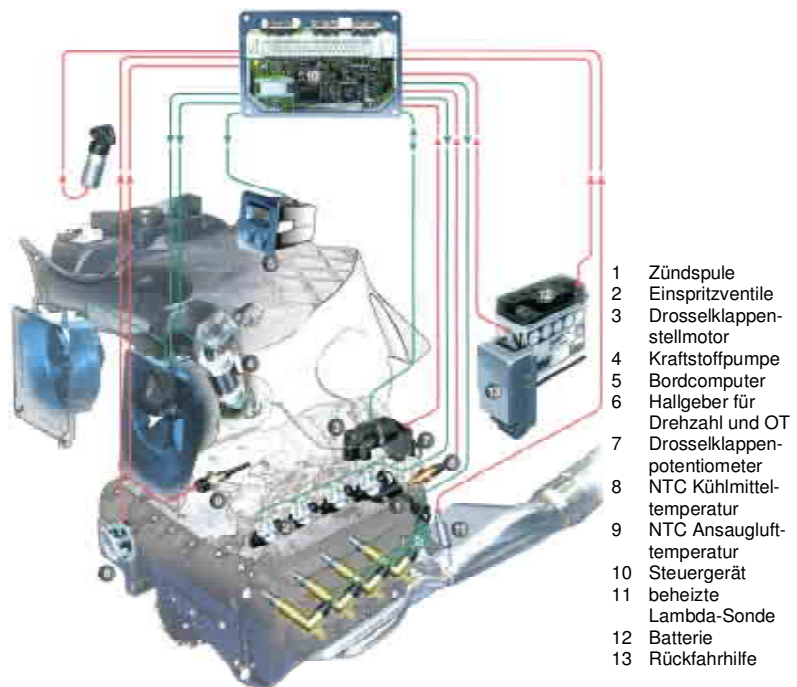
Daneben existieren ungeregelte Katalysatoren oder katalytische Beschichtungen der Abgassysteme, deren Wirksamkeit und Haltbarkeit nicht optimal ist. Die Konvertierungsraten dieser Systeme für die gesetzlich limitierten Schadstoffkomponenten liegen bei ca. 30 bis 70 % [75, 88], wobei der angewendete Fahrzyklus bzw. das Fahrprofil bei Fahrten im realen Verkehr einen großen Einfluß auf die Wirksamkeit und die Lebensdauer besitzt. Aufgrund des zumeist hohen Anteils an unverbrannten Kohlenwasserstoffen im Abgas kann es leicht zu einer thermischen Überlastung des Katalysators mit der Folge der Zerstörung kommen. Häufiger Grund für den Einsatz dieser Technik ist das Fehlen einer regelbaren Gemischaufbereitung, da die überwiegende Zahl der Motorräder mit Vergasersystemen unterschiedlicher Bauart ausgestattet wird.



**Bild 1.10:** Modernes Abgasreinigungskonzept für leistungsstarke Pkw [58]

Aus **Bild 1.9** ergeben sich die wesentlichen Einschränkungen und besonderen Anforderungen, denen ein Katalysator am Motorrad unterliegt. So existieren neben dem bereits oben erwähnten Kostendruck besonders bei unverkleideten Motorrädern häufig Styling-Anforderungen, die den Einsatz eines mit gutem Konvertierungsgrad arbeitenden, großen Katalysators verhindern [88]. Aufgrund der zumeist starren Verbindung der Abgasanlage mit dem Rahmen und der damit verbundenen Schwingungsbeaufschlagung sind nahezu ausschließlich Katalysatoren mit Metallträgern einsetzbar [75], die gegenüber Keramik-Ausführungen relativ stoßunempfindlich sind. Außerdem ermöglicht diese Bauform bei gleicher Größe und Zelldichte einen größeren Strömungsquerschnitt und eine größere geometrische Oberfläche.

Bild 1.10 und Bild 1.11 zeigen jeweils ein modernes Abgasreinigungskonzept am Pkw und am Motorrad und verdeutlichen den unterschiedlich hohen Aufwand.



**Bild 1.11:** Modernes Motorsteuerungs- und Abgasreinigungssystem an einem Motorrad [12]

Bei Pkw heutiger Technologie stammt der weitaus überwiegende Schadstoffanteil in den Meßzyklen aus der Kaltstartphase. So entstehen z.B. im FTP-75-Zyklus typischerweise ca. 70 % der gesamten HC-Emissionen in den ersten 100 Sekunden des insgesamt mehr als 30 Minuten dauernden Prüflaufs [68]. Daher erfolgt in der Entwicklung von Abgasreinigungssystemen für Pkw eine weitestgehende Konzentration auf die Verringerung der Emissionen nach dem Kaltstart. Dazu werden häufig Systeme mit Motorantrieb und daher schnell ansprechendem Vorkatalysator mit nachgeschaltetem Hauptkatalysator verwendet. Vielfach wird der Motor nach einem Kaltstart zunächst mit stark angefettetem Gemisch betrieben, was eine Nachverbrennung im Katalysator und damit eine Beschleunigung des Ansprechverhaltens (Katalysator-light-off) nach sich zieht. Die hierdurch entstehen Nachteile im Kraftstoffverbrauch werden dabei in Kauf genommen.

Zusätzlich werden moderne Pkw-Katalysatoren zur Beschleunigung des Light-off speziell bei leistungsstarken Fahrzeugen mit entsprechend niedrigen Lastkollektiven und daraus resultierend geringen Katalysatortemperaturen während der Startphase elektrisch beheizt, was ein Hochstrom-Bordnetz nebst eigener Batterie erfordert, **Bild 1.10** [58].

Diese Konzentration auf die Verringerung der Kaltstartemissionen unterstellt, daß die angewendeten Meßvorschriften das tatsächliche Fahrverhalten für die jeweiligen Fahrzeuge abbilden. Dies kann für Motorräder nicht ohne weitere Überprüfung angenommen werden, da sich die typischen Betriebsweisen von Motorrädern und Pkw deutlich unterscheiden.

Sofern bei Motorrädern Einspritzsysteme vorhanden sind, werden zwischenzeitlich von einigen Herstellern auch Lambda-geregelte Katalysatorsysteme angeboten, **Bild 1.11**. Die Motorsteuerung erfolgt in diesem Fall als Alpha-n-Steuerung mit den zentralen Eingangsgrößen Drosselklappenwinkel und Motordrehzahl zur Bestimmung der angesaugten Luftmenge. Dabei wird über die Ansaugluft- und die Kühlmitteltemperatur eine Feinabstimmung vorgenommen. Der Metall-Katalysator wird zumeist im Auspuffkrümmer angeordnet. Die Konvertierungsraten dieser Systeme sind je nach betrachteter Schadstoffkomponente und angewendetem Testzyklus mit ca. 60 bis 90 % [12, 88] nennenswert, entsprechen jedoch nicht denen am Pkw mit heutiger Technologie.

Die Konvertierungsrate eines Katalysators hängt neben der strömungstechnischen Gestaltung der Abgasanlage maßgeblich vom Grad des dynamischen Motorbetriebs ab, da die übliche Lambdaregelung prinzipbedingt ein Totzeitverhalten aufweist. Mit zunehmenden Abweichungen vom stationären Motorbetrieb sinkt daher die Umsatzrate des Katalysators aufgrund von Abweichungen vom stöchiometrischen Gemisch. Neben den genannten besonderen Anforderungen an Motorrad-Katalysatoren werden, wie im folgenden noch gezeigt wird, Motorräder dynamischer gefahren, d.h. mit größeren Zeitanteilen mit instationärem Motorbetrieb. Auch hieraus ergibt sich, sonst gleiche technische Gestaltung vorausgesetzt, eine geringere Wirksamkeit Lambda-geregelter Katalysator-konzepte an Motorrädern.

Bezüglich der Kosten ist, wie oben bereits erwähnt, zwischen den Entwicklungskosten und den reinen Stückkosten für die Ausrüstung des einzelnen Modells zu unterscheiden. [73] berichtet von Stückkosten in der Größenordnung von 30 - 60 \$ für einen unregelmäßig, 50 - 100 \$ für einen geregelten Katalysator. Speziell für Hersteller kleiner Serien sind die Entwicklungskosten, nach [73] 3 - 12 Mannjahre je nach erforderlichem

Aufwand, daher die zentrale Größe, was die relativ langsame Durchsetzung der Katalysatortechnik für Motorräder am Markt erklärt. Schätzungen in den USA gehen davon aus, daß durch zunehmenden Einsatz von Einspritzanlagen und Katalysatoren die durchschnittlichen Motorradpreise um ca. 200 – 300 \$ ansteigen könnten.

Sofern die gesetzlichen Anforderungen eine sorgfältige Abstimmung des Katalysatorsystems nicht erforderlich machen, ergibt sich das Problem, daß eine aufwendige Abstimmung unter Marktaspekten für den Endverbraucher keinen Mehrwert besitzt. Der Käufer orientiert sich bei seiner Kaufentscheidung dann allenfalls am Vorhandensein der technischen Ausstattung „geregelter Katalysator“, deren Wirksamkeit für ihn allerdings nicht nachvollziehbar ist und daher ohne weitere Differenzierungen unterstellt wird. Als Informationsquelle könnte daher verlangt werden, daß die Motorradhersteller die Typprüfwerte der Emissionsmessungen zu veröffentlichen haben, wie es für Pkw bereits üblich ist.

### *Nichtreglementierte Schadstoffe*

Neben den reglementierten Schadstoffen entstehen auch bei Motorrädern weitere Schadstoffkomponenten, von denen negative Umweltwirkungen bekannt sind oder vermutet werden. Hierzu liegen derzeit sehr wenig Forschungsergebnisse vor. In [43] werden aus einer Untersuchung von zwei leistungsstarken Viertakt-Motorrädern Benzolmissionen zwischen 110 und 220 mg/km im ECE-R-40-Fahrzyklus genannt, was in etwa dem Verhalten damaliger Pkw entsprach, deren Emissionsfaktor für das Jahr 1985 bei 143 mg/km lag.

Zur Beurteilung des Ozonbildungspotentials besitzen die einzelnen Schadstoffkomponenten unterschiedliche Bedeutung [2]. Im städtischen Verkehr haben die Kohlenwasserstoffemissionen aufgrund ihres photochemischen Ozonbildungspotentials entscheidendes Gewicht, da diese im häufigen Stop-and-Go-Betrieb in hohen Konzentrationen entstehen. Außerorts tragen hingegen eher die, bei heutigen Motorrädern geringen, NO<sub>x</sub>-Emissionen zur Bildung bodennahen Ozons bei.

Nach §§ 40a – 40e BImSchG können Verkehrsbeschränkungen und Fahrverbote bei erhöhten Ozonkonzentrationen verhängt werden. Fahrzeuge mit geringem Schadstoffausstoß können von den Verkehrsverboten im Einzelfall ausgenommen werden. Zur Definition schadstoffarmer Fahrzeuge, die in Deutschland den Ländern obliegt, besteht eine EntschlieÙung des Bundesrates von 1995. Diese setzt für schadstoffarme Motorräder das Unterschreiten bestimmter Schadstoffausstöße voraus, wurde jedoch nicht von allen Ländern umgesetzt. Demzufolge existieren derzeit unterschiedliche Länderregelungen, die z.T. allein das Vorhandensein eines geregelten Katalysators als Kriterium für die Erteilung der Ausnahmegenehmigung berücksichtigen [21], während in einigen Ländern die Einhaltung der Grenzwerte gemäß Euro 1 für Motorräder oder sogar deutlich schärferer Grenzwerte verlangt wird. Aufgrund der gebietsübergreifenden Problematik ist eine einheitliche Definition eines schadstoffarmen Motorrads auf europäischer Ebene überfällig.

Der Fahrer hat direkt über die Größen Motordrehzahl und Motorlast (Drosselklappenöffnung) Einfluß auf den Betriebszustand und damit die resultierenden Schadstoffemissionen. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß indirekt von der Fahrweise auch

andere relevante Parameter (z.B. Motortemperatur, Luftverhältnis) abhängen, so daß allgemeingültige Maßgaben für eine möglichst schadstoffarme Fahrweise kaum gegeben werden können. Grundsätzlich kann aber davon ausgegangen werden, daß zunehmende Dynamik, d.h. zunehmende Instationäranteile des Betriebs, auch zunehmende Schadstoffemissionen zur Folge haben. Bei geringer Dynamik besitzt die Summe der auf die Fahrstrecke bezogenen Emissionen bei mittlerer Motorlast ein Minimum und steigt im allgemeinen sowohl für sehr geringe als auch für hohe Lasten an.

Von [63] wurde der Einfluß der Fahrweise auf die Abgasemissionen eines Pkw ermittelt, indem im realen Verkehr gemessene Geschwindigkeitsprofile eines langsamen und eines „sportlichen“ Fahrers auf einem Abgasprüfstand nachgefahren wurden. Die mittleren Fahrgeschwindigkeiten der Fahrer betragen 50 bzw. 59 km/h, wodurch sich beim sportlichen Fahrer der Streckenkraftstoffverbrauch um 26 % erhöhte. Durch die schnellere Fahrweise verdoppelten sich die streckenbezogenen CO-Emissionen, die NO<sub>x</sub>-Werte stiegen in etwa um den Faktor Drei. Lediglich die HC-Emissionen verringerten sich, bedingt durch eine veränderte Warmlaufphase des Motors, um ca. 30 % bei der schnellen Fahrt, wobei sich im warmen Zustand des Motors kein Einfluß der Fahrweise auf diese Schadstoffkomponente bemerkbar machte.

#### 1.4.2 Lärmemissionen – Stand der Technik

Die grundsätzlichen Einflüsse auf das Fahrgeräusch lassen sich in überwiegend von der Motordrehzahl, der Motorlast oder der Fahrgeschwindigkeit abhängige Parameter trennen. Als Teilschallquellen treten der Verbrennungsmotor mit seinen Hilfsaggregaten, die Kraftübertragung einschließlich des Reifen/Fahrbahn-Kontakts sowie Strömungsgeräusche an Fahrzeug, Fahrer und Gepäck auf.

Grundsätzlich unterscheiden sich die konstruktiven Gegebenheiten am Motorrad von denen anderer Fahrzeugkategorien. So ist der Motor häufig nicht nur Antriebs-, sondern auch charakteristisches Design-Element des Fahrzeugs. Eine Kapselung von Motor und Antrieb ist daher nicht nur technisch aufwendig, sondern hinsichtlich des Motorradkonzepts oft auch nicht erwünscht. Daneben erfolgt aus Bauraum- und Massegründen eine höhertourige Auslegung der Motorradmotoren mit dem Ziel, die wirkende Kräfte und Drehmomente klein zu halten.

Teilschallquellenanalysen an Motorrädern unterschiedlicher Baujahre zeigen eine besondere Problematik des Motorrads. Waren in früheren Jahren überwiegend die Ansaug- und Auspuffgeräusche für das vom Motor dominierte Gesamtgeräusch des Fahrzeugs ausschlaggebend, so treten mit zunehmender Dämpfung dieser Teilschallquellen andere Verursacher wie Sekundärantrieb (Kette) und Reifen ebenfalls in den Vordergrund [48]. Hieraus resultiert ein indifferentes, vom Motorradkunden u.U. nicht als angenehm und charaktervoll empfundenen Geräusch moderner Fahrzeuge.

Bereits 1984 wurde in einem Projekt des Umweltbundesamtes in einer Zusammenarbeit zwischen Porsche und BMW gezeigt, daß ein damaliges Motorrad (BMW R 65, Geräuschgrenzwert 85 dB(A)) durch ein motorakustisches Maßnahmenpaket sowie Modifikationen an Ansaug- und Abgasanlage auf einen Grenzwert von 77,5 dB(A) gebracht werden konnte [82, 48]. Motorisch wurden dabei neben einer Hubraumerhöhung von 650 auf 800 cm<sup>3</sup> verschiedene akustische Entkoppelungen (Ventil- und Gehäusede-

ckel), ein Zahnriemenantrieb der Nockenwelle und verschiedene Versteifungsmaßnahmen sowie veränderte Materialkombinationen installiert. Das äußere Erscheinungsbild sowie die Fahreigenschaften blieben durch die Modifikationen weitgehend unverändert.

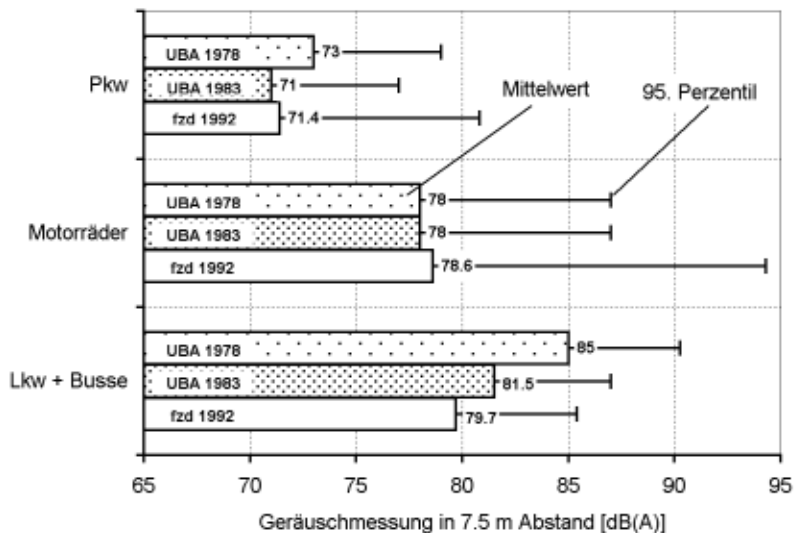
Generell wird das Fahrgeräusch von Motorrädern aufgrund des dominierenden Anteils vergleichsweise hoher Frequenzen sowie wegen der schnellen Änderungen des Pegels und der Frequenzzusammensetzung bei starkem Beschleunigen von Außenstehenden als besonders aggressiv und störend empfunden. Fährt ein stark beschleunigendes Motorrad auf einen stehenden Beobachter zu, so ist dieser verschiedenen Effekten ausgesetzt, die zusammen mit seinen Erfahrungen und seiner Erwartungshaltung das subjektiv empfundene Geräusch bestimmen. Zum ersten erhöht sich mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit sowie Motordrehzahl und –last die abgestrahlte Schallenergie und damit der Schalldruckpegel. Zum zweiten entsteht eine vergleichsweise schnelle Frequenzverschiebung des Geräuschs hin zu höheren Frequenzen, und zum dritten verringert sich der Abstand zwischen Beobachter und Motorrad mit zunehmender Geschwindigkeit, was dem empfundenen Geräusch eine weitere dynamische Komponente verleiht.

Bezüglich der subjektiven Wahrnehmung von Motorradgeräuschen besteht ein deutlicher Konflikt zwischen der Betrachtungsweise des Fahrers, für den ein vernehmbares, „angenehm“ gestaltetes Geräusch integraler Bestandteil der Fahrfreude mit dem Motorrad ist, und dem Anwohner, der u.U. während der Motorrad-„Saison“ stark unter hohem Motorradaufkommen leidet.

Im Gegensatz zum Pkw bietet sich am Motorrad kaum die Möglichkeit, das vom Fahrer empfundene (Innen-) Geräusch von den Geräuschemissionen nach außen (Vorbeifahrgeräusch) zu trennen und gemäß neuerer Erkenntnisse im Rahmen eines Sound-Engineering ansprechend zu gestalten. Dennoch sollten auch am Motorrad zukünftig Entwicklungen in dieser Richtung angestrebt werden, wobei möglicherweise eine integrierte Betrachtung von Motorrad und Schutzhelm Gestaltungsspielräume für ein angenehmes, aber dennoch nach außen hin leises Motorradgeräusch eröffnet.

Problematisch ist hier allerdings das hohe Niveau der Strömungsgeräusche im Inneren der Helme, das den vorhandenen Spielraum zur Geräuschgestaltung stark begrenzt. So liegt der Geräuschpegel innerhalb eines üblichen Motorradhelms bei mittlerem Autobahntempo in der Größenordnung von 100 dB(A), d.h. um ca. 30 dB über dem Innengeräuschpegel heutiger Pkw [47, 26]. Das momentane Ziel der Helmentwicklung besteht daher eher in einer Absenkung des Gesamtpegels als in einer gezielten Gestaltung des Geräuschbildes.

Bereits 1984 wurde in [82] darauf hingewiesen, daß die an neuen Motorrädern aufgrund verschärfter gesetzlicher Anforderungen vorgenommenen Verbesserungen im realen Verkehrsgeschehen kaum bemerkbar sind, wie der Vergleich der Jahre 1978 und 1983 zeigt, **Bild 1.12**. Begleitende Befragungen zum subjektiven Lärmempfinden in der Bevölkerung ergaben sogar die höchsten Belästigungswerte für Motorräder im Vergleich zu anderen Fahrzeugkategorien trotz geringem Gesamtbestand und niedrigen jährlichen Fahrleistungen.



**Bild 1.12:** Geräuschemission von Kraftfahrzeugen im realen Verkehrsgeschehen in den Jahren 1978 und 1983 (UBA) im Vergleich zu fzd-Ergebnissen 1992, Meßabstand 7,5 m, Angaben nach [82, 112]

In neueren Untersuchungen von fzd [112] wurden 1992 im Auftrag des Landrates des Odenwaldkreises Geräuschmessungen an ausgewählten Motorradstrecken vorgenommen. Auch wenn die Versuche hinsichtlich Meßort, Versuchsaufbau und Zahl der gemessenen Fahrzeuge nicht unmittelbar mit den früheren Messungen im Auftrag des Umweltbundesamtes vergleichbar sind, stützen die Ergebnisse die Aussage, daß verschärfte Geräuschgrenzwerte für Motorräder im realen Ver-

kehrsgeschehen derzeit kaum Auswirkungen zeigen. Der mittlere Schalldruckpegel von Motorrädern, gemessen am Straßenrand mit ca. 7,5 m Abstand zur Fahrbahnmitte, lag bei den fzd-Messungen mit 78,6 dB(A) auf ähnlichem Niveau der früheren Messungen und damit nur knapp unter dem Pegel von Lkw und Bussen (79,7 dB(A)) und deutlich über demjenigen von Pkw (71,4 dB(A)).

Auffällig war in diesen Versuchen vor allem eine sehr große Streuung unter den Motorrädern, die häufig durch modifizierte Abgasanlagen extrem hohe Pegel verursachten, was im genannten Mittelwert nicht zum Ausdruck kommt. Für eine wirkungsvolle Verringerung der Lärmemissionen ist daher nicht nur eine Anpassung der Meßverfahren und Grenzwerte für die Typprüfung neuer Fahrzeuge erforderlich, sondern darüber hinaus eine wirkungsvollere Überwachung von im Verkehr befindlichen Fahrzeugen.

Aus den geschilderten Problemen ergibt sich als letzter Ausweg häufig die Forderung, bestimmte Streckenbereiche komplett oder zumindest an Wochenenden und Feiertagen für den Motorradverkehr zu sperren, was nach § 45 der StVO unter Abwägung der beteiligten Interessen erfolgen kann. Derzeit sind in Deutschland bereits mehr als 30 fahrerisch und landschaftlich besonders reizvolle Straßen sowie verschiedene Innenstadtbereiche zumindest zeitweise für den Verkehr mit Motorrädern gesperrt [22], wofür neben der Lärmproblematik häufig auch Sicherheitsaspekte zur Begründung herangezogen werden. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme ist allerdings auf die unmittelbare Umgebung der gesperrten Strecke beschränkt, da eine Verkehrsvermeidung hierdurch unwahrscheinlich ist. Vielmehr wird sich der Motorradverkehr auf andere Strecken verlagern, was im Einzelfall sogar zu einer Verlängerung von Fahrtstrecken beitragen kann. Zudem ist die Einrichtung von Sperrungen gesetzlich an die vorherige Untersuchung des Einsatzes milderer Maßnahmen, wie z.B. Geschwindigkeitslimits, gekoppelt.

Für Mofas und Mopeds existiert seit 1996 die Möglichkeit, bei Erfüllung bestimmter Anforderungen als Nachweis der Umweltverträglichkeit einen „Blauen Umwelt-Engel“ zu beantragen. Hierzu werden u.a. Geräuschemissionen von maximal 63 dB(A), Schadstoffemissionen unterhalb 1 g/km CO und 1,2 g/km HC+NO<sub>x</sub> sowie eine Manipulationsicherheit geräuschrelevanter Bauteile gefordert. Ähnlich könnte auch eine Definition eines „umweltverträglichen“ Motorrads geschaffen werden, das unabhängig von kommenden gesetzlichen Regelungen u.a. verschärfte Anforderungen an das Fahrgeräusch erfüllen müßte. Hierzu könnte als erster Ansatz eine Geräuschemission ähnlich Pkw gefordert werden, wobei für diese Fahrzeuge dann entsprechende Erleichterungen gegenüber üblichen Motorrädern geschaffen werden müßten. Könnten entsprechend geräuschreduzierte Motorräder z.B. von den aus Geräuschgründen bestehenden Streckensperrungen ausgenommen werden, so würde sich hieraus ein für einige Motorradfahrer gewichtiges Kaufargument ergeben.

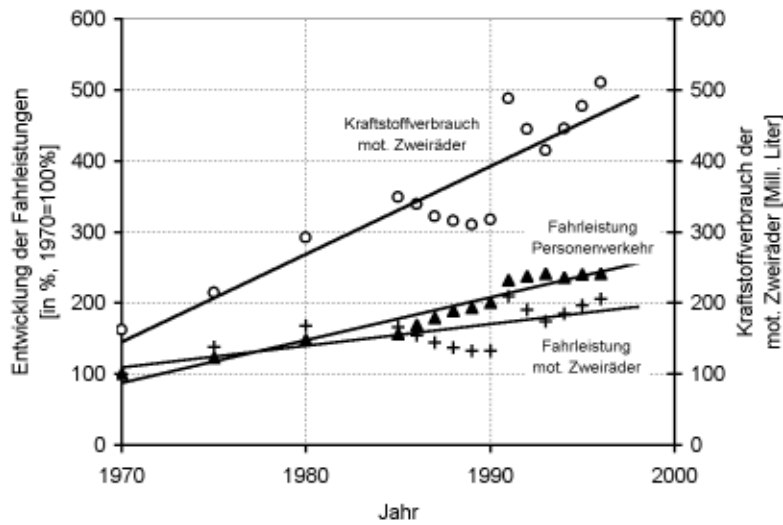
### 1.4.3 Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch eines Kraftfahrzeugs auf einer gegebenen Strecke hängt neben den technischen Randbedingungen des Fahrzeugs (Motorbauform, Hubraum, Drehzahlniveau, Gemischbildung) überwiegend von der dem Motor abgeforderten Antriebsarbeit ab, wobei höhere mechanische Belastungen zunächst auch höhere Streckenkraftstoffverbräuche erwarten lassen. Gegenläufige Tendenzen können durch Verbesserungen des Gesamtwirkungsgrades des Otto-Motors mit zunehmender Belastung sowie durch eine günstige Wahl der Betriebspunkte hinsichtlich Drehzahl und Last durch die Schaltstrategie des Fahrers oder eines Getriebeautomaten entstehen.

Otto-Motoren besitzen bei Betrieb in der unteren Teillast einen stark abfallenden Nutzwirkungsgrad. Dies ist zum einen durch die Drosselung der Ansaugluft, zum anderen durch das mit abnehmender Nutzarbeit kleiner werdende Verhältnis von Nutz- zu Reibungsarbeit begründet. Bei leistungsstarken Motoren, wie sie in Motorrädern eingesetzt werden, ist daher mit einem starken Abfall des motorischen Gesamtwirkungsgrads bei abnehmender umgesetzter Fahrleistung (zunehmender Teillastbetrieb) zu rechnen.

Untersuchungen zum verbrauchsrelevanten Fahrerverhalten und zu typischen Betriebsituationen liegen vielfach für Pkw vor, wobei sich die Untersuchungen überwiegend auf den Stadtverkehr konzentrieren [9, 39, 34]. Im Stadtverkehr besitzt die Fahrweise des Pkw-Fahrers einen bedeutend größeren Einfluß als bei Überlandfahrten, bei denen der Kraftstoffverbrauch überwiegend von der Fahrgeschwindigkeit abhängt [34], die von Streckenverlauf, Verkehrsdichte und Leistungspotential des Fahrzeugs weitgehend vorgegeben werden.

Im Vergleich zu Pkw stellt beim (leistungsstarken) Motorrad aufgrund des zumeist erheblich geringeren Leistungsgewichts das Leistungspotential des Fahrzeugs beim Betrieb im öffentlichen Verkehr nur selten die Begrenzung für die erzielbare Fahrleistung dar. Vielmehr sind bestehende Tempolimits, übrige Verkehrsteilnehmer oder auch die Kurvigkeit der Streckenführung von Bedeutung für die Wahl der Fahrgeschwindigkeit des Motorradfahrers. Je nach Fahrerfahrung, Fahrstreckenwahl sowie persönlicher Einstellung zu Fahrzeug und Straßenverkehrsordnung sind daher beim Motorrad im Ver-



**Bild 1.13:** Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs motorisierter Zweiräder und der Fahrleistung in Deutschland, Zahlenwerte nach [23]

gleich zu anderen Verkehrsmitteln tendenziell größere Einflüsse des Fahrers auf die umgesetzten Fahrleistungen und damit den Kraftstoffverbrauch zu vermuten.

Näherungsweise läßt sich die Entwicklung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs von Motorrädern aus den verfügbaren Daten zum Gesamtverbrauch der motorisierten Zweiräder in Deutschland [23] abschätzen, auch wenn diese Angaben vielfachen Schätzungen und Unsicherheiten unterliegen.

Im Vergleich zum Gesamtverbrauch des Personenverkehrs in Deutschland lag der Verbrauchsanteil der Motorräder im Jahr 1970 bei ca. 0,9 %. Die zeitliche Entwicklung zeigt jedoch eine steigende Tendenz sowohl des absoluten Verbrauchs der Zweiräder als auch des Verbrauchsanteils der Zweiräder in Relation zum gesamten Personenverkehr, so daß 1996 ein Anteil von 1,8 % des Gesamtverbrauchs des deutschen Personenverkehrs auf Krafträder entfiel.

Die Verkehrsleistung des gesamten Personenverkehrs stieg seit 1970 um ca. 150 %, diejenige der motorisierten Zweiräder hingegen „nur“ um 100 %, **Bild 1.13**. Der Gesamtverbrauch der Motorräder erhöhte sich im gleichen Zeitraum überproportional zur Fahrleistung dieser Fahrzeuge von ca. 150 Mill. Liter pro Jahr auf annähernd 500 Mill. Liter und ist daher nur zum Teil durch die steigenden Gesamtfahrleistungen erklärt. Zusätzlich tritt auch eine tendenzielle Erhöhung des Verbrauchs am Einzelfahrzeug auf. Die mit Verbesserung der Technik im Zweiradbereich erzielten Wirkungsgradsteigerungen wurden in der Vergangenheit also ausschließlich in Steigerungen der Motorleistung investiert.

Für den Pkw-Bereich sieht eine Selbstverpflichtung der Hersteller vor, den Kraftstoffverbrauch und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2005 gegenüber 1990 um 25 % zu senken. Die europäischen Umweltminister haben daraus 1996 die Forderung abgeleitet, die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Fahrzeug bis spätestens 2010 auf 120 g/km zu senken [20], was einem Verbrauch von 5,2 l/100 km für Otto- bzw. 4,5 l/100 km für Diesel-Fahrzeuge entspricht. Entsprechende Zusicherungen bzw. Forderungen bestehen für die Motorradhersteller nicht. Vergleicht man die aktuellen Verbrauchswerte von Pkw und Motorrädern, so sollte aus heutiger Sicht eine Reduzierung der Verbrauchswerte um 30 % bis 50 % (entsprechend einer Forderung der Projektgruppe Motorrad und Umwelt [21]) in absehbarer Zeit angestrebt werden. Eine Forderung nach Senkung des Kraftstoffverbrauchs stellt eine Wirkvorschrift dar, deren Er-

reichen die eingesetzte Technologie offenläßt. Eine solche Vorgabe erscheint sinnvoller als weitergehende Forderungen nach zahlenmäßig festgelegten Begrenzungen von Fahrleistungen oder Verkehrsverboten [21, 85], wie sie die Projektgruppe ebenfalls vorschlägt, da das Entwicklungsziel hoher Fahrleistungen hierdurch grundsätzlich nicht beeinträchtigt würde.

#### **1.4.4 Ressourcenverbrauch und weitere Aspekte**

Eine Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Motorrädern im direkten Vergleich zu anderen Fahrzeugkategorien, insbesondere Pkw, muß neben der Diskussion der gesetzlich behandelten Problematik von Geräusch- und Abgasemissionen auch die übrigen umweltrelevanten Aspekte während des gesamten Produktlebenszyklus von der Erzeugung der benötigten Rohstoffe über den Energieeinsatz zur Produktherstellung, die während des Betriebs erforderlichen Materialien und Betriebsstoffe sowie die nach Ablauf der Nutzung hinsichtlich der Wiederverwertung oder Entsorgung erforderlichen Maßnahmen beinhalten. Im Bereich von Verkehrsmitteln ist darüber hinaus der im Betrieb entstehende Bedarf an Verkehrsfläche in Ländern mit stark wachsender Verkehrsdichte von erheblichem Einfluß auf die Gesamtbilanz.

Beim Motorrad trägt vor allem der im Vergleich zu Pkw deutlich geringere Rohstoff- und Energieverbrauch für die Fahrzeugherstellung zur Verbesserung der Umweltbilanz bei. Auch die Recyclingquoten von Motorrädern und Motorradteilen sind erheblich höher als bei Pkw. Vielfach werden Gebrauchtteile auf privater Basis wiederverwertet. Daher wird derzeit die Möglichkeit einer Ausnahme für Motorräder von der europäischen Verwertungs-Direktive 70/156/EWG für Altfahrzeuge vorgesehen, die zur endgültigen Stilllegung von Kraftfahrzeugen zwingend einen Verwertungsnachweis von einem autorisierten Fachbetrieb verlangt.

Der Flächenbedarf von fahrendem und stehendem Verkehr ist bei der Nutzung von Zweirädern erheblich geringer als bei Pkw. Dem kann in Grenzen durch eine Verkehrsplanung mit Erleichterungen für motorisierte Zweiräder in Städten, wie in einigen europäischen Ländern bereits üblich, Rechnung getragen werden.

Zusammenfassend zeigen sich in diesen Betrachtungen Potentiale, die den verstärkten Einsatz motorisierter Zweiräder unter Umwelt- und Mobilitätsaspekten interessant erscheinen lassen, sofern durch deren jeweiligen Einsatz eine Substitution anderer Verkehrsmittel erreicht werden kann.

## **1.5 Fazit aus Kapitel 1**

In den vergangenen drei Jahrzehnten war das Motorrad als Verkehrsmittel einem starken Wandel seiner Einsatzbedingungen, Sicherheitsaspekte und daraus folgend auch gesellschaftlichen Anerkennung unterworfen. Unter zunehmender Optimierung der Fahrleistungspotentiale und Steigerungen der Freizeitmobilität weiter Teile der Bevölkerung stiegen europaweit die Zulassungszahlen und Verkehrsleistungen leistungsstarker Motorräder deutlich an. Der Motorradmarkt in Deutschland hat dabei zwischenzeitlich im europäischen Vergleich das höchste Volumen erreicht und nimmt weltweit hinter den USA den zweiten Platz ein.

Insbesondere in heutigen Schwellenländern besteht daneben ein erheblicher und stark wachsender Bedarf nach preiswerten Verkehrsmitteln, der bereits zu einem hohen Aufkommen motorisierter Zweiräder geführt hat. Da diese Fahrzeuge weitestgehend mit Zweitaktmotoren einfachster Technologie ausgestattet sind, bestehen schon heute gravierende Umweltbelastungen aus dem motorisierten Zweiradverkehr. Werden in diesen Ländern ähnliche Motorisierungsgrade wie in heutigen Industrienationen erwartet, so sind besonders für die überwiegend als Transportmittel gestalteten kleinvolumigen Krafträder hohe Anforderungen an die eingesetzten Technologien zur Verringerung der Umweltschädlichkeit zu stellen, um die lokal und global entstehenden Folgen der Schadstoffausbreitung in erträglichen Grenzen zu halten.

Auch wenn im direkten Vergleich zu Pkw neben Kostenbetrachtungen auch viele Umweltaspekte, hauptsächlich der erheblich geringere Ressourcenverbrauch für Herstellung und Betrieb, für einen vermehrten Einsatz motorisierter Zweiräder sprechen, zeigt sich insbesondere hinsichtlich der heute eingesetzten Technologien zur Reduzierung von Abgas- und Geräuschemissionen ein Handlungsbedarf auf Seiten der Motorräder.

Aufgrund der derzeit mäßigen gesetzlichen Anforderungen an das Emissionsverhalten besitzt die überwiegende Zahl der aktuellen Motorräder kein oder allenfalls ein im Vergleich zur Pkw-Technologie mit geringerer Effektivität ausgestattetes Abgasreinigungssystem. Die Höhe der Kraftstoffverbräuche heutiger Motorräder läßt sich im Vergleich zu verbreiteten Pkw nur zum Teil durch die höheren umgesetzten Fahrleistungen begründen, sondern geht auch auf vorhandene Potentiale zurück, die im realen Verkehr nur selten ausgeschöpft werden können.

Die überwiegende Motivation zur Nutzung großvolumiger Motorräder besteht in der Durchführung von Freizeitaktivitäten, wobei häufig das Fahren an sich den zentralen Aspekt darstellt. Gerade aufgrund dieser Erkenntnis sollten die bestehenden Anforderungen an die Umweltverträglichkeit von Motorrädern überdacht und den geänderten gesellschaftlichen Positionen und Maßstäben hinsichtlich des Umweltgedankens angeglichen werden.

## 2 Ziele und Abgrenzung der vorliegenden Arbeit

Einleitend wurden der aktuell bestehende Fahrzeugbestand von Motorrädern und dessen Verkehrsleistungen im Vergleich zu Personenkraftwagen gezeigt, um die Bedeutung des Motorrads unter Verkehrs- und Umweltaspekten zu verdeutlichen.

Danach sollen die derzeit für Motorräder international bestehenden gesetzlichen Anforderungen und bekannten Vorschläge zu deren Verbesserung kurz dargestellt und in ihren Auswirkungen auf die Fahrzeuggestaltung diskutiert werden.

Daran anschließend werden anhand der Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen im realen Straßenverkehr mit verschiedenen Fahrzeugen und „Normalfahrern“ die typischen Einsatzbedingungen von Motorrädern verschiedener Leistungsklassen gezeigt.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden dann im Vergleich zu den bisher vorhandenen Vorschriften Vorschläge abgeleitet, die eine Grundlage für die Weiterentwicklung von Meß- und Prüfmethoden für Motorräder mit dem Ziel größerer Praxisnähe bilden können. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einem realistischen Fahrzyklus für Abgas- und Verbrauchsbestimmungen sowie auf Empfehlungen für die zukünftige Geräuschmessung an Motorrädern.

Außerdem werden Hinweise gegeben, wie die Gestaltung zukünftiger Fahrzeuge unter größerer Berücksichtigung der tatsächlichen Fahrpraxis erfolgen kann. Am Ende der Arbeit stehen Überlegungen zur Definition eines umweltfreundlicheren Zweiradkonzepts, das einen Beitrag zur Senkung des Ressourcenverbrauchs sowie der Schadstoff- und Geräuschemissionen bei gleichzeitiger Verringerung des Platzbedarfes im fahrenden und ruhenden Verkehr leisten könnte.

Aufgrund der Vielzahl der Gestaltungsmerkmale und Eigenschaften motorisierter Zweiräder konzentriert sich die Arbeit auf die typischen Betriebsgewohnheiten bei vergleichsweise großvolumigen und leistungsstarken Motorrädern. Hierin nicht enthalten sind die überwiegend als Stadtfahrzeuge konzipierten und verwendeten Mopeds, Motorroller und Leichtkrafträder, für die üblicherweise grundlegend andere Betriebsbedingungen gelten. Die dargestellten Methoden können in folgenden Arbeiten auf diese Fahrzeuge übertragen werden, um auch hierfür praxisnähere und realistischere Prüfbedingungen abzuleiten.

### 3 Aktuelle Meß- und Prüfbedingungen

Im folgenden werden die derzeit gültigen Vorschriften zur Begrenzung der Schadstoff- und Geräuschemissionen für verschiedene Fahrzeugkategorien dargestellt. Ihre Auswirkungen auf die Fahrzeuggestaltung und –auslegung seitens der Hersteller werden diskutiert. Zusätzlich wird auf bereits in der Diskussion befindliche Vorschläge für Verbesserungen der Meßverfahren eingegangen. Hieraus ergeben sich unter Berücksichtigung der oben ausgeführten technischen Eigenheiten der Motorräder die Anforderungen an motorradspezifische Verfahren, die wesentlicher Gegenstand dieser Arbeit sind.

#### 3.1 Abgasvorschriften

Die Bestimmung der Abgasemissionen und des Kraftstoffverbrauchs geschieht auf Rollenprüfständen mit Analyseeinrichtungen für die Abgaszusammensetzung. Die Handlungen des Fahrers sollen dabei in allen angewendeten Meßverfahren eliminiert werden, indem ein Fahrprofil (Fahrzyklus) vorgegeben wird, nach dem die Prüfung erfolgt. Dabei wird dem Fahrer auf einem Leitreechner die aktuelle Geschwindigkeit im Vergleich zu einem momentanen Sollwertfenster, i.a. Sollgeschwindigkeit  $\pm 1$  km/h, angezeigt. Verläßt der Fahrer das Sollwertfenster für mehr als eine definierte Zeitspanne von wenigen Sekunden, so ist die Messung abzubrechen. Dennoch ergeben sich durch diese Art der Durchführung aufgrund des unvermeidlichen Fahrereinflusses je nach Schadstoffkomponente Streuungen in der Größenordnung von  $\pm 10\%$  [64]. Bei Pkw werden daher vermehrt Fahrautomaten zur Bedienung von Pedalerie und Getriebe verwendet, wobei besonders die Abbildung des Schaltverhaltens des menschlichen Fahrers noch Probleme bereitet. Für Motorräder stellt die Verwendung solcher Fahrautomaten derzeit noch eine Ausnahme dar.

Wegen des großen Einflusses, den die Betriebsweise sowohl auf den Kraftstoffverbrauch als auch auf die Emissionen ausübt, ist eine realistische Abbildung des typischen Fahrerverhaltens durch den Zyklus dabei von großer Bedeutung. Weltweit existiert für die verschiedenen Fahrzeugkategorien eine Vielzahl von gesetzlichen Fahrzyklen sowie Vorschlägen für deren Veränderung, die z.B. in [27] umfassend dargestellt sind.

Neben diesen Vorschriften zur Bestimmung der Abgasemissionen während der Fahrt existieren Regelungen für die Messung von CO und in einigen Ländern auch HC im Motorleerlauf bei Fahrzeugstillstand sowie für die Feldüberwachung von im Verkehr befindlichen Fahrzeugen im Rahmen regelmäßiger Abgasuntersuchungen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit konzentrieren sich die folgenden Darstellungen auf die für Motorräder geltenden Regulierungen in den unter Marktaspekten bedeutsamsten Regionen Europa, USA und Japan. Soweit unter Vergleichsaspekten sinnvoll, werden daneben die jeweils für Pkw gültigen Bestimmungen erwähnt.

Die für Europa relevanten Fahrzyklen, die ursprünglich auf Fahrversuche mit Pkw im Stadtverkehr zurückgehen, zeigt **Bild 3.1**, die zugehörigen Grenzwerte sind in **Tabelle 3.1** dargestellt [7, 8, 57, 73, 74, 91, 98]. In Japan werden Motorräder nach einem Fahrzyklus mit zum EDC vergleichbarem Geschwindigkeitsverlauf geprüft. Die Messung an

**Tabelle 3.1:** Für Motorräder und Pkw gültige bzw. vorgeschlagene Meßverfahren und Grenzwerte

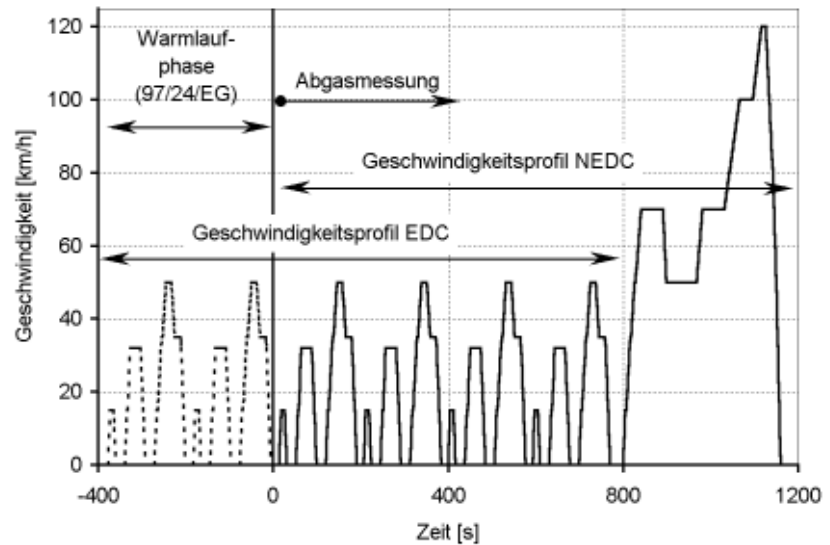
	Regelung	Fahrzyklus	CO [g/km]	HC [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	gültig ab Modelljahr
<b>Motorräder</b>						
EU	97/24/EG Euro I	EDC	4-Takt 13 2-Takt 8	4-Takt 3 2-Takt 5	4-Takt 0,3 2-Takt 0,1	1999
EU	MVEG- Vorschlag D	NEDC	3	1	0,3	2003
EU	MVEG- Vorschlag D	NEDC	2	0,3	0,15	2009
USA	Calif. law	FTP-75	12	< 700 cm <sup>3</sup> 1,0 ≥ 700 cm <sup>3</sup> 1,4	nicht regle- mentiert	1988
USA	Vorschlag CARB	FTP-75	12	1,4 (HC+NO <sub>x</sub> )		2004
USA	Vorschlag CARB	FTP-75	12	0,8 (HC+NO <sub>x</sub> )		2008
Japan	ISO 6460	(= EDC)	4-Takt 13 2-Takt 8	4-Takt 2 2-Takt 3	4-Takt 0,3 2-Takt 0,1	2000
<b>Pkw (Otto)</b>						
EU	91/441/EWG Euro I	NEDC	2,72	0,97 (HC+NO <sub>x</sub> )		1993
EU	Euro II	NEDC	2,2	0,5 (HC+NO <sub>x</sub> )		1996
EU	Euro III	NEDC inkl. Kaltstart	2,3	0,2	0,15	2000
EU	Euro IV	NEDC inkl. Kaltstart	1	0,1	0,08	2005
USA	Calif. law Tier 1	FTP-75	2,11	0,15 (NMOG)	0,25	1994
USA	Calif. law TLEV	FTP-75	2,11	0,08 (NMOG)	0,25	1994
USA	Calif. law LEV	FTP-75	2,11	0,05 (NMOG)	0,12	1997
USA	Calif. law ULEV	FTP-75	1,06	0,02 (NMOG)	0,12	1997
USA	Calif. law ZEV	FTP-75	0	0	0	2003
Japan		10-15 mode	2,7	0,39	0,25	1991

Motorrädern in den USA erfolgt im ebenfalls für Pkw definierten FTP-75-Zyklus, der aus einem realen Geschwindigkeitsverlauf einer Pkw-Fahrt durch Los Angeles abgeleitet wurde.

### 3.1.1 Abgasmessungen in der Europäische Union

Die Abgasmessung an Motorrädern für den europäischen Markt ist als Bestandteil der EU-Gesamtbetriebserlaubnis nach 97/24/EG geregelt. Wie in der vorher gültigen Regelung der ECE-R 40 ist dabei der europäische Stadtfahrzyklus (EDC, **Bild 3.1**) anzuwenden. Dieser Zyklus geht in seiner Form ursprünglich auf Messungen mit Pkw im Stadtverkehr von Paris zurück und wird für Motorräder seit der Einführung der ECE-R 40 in 1979 angewendet. Mit Gültigkeit der Regelung nach 97/24/EG wurden, verpflichtend für Neufahrzeuge ab Modelljahr 1999, die Grenzwerte verschärft, vgl. **Tabelle 3.1**.

**Tabelle 3.1** enthält außerdem die derzeitigen Vorschläge Deutschlands für kommende Stufen der europäischen Gesetzgebung, die innerhalb der MVEG diskutiert werden. Das zugehörige Meßverfahren (Zyklus EDC, NEDC oder eigenständiger Motorradzyklus) ist hierbei noch offen. Das grundsätzliche Ziel der Vertreter Deutschlands besteht in einer weitgehenden Gleichheit der Grenzwerte für Motorräder und Pkw, gemessen am Stand der Pkw-Technologie (Minimalforderung Euro I, wenn möglich Euro II) [21].



**Bild 3.1:** Europäische Fahrzyklen (EDC, NEDC)

Basierend auf den laufenden Diskussionen sowie zwei weiteren Studien zum Umweltsverhalten von Motorrädern [111, 73] hat die EU-Kommission im Juli 1999 Vorschläge vorgelegt, die eine Aufspaltung der Grenzwerte in drei verschiedene Hubraumklassen sowie mehrere Optionen zum anzuwendenden Fahrzyklus (EDC, EDC mit Kaltstart, NEDC oder neuer Motorradzyklus) vorsehen. Die hierbei vorgeschlagenen Grenzwerte stellen im Vergleich zur deutschen Position erheblich geringere Anforderungen dar. Als Einsatztermine für zukünftige Grenzwertstufen werden die Jahre 2004 und 2009 angestrebt [21].

Für Pkw ist für die Messung der limitierten Abgaskomponenten in der 91/441/EWG seit 1992 der NEDC, **Bild 3.1**, etabliert. Dieser besteht aus dem EDC und einer Ergänzung um einen „außerstädtischen“ Fahranteil mit höheren Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h. Bis zur Grenzwertstufe Euro II wird der Schadstoffmessung eine Motorwarmlaufphase von 40 Sekunden Leerlaufbetrieb vorgeschaltet, ab Euro III beginnt die Messung unmittelbar mit dem Kaltstart. Eine zukünftige Anwendung dieses Fahrprofils auch für Motorräder ist in der Diskussion, seine Gültigkeit kann jedoch insbesondere wegen der für Motorradverhältnisse geringen Beschleunigungswerte nicht ohne weitere Überprüfung unterstellt werden.

Bezüglich der Grenzwerte für Pkw tritt mit dem Jahr 2000 europaweit die Stufe Euro III in Kraft, die eine deutliche Absenkung der zulässigen Emissionswerte sowie die genannte Integration des Kaltstarts in die Schadstoffmessungen beinhaltet. Mit Umsetzung dieser Stufe für die im Verkehr befindliche Fahrzeugflotte könnte eine durch den Verkehr hervorgerufene Schadstoffbelastung ähnlich 1970 entstehen, obwohl sich Fahrzeugbestand und Fahrleistung seit dieser Zeit erheblich erhöht haben [66]. Die für 2005 geplante Einführung einer weiteren Grenzwertverschärfung (Euro IV, Grenzwerte liegen derzeit nur als Vorschlag vor) wird von der Auto- und Mineralölindustrie bereits heute als geringer Beitrag zu weiteren Verbesserungen gegenüber Euro III betrachtet,

der im Verhältnis zu den durch die Einführung verursachten Gesamtkosten u.U. nicht zielführend ist [66, 69].

Ähnliche Betrachtungen des Umweltnutzens und der gesamtwirtschaftlichen Kosten sind auch für die zukünftigen Planungen für Motorrad-Grenzwerte anzustellen. Im direkten Vergleich der gültigen Grenzwerte für Pkw und Motorräder darf ein Motorrad trotz weniger stark belastendem Fahrzyklus die Schadstoffmengen von ca. 15 Pkw mit moderner Abgasreinigungstechnik ausstoßen. Selbst bei pessimistischen Annahmen beträgt der Schadstoffanteil des Motorradverkehrs am gesamten Straßenverkehr allerdings weniger als 5 % [88]. Aufgrund dieses geringen Anteils am gesamten Schadstoffausstoß erscheint daher eine völlige Gleichbehandlung zwischen Motorrädern und Pkw unter gesamtwirtschaftlicher Kostenbetrachtung kaum erstrebenswert, da einmalige Entwicklungskosten auf vergleichsweise wenige produzierte Fahrzeuge umgelegt werden müssen. Dennoch besteht bezüglich der flächendeckenden Fahrzeugausrüstung mit Abgasreinigungssystemen sowie hinsichtlich deren Wirksamkeit ein deutlicher Nachholbedarf des Motorrads gegenüber dem Pkw, da der relative Ausstoß der Motorräder aufgrund zunehmend besserer Technologie im Pkw-Bereich im Steigen begriffen ist und bereits heute zeitlich und lokal einen signifikanten Einfluß besitzt.

### 3.1.2 Abgasmessungen in den USA

Abgasmeßvorschriften für Motorräder gelten in den USA verbindlich seit 1978 [100]. Als Fahrprofil wird wie auch beim Pkw der FTP-75-Zyklus angewendet. Dieser stellt den tatsächlich im Stadtbereich von Los-Angeles mit einem Pkw gemessenen Geschwindigkeitsverlauf dar und berücksichtigt daher ebenfalls die spezifischen Eigenschaften und Betriebsweisen von Motorrädern hinsichtlich Dynamik, Lastkollektiven und Fahrstrecken nicht.

Wie im Pkw-Bereich bestehen in den USA besonders hohe Anforderungen in den kalifornischen Bestimmungen, wobei auch die Vorschläge für zukünftige Verschärfungen vom California Air Resources Board (CARB) entwickelt werden [32]. Die in **Tabelle 3.1** genannten kalifornischen Grenzwertstufen TLEV, LEV usw. gelten dabei für die angegebenen Modelljahre nicht verpflichtend, sondern es existieren Bestimmungen und Marktanreize, z.B. über Zuschüsse und Steuervergünstigungen, die einen mit den Jahren ansteigenden Anteil von Fahrzeugen der jeweiligen Schadstoffklasse an den Neuzulassungen zum Ziel haben.

### 3.1.3 Abgasmessungen in Japan und in weiteren Ländern

Japan hat für Pkw seit 1991 einen Zyklus etabliert, der ähnlich dem NEDC eine Kombination von Stadtverkehr und innerstädtischer Schnellstraße beinhaltet (10- to 15-mode cycle). Motorräder werden gemäß ISO 6460 in einem Fahrzyklus, dessen Geschwindigkeitsverlauf dem EDC entspricht, geprüft, wobei sich die Grenzwerte kaum von den europäischen Regelungen unterscheiden.

Außerhalb der genannten Länder existieren Vorschriften für die Abgasmessung an motorisierten Zweirädern in der Schweiz (Grenzwerte ähnlich den EU-Bestimmungen), Indien und Taiwan [73, 27]. Besonders scharfe Anforderungen im Bereich von Rollern und

Mopeds (sowie auch bei Motorrädern bezüglich CO) bestehen in Taiwan, woraus bereits zahlreiche Erfahrungen in der Ausstattung mit (ungeregelten) Katalysatoren für die Kategorie kleiner Zweiräder resultieren.

### 3.1.4 Realitätsnähe und Vergleich der Abgasprüfverfahren

Wie die Übersicht über einige repräsentative Größen der für Motorräder angewendeten oder in Frage kommenden Zyklen zeigt, **Tabelle 3.2**, kann eine realistische Abbildung des typischen Betriebs von Motorrädern von keinem der angewendeten Verfahren erwartet werden. Auch eine Erweiterung des Stadtfahrzyklus um den außerstädtischen Fahranteil wie bei Pkw bringt wegen der bei höheren Geschwindigkeiten sehr moderaten Beschleunigungswerte nur eine geringe Zunahme der Motorbelastung und damit keine hinreichende Veränderung der Prüfbedingungen für Motorräder. Eine genauere Überprüfung der Anwendbarkeit von Zyklen wird anhand der experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit vorgenommen. Aus den Ergebnissen wird ein die typischen Betriebsbedingungen von Motorrädern treffender Zyklus vorgeschlagen, vgl. Kap. 5.1, Seite 90 ff.

Eine Harmonisierung der Testzyklen und Abgasgrenzwerte für Pkw zwischen USA und Europa ist nach Aussage der EU-Kommission [41] parallel zur zukünftigen Euro V-Verordnung frühestens nach 2005 zu erwarten. Weltweite Vereinheitlichungen im Mo-

**Tabelle 3.2:** Charakteristische Größen üblicher Fahrzyklen

Zyklus	Anwendung	Länge [km]	Dauer [s]	mittlere Geschwindigkeit [km/h], (insg. / nur Fahranteil)	max. Geschwindigkeit [km/h]	max. Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
EDC	EU Motorräder	4,04	780	18,7 / 27,7	50	1,04
NEDC	EU Pkw	11,01	1180	33,6 / 44,7	120	1,04
FTP-75	USA Motorräder + Pkw	17,76	1877	34,1 / 42,2	91,2	1,6

torradbereich stehen derzeit vor dem Problem, daß innerhalb der ECE unterschiedliche Auffassungen zur globalen Bedeutung der Motorrademissionen bestehen und daher die Notwendigkeit der Fortschreibung von Emissionsstandards unterschiedlich bewertet wird [99]. Besonders aus dem Blickwinkel kleiner Fahrzeughersteller würde eine Harmonisierung die weltweite Vermarktung von Fahrzeugen vereinfachen und erscheint daher wünschenswert. Andererseits stellen Verschärfungen der Anforderungen gerade die kleinen Hersteller vor besondere wirtschaftliche und technologische Herausforderungen.

Wie **Tabelle 3.1** auf Seite 26 zeigt, liegen die jeweils gültigen Grenzwerte wie auch die Vorschläge für zukünftige Verschärfungen als reine Mengenangaben in Gramm pro Kilometer in vergleichbaren Größenordnungen. Nennenswerte Unterschiede bestehen hingegen im Hinblick auf die Durchführung der Prüfung, z.B. hinsichtlich der Zusammensetzung der Fahrstrecke oder der Berücksichtigung von Kaltstarts. Schwierigkeiten sind daher weniger im Bereich der Vereinheitlichung von Grenzwerten als mehr in einer Einigung auf ein anzuwendendes Prüfverfahren zu erwarten, zumal sich die statistische

Fahrzeugverteilung und die Einsatzbedingungen innerhalb verschiedener Länder teilweise deutlich unterscheiden.

### 3.2 Messung des Kraftstoffverbrauchs

Der Kraftstoffverbrauch von Pkw wird innerhalb der EU seit 1996 nach der Richtlinie 93/116/EWG ermittelt, wobei wie für die Abgasmessungen der NEDC zu Grunde gelegt wird. Diese Vorschrift löst die vormals bestehende Ermittlung des Verbrauchs im sogenannten Drittmix (simulierte Stadtfahrt im EDC sowie Konstantfahrten mit 90 und 120 km/h) ab. Die Errechnung des Verbrauchswerts auf dem Rollenprüfstand erfolgt aus den Konzentrationen der Abgaskomponenten  $CO_2$ , CO und HC nach der zugeschnittenen Formel 3.1, die sich aus der chemischen Zusammensetzung des Otto-Kraftstoffs ergibt.

$$B_s[l/100km] = (0,866 \cdot HC[g/km] + 0,429 \cdot CO[g/km] + 0,273 \cdot CO_2[g/km]) \cdot \frac{0,1151}{\rho_{\text{Kraftstoff}} [kg/l]} \quad (3.1)$$

Eine vergleichbare Vorschrift zur Verbrauchsmessung an motorisierten Zweirädern existiert zur Zeit nicht. Grundsätzlich ist das Verbrauchsermittlungsverfahren nach DIN 70030 [13] anwendbar, das als Fahrzustand allerdings nur die Konstantfahrt zugrunde legt und daher zu wenig praxisgerechten Zahlenwerten führt.

Daneben existieren verschiedene Meßverfahren, die mangels Praxisnähe der gesetzlichen Vorschriften von Prüfeinrichtungen, Fachzeitschriften oder Vereinen definiert wurden. Diese stellen den Verbrauch häufig auf selbst definierten Meßrunden im öffentlichen Straßenverkehr fest, die möglichst weitgehend nach StVO gefahren werden. Problematisch sind hierbei die Verbrauchsmessung, die überwiegend durch einfaches Befüllen des Tanks vor und nach der Fahrt erfolgt, sowie die Vergleichbarkeit hinsichtlich des Verkehrsflusses und der Fahrweise. Aus diesen Festlegungen und Einflüssen ergibt sich in der Praxis eine Vielzahl von Verbrauchswerten, die kaum nachvollziehbar und durchschaubar sind.

Für den Verbraucher sind daher vergleichbare Angaben zum Kraftstoffverbrauch von Motorrädern nicht zu erhalten. Vielmehr können Informationen über diese für die Kaufentscheidung möglicherweise relevante Größe lediglich aus freiwilligen Angaben der Hersteller (teilweise ermittelt bei Konstantfahrt oder in anderen Betriebszuständen) oder aus den genannten, mehr oder weniger reproduzierbaren Messungen einschlägiger Zeitschriften gewonnen werden.

### 3.3 Geräuschvorschriften

#### 3.3.1 Ablauf der Geräuschmessungen

Grenzwerte für die Geräuschentwicklung von Kraftfahrzeugen existieren in Deutschland bereits seit 1937. Die heute aktuellen Vorschriften verlangen die Messung der Geräuschemissionen für das Fahrgeräusch und das Standgeräusch. Der grundsätzliche Meßaufbau der innerhalb der EU verwendeten Verfahren wird in der ISO-Richtlinie 362

(„Measurement of noise emitted by accelerating Highway vehicles: A full throttle acceleration test“) festgelegt und von der EG-Richtlinie 97/24/EG, die auch die gültigen Grenzwerte regelt, in Ablösung der vormals geltenden Regelungen 87/56/EWG und 78/1015/EWG übernommen.

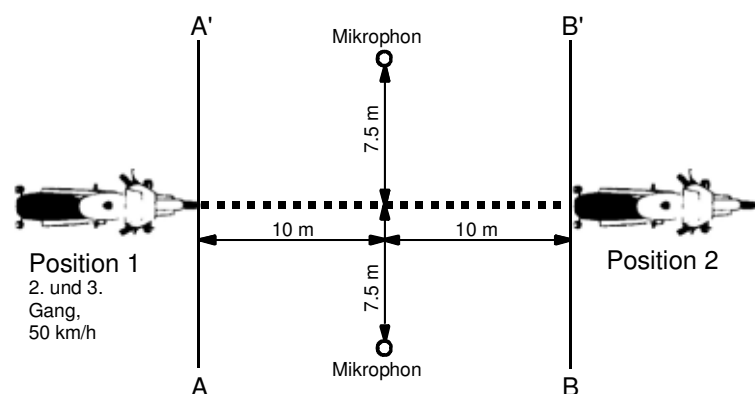
Zur Fahrgeräuschmessung wird das Fahrzeug an einen Meßaufbau nach **Bild 3.2** mit konstanter Geschwindigkeit im 2. und 3. Gang (für Krafträder mit mindestens 5 Gängen und einem Hubraum von mehr als 175 cm<sup>3</sup>) an die Linie A-A herangefahren. Die Anfahrtschwindigkeit beträgt dabei 50 km/h oder entspricht der Fahrgeschwindigkeit bei Anfahrt mit einer Drehzahl von 75 % der Nenndrehzahl, sofern diese kleiner ist als 50 km/h. In der Praxis greift für Motorräder heutiger Auslegung nahezu ausschließlich der 50 km/h-Wert, da die Geschwindigkeit bei 75 % Nenndrehzahl im 2. Gang bereits wesentlich höher liegt.

Beim Passieren der Linie A-A wird die Drosselklappe schlagartig geöffnet, und unter Vollast wird das Fahrzeug bis zur Linie B-B beschleunigt. Nach Überschreiten der Linie B-B wird die Drosselklappe geschlossen, um eventuelle Spitzenpegel zu erfassen, wie sie z.B. durch Fehlzündungen während des Lastwechsels entstehen können.

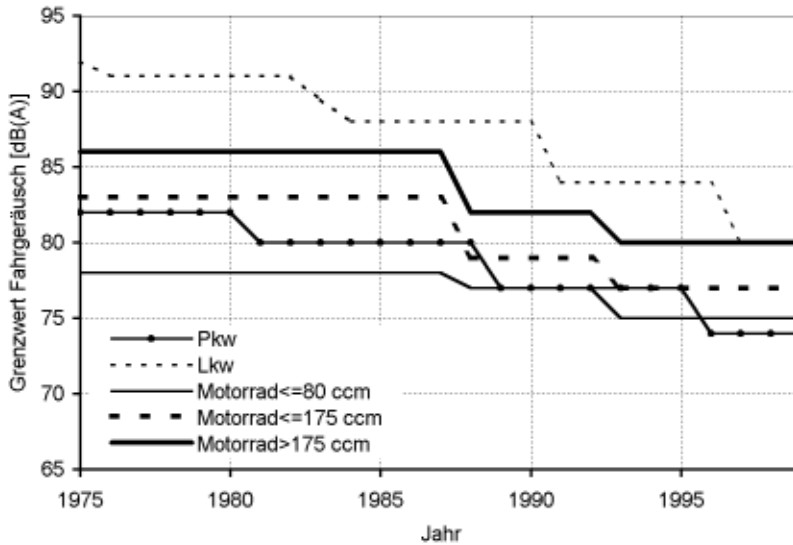
Als Fahrgeräusch gilt der Mittelwert der in beiden Gängen im seitlichen Abstand von 7,5 m von der Fahrlinie in einer Höhe von 1,2 m über der Fahrbahn gemessene höchste Schalldruckpegel, wobei der Meßwert um vorgegebene Toleranzwerte zu bereinigen ist. Sofern die Ausfahrt im 2. Gang mit einer größeren als der Nenndrehzahl erfolgt, gilt allein der Wert des 3. Gangs als Prüfergebnis.

Für das Fahrgeräusch sind in Abhängigkeit vom Hubraum Geräuschgrenzwerte festgelegt, deren Einhaltung im Rahmen der Typprüfung für neue Fahrzeuge nachgewiesen werden muß. Für Motorräder mit mehr als 175 cm<sup>3</sup> beträgt dieser Wert aktuell 80 dB(A) und entspricht damit dem Grenzwert für leistungsstarke Lkw, wobei im Gegensatz zum Motorrad bei Nutzfahrzeugen die Geräuschmessung im lautesten Gang erfolgt, **Bild 3.3**. Bei Änderungen der Serie sowie bei vermuteten Abweichungen durch Serienstreuungen wird darüber hinaus eine Nachprüfung zur Übereinstimmung der Produktion erforderlich.

Zu berücksichtigen sind bei der Diskussion der Entwicklung der Grenzwerte die zwischenzeitlich verschiedentlich geänderten Meßvorschriften, nach denen im Vergleich zu früheren Meßverfahren z.B. die vorgeschriebenen Gänge und die Berechnung des Meßwerts geändert wurden, so daß parallel durchgeführte Grenzwertverschärfungen häufig zumindest teilweise kompensiert wurden [83].



**Bild 3.2:** Meßaufbau für die Fahrgeräuschmessung nach ISO R 362



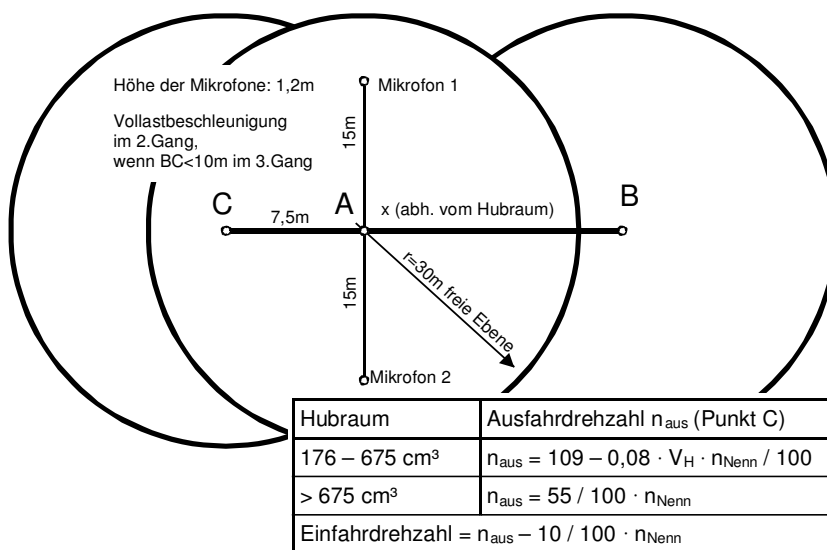
**Bild 3.3:** Entwicklung der Fahrgeräuschgrenzwerte für verschiedene Fahrzeugkategorien

Der japanische Meßaufbau nach TRIAS 20 unterscheidet sich in seinen Abmessungen nicht vom Aufbau nach ISO R 362, allerdings erfolgt die Messung in höheren Getriebegängen und besitzt zur Zeit einen Grenzwert von 75 dB(A).

In den USA erfolgt die Geräuschmessung nach 40 CFR Part 205 mit einem Fahrgeräuschgrenzwert von ebenfalls 80 dB(A), wobei das Fahrgeräusch allerdings in einem bezüglich seiner Abmessungen abwei-

chenden Meßaufbau und mit vorgeschriebenen Ein- und Ausfahrdrehzahlen bestimmt wird, **Bild 3.4**. Die geforderte Ausfahrdrehzahl von 55 % der Nenndrehzahl (S) liegt dabei für einige, besonders hochtourig ausgelegte Motorräder geringfügig oberhalb der Drehzahl, die sich aus der Anwendung des Meßverfahrens nach ISO R 362 ergibt.

Das Standgeräusch wird in Europa entsprechend einem Meßaufbau nach **Bild 3.5** in der Typprüfung erfaßt und in die Fahrzeugpapiere eingetragen, ein einzuhaltender Grenzwert besteht nicht. Die Messung erfolgt für Fahrzeuge mit einer Nenndrehzahl von mehr als 5.000 min<sup>-1</sup> bei halber Nenndrehzahl, ansonsten bei Dreivierteln der Nenndrehzahl.

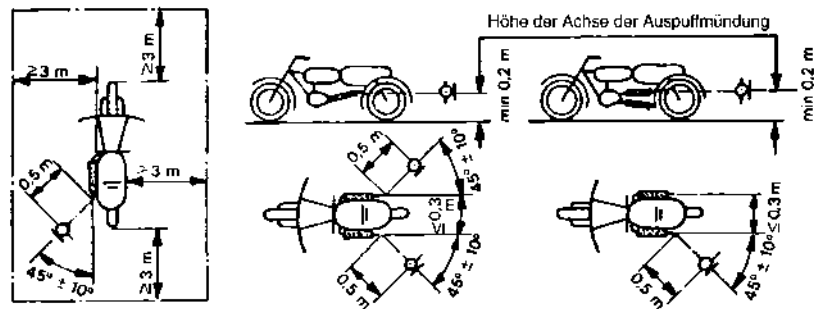


**Bild 3.4:** Meßaufbau für die Fahrgeräuschmessung nach 40 CFR Part 205 (USA)

Für Kontrollen an verkehrsauffälligen Fahrzeugen gilt der eingetragene Wert als Referenzwert, wobei bei starken Abweichungen, i.a. mehr als 5 dB(A), an Einzelfahrzeugen eine weitere Untersuchung in Form einer Fahrgeräuschmessung angeordnet werden kann.

Bis 1980 wurde das Standgeräusch in einem Abstand von 7 m gemessen, seitdem im

Nahfeld im Abstand von 0,5 m von der Auspuffmündung.



**Bild 3.5:** Meßaufbau für die Messung des Standgeräuschs nach ISO R 362

### 3.3.2 Kritik an den Geräuschmeßverfahren

Aus verschiedenen Gründen wirken sich die in **Bild 3.3** deutlich erkennbaren Absenkungen der Fahrgeräuschgrenzwerte im realen Verkehr kaum spürbar aus, weshalb das Meßverfahren nach ISO R 362 bereits seit langer Zeit zunehmender Kritik ausgesetzt ist. Diese Gründe sind:

- Die zunehmende Verkehrsdichte kompensiert die Verbesserungen am Einzelfahrzeug.
- Die vorgeschriebene Geräuschmeßfahrbahn (ISO-Asphalt) ist im Hinblick auf die Schallabsorption besser als typischer Fahrbahnbelag. Dies hat sowohl eine Verringerung des Reifen/Fahrbahngeräuschs als auch verminderte Schallreflexionen von der Fahrbahn zur Folge.
- Der Fahrzustand während der Prüfung ist nicht hinreichend repräsentativ. Im realen Verkehrsgeschehen als besonders störend empfundene Vorgänge, wie das Ausdrehen kleiner Gänge, kommen während der Prüfung nicht vor.
- Die Fahrzeuge werden hinsichtlich der Gangabstufung, des Ansprechverhaltens des Motors oder der bevorzugten Schallabstrahlungsrichtung auf das Meßverfahren hin ausgelegt.
- Die übliche A-Bewertung des Geräuschpegels bildet das menschliche Hörvermögen und insbesondere die psychologischen Geräuschwirkungen nur unzureichend ab.

Zudem ist bei allen Maßnahmen und Vorschriften, die sich auf Neufahrzeuge beziehen, zu berücksichtigen, daß der Ersatz alter, geräuschintensiver Fahrzeuge nur langsam stattfindet. Eine Verschärfung von Grenzwerten kann daher erst mit einem Zeitverzug von mehreren Jahren in der Realität wirksam werden.

Derzeit findet innerhalb der EU keine periodische Untersuchung des Geräuschverhaltens von im Verkehr befindlichen Fahrzeugen statt, so daß mit einem Anstieg der Emissionen über der Lebensdauer der Fahrzeuge gerechnet werden muß. Sporadisch vorgenommene Geräuschkontrollen im realen Verkehr weisen häufig Schwierigkeiten in der praktischen Durchführung hinsichtlich eines geeigneten Meßborts, einer kombinierten Drehzahl-/Geräuschmessung und des aufgrund dieser Probleme anzuwendenden großen Toleranzbandes für den Meßwert auf. Mit Hilfe technischer Instrumente, z.B. des sogenannten Amsterdamer Schallpegelmessers, bei dem die Motordrehzahl aus charakteristischen Frequenzen des Luftschalls bestimmt wird, können vermutlich in Kürze Fortschritte erzielt werden, so daß sich die Zahl manipulierter Motorräder u.U. deutlich verringern lassen dürfte. Kontrollen im realen Verkehr haben dabei den deutlichen Vorteil, daß veränderte Motorräder nicht für das einmalige Bestehen einer periodisch vorgeschriebenen Prüfung zurückgerüstet werden können, so daß aufwendige Maßnahmen zur Erhöhung der Manipulationssicherheit entfallen können.

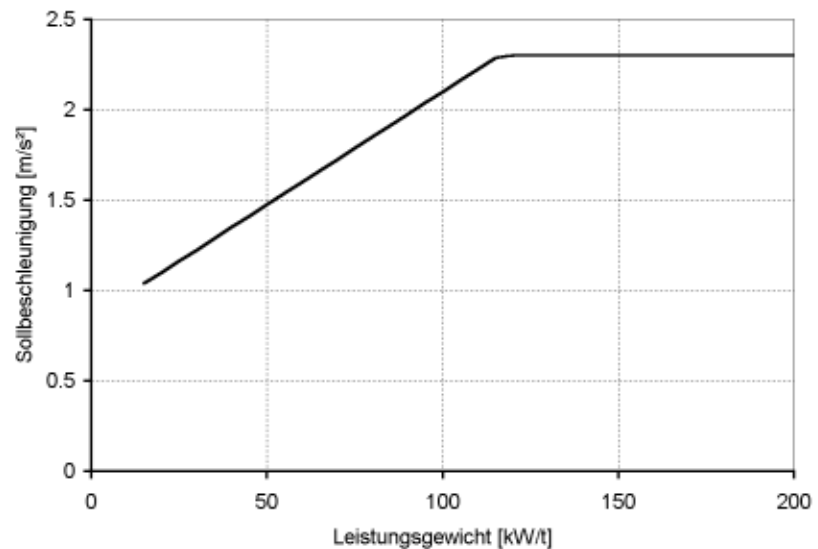
### 3.3.3 Bestehende Verbesserungsvorschläge für Geräuschmessungen

Bereits seit 1993 wird eine weitere Grenzwertabsenkung für Motorräder, vor allem im Vergleich zu schweren Nutzfahrzeugen, gefordert. Der derzeit in der EU diskutierte Vorschlag Deutschlands für eine weitere Stufe der Geräuschabsenkung besteht, sofern keine Änderung am Meßverfahren vorgenommen wird, für Krafträder mit einem Hubraum von mehr als 175 cm<sup>3</sup> in einer Absenkung von 80 auf 77 dB(A) [21].

Aufgrund der genannten, nicht nur bei Motorrädern auftretenden Mängel am Testverfahren sind parallel dazu allerdings auch Änderungen des Meßverfahrens seit langer Zeit in verschiedenen Projekten vorgeschlagen und erprobt worden. So wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes ein Änderungsvorschlag durch den damaligen TÜV Bayern-Sachsen erarbeitet. Dieser sieht eine Mindest-Einfahrdrehzahl von 50 % der Nenndrehzahl vor, sofern diese Drehzahl im zweiten Gang bei 50 km/h nicht bereits überschritten wird. Im dritten Gang soll die Einfahrgeschwindigkeit generell 60 km/h betragen. Wie orientierende Messungen belegen, erhöht sich durch diese Meßmethode das gemessene Fahrgeräusch je nach Fahrzeuggestaltung um bis zu 2,5 dB(A) [92, 83], wobei besonders für die derzeit bevorzugten Fahrzeuge mit hohen spezifischen Leistungen bei hohen Drehzahlen erhöhte Geräuschwerte gemessen werden.

Ein weiteres Verfahren wurde vorübergehend in den 80er Jahren im Zulassungsverfahren der Schweiz angewendet. Dabei wurden alle Motorräder einheitlich mit einer Einfahrdrehzahl von 75 % der Nenndrehzahl im 2. Gang in die Meßstrecke eingefahren und mit Vollast beschleunigt. Dieses Verfahren zielte weniger darauf ab, die von Motorrädern bei angepaßter Fahrweise durchschnittlich emittierten Geräusche wiederzugeben, sondern es erfolgte eine bewußte Konzentration auf die maximal möglichen Emissionen. Bereits 1984 wären nach dem Schweizer Meßverfahren fast die Hälfte der in Deutschland angebotenen Motorräder mit Hubräumen von mehr als 500 cm<sup>3</sup> mit Einfahrgeschwindigkeiten von mehr als 80 km/h geprüft worden [86], wobei sich dieser Trend durch die heute üblichen Fahrleistungen und Fahrzeugauslegungen sicherlich noch verstärkt hätte. Untersuchungen an 20 Motorrädern verschiedener Leistungsklassen führten 1984 zu dem Ergebnis, daß durch die Anwendung der Schweizer Meß-

methode bei leistungsstarken Fahrzeugen ( $\geq 25$  kW) die gemessenen Geräuschwerte im Vergleich zur damals gültigen 78/1015/ EWG (Verfahren wie ISO R 362) zwischen 0,5 und 6,7 dB, im Mittel um 3,7 dB anstiegen [86]. Problematisch war an diesem Meßverfahren der hohe Anreiz zur nachträglichen Umrüstung der Motorräder in Kundenhand, die zu einer extremen Quote manipulierter Fahrzeuge in der Schweiz führte.



**Bild 3.6:** Vorschlag einer Sollbeschleunigung für die Fahrgeräuschmessung an Pkw nach [87]

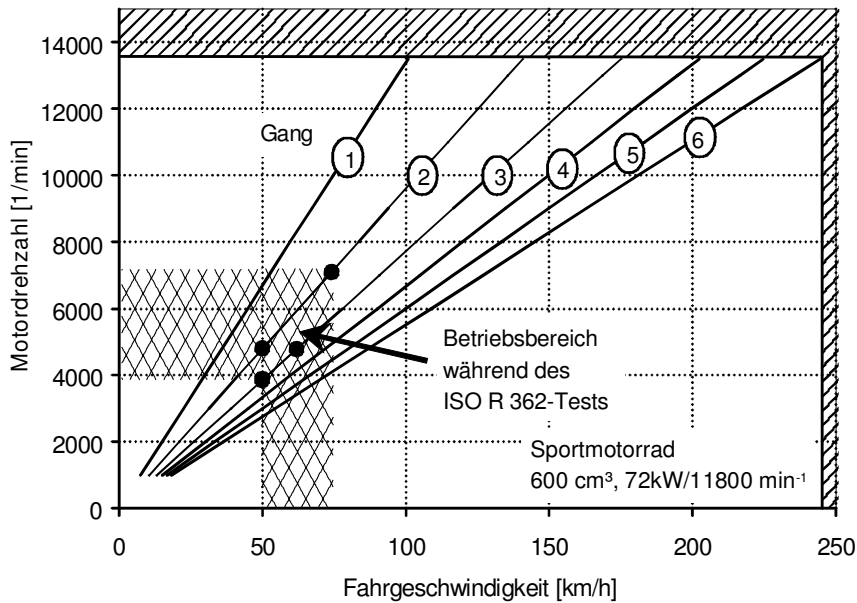
Aktuell befaßt sich eine Kommission der ISO mit der Weiterentwicklung und Verbesserung des Meßverfahrens der Richtlinie 362 [87]. Hierbei werden gegenwärtig zwei grundsätzliche Ideen verfolgt, zum einen eine Veränderung des reinen Geräuschmeßverfahrens, zum anderen die Definition eines Abgasmeßzyklus, der auch für die Messung der Fahrgeräuschwerte herangezogen werden kann.

Konkrete Vorschläge basieren auf dem Gedanken, nicht den Betriebszustand (z.B. Fahren im 2. und 3. Gang) sondern den resultierenden Fahrzustand (z.B. in Form einer Soll-Beschleunigung) im Sinne einer Wirkvorschrift vorzuschreiben. Entsprechende Sollwerte für die Beschleunigung wurden für den Betrieb von Pkw bereits ermittelt, **Bild 3.6**. Die maximale Beschleunigung soll dabei nach oben begrenzt werden, was im Grundsatz sehr leistungsstarke Fahrzeuge begünstigt und in Übereinstimmung mit der bisherigen Ausnahmeregelung für stark motorisierte Pkw steht. Nach dieser gilt als Ergebnis der Geräuschprüfung nur der Wert des 3. Gangs, wenn die Ausfahrgeschwindigkeit im 2. Gang 61 km/h überschreitet.

Eine Anpassung dieses Vorschlags an die Fahrleistungen von Motorrädern steht noch aus und wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht, vgl. Kap. 5.2, Seite 95 ff.

### 3.4 Auswirkungen der aktuellen Vorschriften auf die Fahrzeuggestaltung

Aus naheliegenden Gründen optimiert der Hersteller die Auslegung und Abstimmung eines Fahrzeugs mit Blick auf die für die Zulassung zu erfüllenden Prüfungen. Insofern besitzt die Gestaltung der Meß- und Prüfvorschriften erhebliche Bedeutung für die Fahrzeuggestaltung, und bei Diskrepanzen zwischen dem Prüfverfahren und dem praktischen Fahrzeugbetrieb können sich Zielkonflikte und für die Praxis suboptimale Lösungen ergeben.



**Bild 3.7:** Betriebsbereich eines Sportmotorrads während der ISO-Geräuschemessung

Beispielsweise erfolgt die Wahl der Übersetzungen des 2. und 3. Getriebegangs, die für die Geräuschemessung nach ISO verwendet werden, nicht ausschließlich unter fahrdynamischen und motor-technischen Aspekten, sondern im Vordergrund steht häufig die Fragestellung, welches Drehzahl- und damit Geräuschniveau bei einer Einfahrt mit den vorgeschriebenen 50 km/h über der Meßstrecke entsteht.

Im Ergebnis sind auf dem Markt Motorräder zu beobachten,

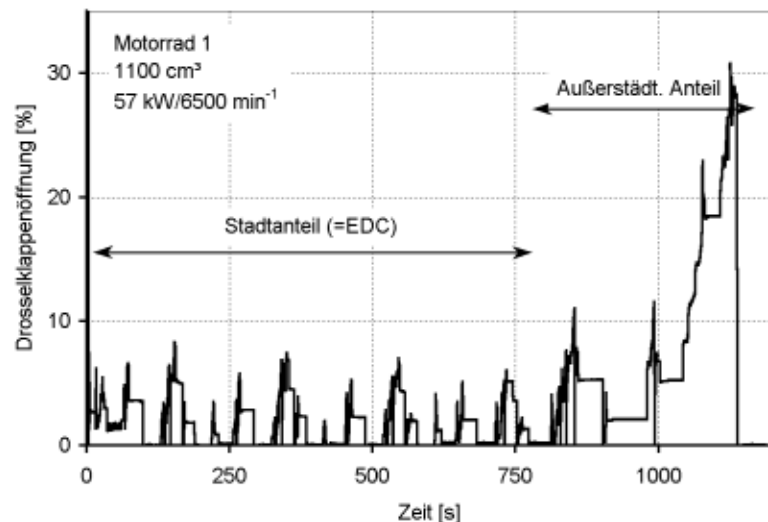
deren Gesamtübersetzung so lang gewählt wurde, daß bereits der Vierte von sechs Gängen bis in die Nähe der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs reicht. In der Praxis werden diese Fahrzeuge dann im Vergleich zu anderen Fahrzeugen zumeist in niedrigeren Gängen gefahren, so daß aufgrund vergrößerter Getriebelücken im häufig gefahrenen Geschwindigkeitsbereich u.U. höhere Geräuschemissionen entstehen als bei einem nicht auf minimalen Geräuschmeßwert optimierten Motorrad. Alternativ werden für einige Modelle kürzere Übersetzungen als Umrüstsatz angeboten, so daß letztendlich die Geräuschemessung während der Typprüfung unterlaufen wird.

**Bild 3.7** zeigt den Betriebsbereich während der Geräuschemessung für ein aktuelles, leistungsstarkes Sportmotorrad. Insbesondere die für die Geräuschentwicklung dominante Größe Motordrehzahl beträgt für dieses Fahrzeug weniger als 55 % der Maximaldrehzahl. Im realen Straßenverkehr können mit diesem Fahrzeug daher (bereits im serienmäßigen Fahrzeugzustand) Geräuschemissionen erzeugt werden, die um ein Mehrfaches oberhalb des Typprüfwerts liegen.

Auch über Zündkennfelder, Ventilsteuerzeiten und Einspritzmengenregelungen können Maßnahmen ergriffen werden, die im Hinblick auf die gültigen Meßvorschriften Verbesserungen nach sich ziehen (z.B. gezielte Drehmomenteinbrüche in für die Fahrzeugbeschleunigung während der Geräuschprüfung relevanten Drehzahlbereichen). Theoretisch können solche Anpassungen durch nachträgliche Veränderungen am zugelassenen Fahrzeug sogar rückgängig gemacht werden, indem z.B. in der Motorsteuerung abgelegte Zündkennfelder angepaßt werden.

Zur Optimierung des Abgasverhaltens bei bekanntem Zyklus können gezielt zu Beginn der Messung oder in Phasen sehr niedriger Motorlast Gemischanreicherungen vorgenommen werden, um über den Oxidationsvorgang der unverbrannten Kohlenwasserstoffe im Katalysator dessen Temperatur anzuheben und so die Konvertierungsrate in anschließenden Beschleunigungsphasen anzuheben. Insbesondere im Hinblick auf die

Abstimmung von Abgasnachbehandlungssystemen, z.B. von geregelten Katalysatoren, ist daher eine Orientierung der Zyklen an der tatsächlichen Fahrpraxis von größter Wichtigkeit, damit der zugrundeliegende Gedanke des Umweltschutzes im realen Fahrbetrieb weitestgehend zum Tragen kommen kann.



**Bild 3.8:** Drosselklappenbetätigung bei einem leistungsstarken Motorrad während des Durchfahrens des EDC bzw. NEDC

Wie **Bild 3.8** zeigt, durchfährt ein leistungsstarkes Motorrad den derzeit für die Abgasmessungen gültigen Fahrzyklus (EDC) mit

äußerst geringen Motorlasten. Die maximale Drosselklappenöffnung im gezeigten Beispiel ist kleiner als 10 %, der zeitliche Mittelwert beträgt weniger als 3 %.

Auch der außerstädtische Anteil des Pkw-Meßzyklus (NEDC) wird weit unterhalb der Vollast gefahren (< 30 % Drosselklappenöffnung). Maßnahmen, die auf eine hohe Motorleistung im Bereich hoher Lasten zielen, z.B. Gemischanreicherungen über weite Kennfeldbereiche, werden in der heutigen Abgasmessung daher nicht erfaßt.

Eine auf einen unrealistischen Meßzyklus abgestimmte Katalysatoranlage wird bei einer nicht dem Zyklus entsprechenden Fahrweise ihre Funktion weitgehend verlieren, so daß im realen Einsatz ausschließlich die systembedingten Nachteile des Katalysators (Mehrmasse, Mehrverbrauch, Bauraum, Abgasgedruck, Kosten) zum Tragen kommen. Des weiteren sind Angaben zum Streckenkraftstoffverbrauch nur sinnvoll, wenn und soweit sie auf der Basis eines realitätsnahen Fahrzyklus ermittelt wurden.

Da der Energiebedarf und auch die Emissionen sehr stark vom Belastungskollektiv des Fahrzyklus abhängen (die Fahrwiderstände sind stark zyklusabhängig und die Wirkungsgrade der Antriebskomponenten stark lastabhängig) [24], kann sogar die Bewertung, welches Antriebskonzept für eine bestimmte Fahrzeugkategorie unter Verbrauchs- und Emissionsaspekten am günstigsten eingesetzt wird, von den geltenden Prüfbestimmungen abhängen.

### 3.5 Abhängigkeiten zwischen Emissionen und Verbrauch

Häufig bestehen Zielkonflikte zwischen einer Motorabstimmung auf optimalen Kraftstoffverbrauch, minimale Abgasemissionen und geringes Fahrgeräusch.

Besonders deutlich wird dies bei Ausrüstung von Fahrzeugen mit Otto-Motoren und geregelten Katalysatoren. Einerseits können diese aufgrund der Erfordernis eines weitgehend stöchiometrischen Motorbetriebs nicht im (leicht mageren) Bereich günstigsten spezifischen Kraftstoffverbrauchs betrieben werden. Andererseits wird häufig eine über den stöchiometrischen Betrieb hinausgehende gezielte Anfettung vorgenommen, um über die Nachverbrennung der unvollständig verbrannten Gemischanteile im Katalysator dessen Light-off-Verhalten zu verbessern. Zugunsten von Verringerungen der limitierten Abgaskomponenten wird dabei bewußt ein erhöhter Kraftstoffverbrauch in der Größenordnung von 1-2 % in Kauf genommen.

Ein Überblick über die teilweise nachteilige Beeinflussung des Rohemissionsverhaltens von Ottomotoren durch verschiedene verbrauchssenkende Maßnahmen ist **Tabelle 3.3** zu entnehmen [36]. Die mit dem günstigsten Einfluß auf den Verbrauch ausgestatteten Maßnahmen bestehen in einer homogenen oder gezielt inhomogenen (geschichteten) Abmagerung des Kraftstoff/Luft-Gemischs, was je nach Brennraumgestaltung und Gemischführung in unvollständiger Verbrennung und dadurch erhöhten HC-Emissionen

**Tabelle 3.3:** Einfluß von motorischen Verbrauchsmaßnahmen auf das Rohemissionsverhalten von Ottomotoren (nach [36], modifiziert)  
(+ besser, - schlechter, 0 unverändert)

Maßnahme	Verbrauchs- änderung	HC- Änderung	NO <sub>x</sub> - Änderung
Früher Zündzeitpunkt	+	-	-
Langhubige Auslegung (hohes s/D)	+	-	+
Hohes Verdichtungsverhältnis (Epsilon)	++	--	--
Externe (kalte) Abgasrückführung (AGR)	+	-	++
Interne (warme) AGR	++	+	+
Hohes Epsilon + AGR	++	--	+
2-Ventiltechnik + Doppelzündung	+	+	-
2-Ventiltechnik + Doppelzündung + AGR	++	+	++
Mehrventiltechnik	+	+	-
Drall in der Gemischzuführung	+	+	-
Drall + AGR	++	0	++
Magerkonzept (homogen)	+++	-	++
Otto-Direkteinpritzung (geschichtet)	++++	--	+
Drosselfreie Laststeuerung	++	--	-
Zylinderabschaltung	++	+	--
Stufenloses Getriebe (CVT)	++	+	--
Hubraumreduzierung	+	+	-
Aufladung	++	+	--
Reibungsreduzierung	+	0	+
Kennfeld-Kühlung	+	+	-
Schnellaufheizung	++	++	-
Carbonkolben	+	++	0
2-Takt-Motor	+	--	-
Zylinderreduzierung	+	+	-

seine Grenzen findet. Bei der Anwendung dieser Technologien auf hochdrehende Motorradmotoren würde die Innenkühlung des Motors durch die Verdampfungswärme des Kraftstoffs verringert werden, was besonders bei hohen Drehzahlen zu thermischen Problemen führen kann. Umgekehrt könnte eine Forderung nach magerem Betrieb die erreichbaren Maximaldrehzahlen senken und damit auf die Geräuschemissionen positiven Einfluß nehmen.

Die für die Einhaltung der Geräuschgrenzen erforderlichen, z.T. voluminösen Schalldämpfer erhöhen die Fahrzeugmasse und den Abgasgegendruck und führen dadurch zu steigenden Fahrwiderständen sowie Verschlechterungen des gesamtmotorischen Wirkungsgrads. Daneben beeinflussen die aus Geräuschgründen häufig sehr lang gewählten Übersetzungen der für die Geräuschprüfung relevanten Getriebegänge unmittelbar die in der Abgasprüfung auftretenden Betriebszustände des Motors. Umgekehrt sind auch Rückwirkungen der Abgasvorschriften auf das Geräusch denkbar. Wären Motorräder serienmäßig mit in die Abgasanlage integrierten Katalysatoren ausgerüstet, und würde deren Wirksamkeit periodisch in Abgasuntersuchungen überwacht, so ergäben sich für die Fahrzeugeigentümer erheblich größere Hindernisse für Manipulationen am Abgassystem, was auch bezüglich der Geräuschentwicklung der Motorräder positive Effekte hervorrufen könnte.

Eine Optimierung des Umweltverhaltens von Motorrädern kann daher, wie bei jedem anderen komplexen technischen System, nicht für jede Auswirkung getrennt angestrebt werden. Aus den genannten Abhängigkeiten ergibt sich die Forderung der Arbeitsgruppe Motorrad und Umwelt, anstelle einer reinen Abgasuntersuchung (AU) für Motorräder eine allgemeine Umweltuntersuchung (UU) vorzusehen, in die nach Vorstellungen der Projektgruppe auch eine Geräuschmessung integriert sein sollte [21].

### **3.6 Fazit aus Kapitel 3**

Weltweit existieren unterschiedliche Anforderungen an das Abgas- und Geräuschemissionsverhalten von motorisierten Zweirädern. Alle den Regulierungen zugrunde liegenden Meßverfahren wurden in ihrem Ursprung für andere Fahrzeugkategorien, zumeist Pkw, entwickelt. Spezifische Eigenschaften heutiger Motorräder finden daher in den gesetzlichen Anforderungen keine Berücksichtigung.

Die bestehenden Abgasgrenzwerte liegen (z.T. deutlich) oberhalb der entsprechenden Emissionsanforderungen für Pkw und stellen derzeit keine besonderen Ansprüche an die Verwendung innovativer Technologien seitens der Fahrzeughersteller. Ermittelt werden die Emissionswerte in Fahrzyklen, deren Verlauf überwiegend den Stadtverkehr mit Pkw in den 60er und 70er Jahren beschreibt. Weder hinsichtlich der Belastungshöhe noch bezüglich der Dynamik des Betriebs sind diese Fahrzyklen zum typischen Einsatz leistungsstarker Motorräder ähnlich.

Eine direkte Übertragung der zwischenzeitlich deutlich verschärften gesetzlichen Anforderungen an Pkw auf den Motorradbereich birgt das Risiko, daß in der alltäglichen Fahrpraxis bei Motorrädern nur selten auftretende Betriebszustände als Kriterium für die Technologieauswahl und die Fahrzeugabstimmung angewendet werden. Als Beispiel hierfür kann die konsequente Optimierung des Abgasverhaltens auf minimale Emissionen unmittelbar nach dem Kaltstart des Motors gelten, wobei Zugeständnisse z.B. hin-

sichtlich des Kraftstoffverbrauchs oder der Fahrzeugmasse hingenommen werden. Aufgrund unterschiedlicher Nutzungsgewohnheiten ist bei Motorrädern im Vergleich zu Pkw die statistische Bedeutung des Kaltstarts jedoch sehr viel geringer, so daß die angesprochene Optimierung nicht notwendigerweise zu praxisgerechten Ergebnissen führt.

Auch für den Bereich der Geräuschemissionen kann festgestellt werden, daß moderne Fahrzeuge aller Kategorien zwischenzeitlich weitgehend auf die Erfüllung der gültigen gesetzlichen Verfahren optimiert wurden. Weitergehende Verschärfungen der bestehenden Grenzwerte können daher im realen Verkehr kaum noch als spürbare Entlastung wahrgenommen werden. Bei Motorrädern ist hierfür hauptsächlich der für die Prüfung vorgeschriebene, in der Praxis allerdings nur selten auftretende Betriebszustand der Vollast bei vergleichsweise moderaten Motordrehzahlen verantwortlich. Besonders bei kleinvolumigen Fahrzeugen mit hohem Drehvermögen stellt dieser Fahrzustand hinsichtlich des emittierten Geräuschpegels keineswegs die ungünstigste und von der Bevölkerung am störendsten wahrgenommene Betriebsart dar.

Möglichkeiten zur Steigerung der Praxisnähe der Meßvorschriften sind daher bereits seit langer Zeit in der Diskussion. Auch hinsichtlich der Weiterentwicklung der bestehenden Geräuschvorschriften kann allerdings nicht ohne weitere Nachprüfung unterstellt werden, daß die oben beschriebenen, für Pkw entwickelten Vorschläge auch für Motorräder zu sinnvollen Ergebnissen führen. Eine Beurteilung und gegebenenfalls Anpassung der bestehenden Vorschläge auf die Verhältnisse des realen Motorradbetriebs steht daher aus und soll im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgenommen werden.

## 4 Typischer Betrieb von Motorrädern

Daten zum Motorradfahren auf öffentlichen Straßen sowie zu Emissionen motorisierter Zweiräder wurden in der Vergangenheit bereits mit unterschiedlichen Zielsetzungen ermittelt, z.B. [86, 92, 93, 100]. Auch bei fzd liegen über das Fahrerverhalten von Motorradfahrern im öffentlichen Straßenverkehr vielfältige Erfahrungen vor [72, 101, 103, 77, 6]. Schwerpunkt war bei diesen Untersuchungen zumeist das Bremsverhalten bzw. das Fahrerverhalten in kritischen Fahrsituationen.

Die Beschreibung motorradspezifischer methodischer Probleme sowie praktische Vorschläge zu deren Lösung finden sich in [72]. Insbesondere konnten die dort genannten Maßnahmen zur Beschreibung und Vermeidung von Gewöhnungseffekten und Abweichungen vom typischen Verhalten von Motorradfahrern für die vorliegende Arbeit übernommen werden (u.a. durch versteckte Datenaufzeichnung, lange Fahrdauer zwecks Eingewöhnung, kein Versuchsbeobachter).

Neben diesen Motorraduntersuchungen wurde das Fahrerverhalten von Pkw-Fahrern umfassend untersucht, z.B. in [10, 17, 39]. Schwerpunkte waren hierbei häufig ebenfalls die Sicherheit und das Verhalten des Fahrers in nicht alltäglichen Fahrsituationen, aber auch das umweltrelevante Fahrerverhalten, wobei überwiegend Fahrten im Stadtverkehr betrachtet wurden.

Über grundsätzliche Erkenntnisse zu Klassifizierungsmöglichkeiten von Fahrerleistungen hinaus besteht ein wesentliches Ergebnis der vorliegenden Untersuchungen darin, daß das Fahrerverhalten von Testpersonen auf abgesperrtem Testgelände nicht unmittelbar auf das Fahrerverhalten im öffentlichen Straßenverkehr übertragen werden kann.

Da sich die bisherigen Untersuchungen vorwiegend auf die Betrachtung von speziellen Einzelsituationen beziehen, z.B. Bremsvorgänge und Notbremsungen, waren für die in dieser Arbeit notwendigen Aussagen zur statistischen Verteilung von Fahrzuständen und Motorbetriebspunkten weitere Versuche im öffentlichen Straßenverkehr erforderlich, deren Zielsetzung, Methodik und Ergebnisse im folgenden beschrieben werden.

### 4.1 Versuchskonzept und –durchführung

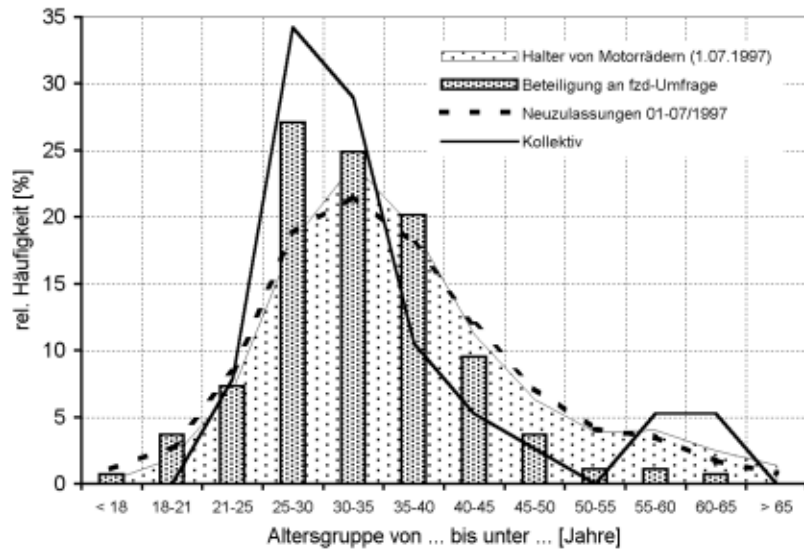
#### 4.1.1 Ermittlung aktueller Daten zum Einsatz von Motorrädern

Um über typische Betriebsbedingungen von Motorrädern Aufschluß zu gewinnen, wurde zunächst eine Umfrage unter Motorradfahrern durchgeführt. Der verwendete Fragebogen und die Mittelwerte aller Antworten sind vollständig im Anhang (ab Seite 107) enthalten. Der Titel der Umfrage „Wie fahren Sie Motorrad?“ wurde möglichst allgemein gehalten, um die Bereitschaft bestimmter Gruppierungen zur Teilnahme und die Ergebnisse nicht vorab zu beeinflussen. Die Verteilung der Fragebögen erfolgte zum einen in Papierform an bekannten Motorradtreffpunkten im Raum Frankfurt/Darmstadt und zum anderen über die Internet-Homepage des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, wobei in verschiedenen Motorrad-Zeitschriften mit einem kurzen Hinweis auf die Aktion aufmerksam gemacht wurde.

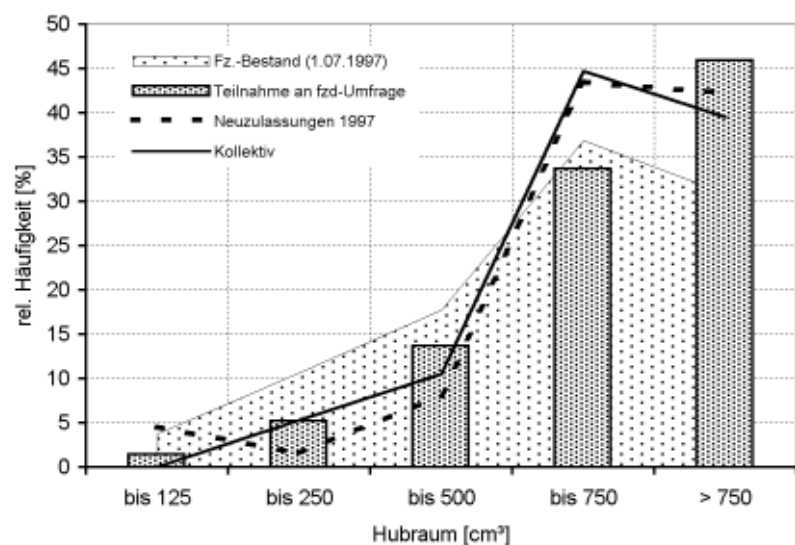
Insgesamt beteiligten sich 273 Personen an der Umfrage, wobei 60 % auf die Papierversion der Fragebögen und 40 % auf den Internet-Fragebogen antworteten. Signifikante Unterschiede in den Antworten, die auf einen Einfluß des Befragungsmediums hätten schließen lassen, konnten nicht gefunden werden, so daß im folgenden eine homogene Befragungsmethodik angenommen wird.

Neben Angaben zur Person und zum überwiegend benutzten Motorrad, die hauptsächlich der Beurteilung der Umfragebeteiligung im Vergleich zu aktuellen Bestandszahlen dienen sollten, wurden die typischen Betriebsbedingungen von Motorrädern erfragt. Außerdem konnten sich die Umfrageteilnehmer als potentielle Probanden für die geplanten Motorradfahrversuche zur Verfügung stellen. **Bild 4.1** zeigt, daß in der Altersverteilung der Antworten im Vergleich zur statistischen Verteilung der Motorradhalter in Deutschland der Anteil jüngerer Fahrer leicht überrepräsentiert war. Der Frauenanteil von 10 % entspricht gut dem Anteil unter den Motorradhaltern in Deutschland. Die von den Teilnehmern überwiegend benutzten Motorräder wiesen im Vergleich zum Fahrzeugbestand in Deutschland etwas größere Hubräume auf und entsprachen damit, abgesehen vom durch die Führerscheinneuregelung ausgelösten Boom bei den Krafträdern mit bis zu 125 cm<sup>3</sup>, gut dem aktuellen Trend der Neuzulassungen, **Bild 4.2**.

Aus den Antworten wurden die statistisch signifikanten Aussagen nach **Tabelle 4.1** abgeleitet. Da die Umfrageergebnisse nicht immer hinreichend gut einer Normalverteilung entsprachen und für die erhobenen Daten unterschiedliche Skalierungsniveaus vorlagen, wurde jeweils der Kor-



**Bild 4.1:** Altersverteilung der Umfrageteilnehmer im Vergleich zu Bestandsdaten (Bestandsdaten nach [62])



**Bild 4.2:** Verteilung der Motorräder der Umfrageteilnehmer im Vergleich zu Bestandsdaten (Bestandsdaten nach [62])

**Tabelle 4.1:** Korrelationsrichtungen und Signifikanzniveaus wesentlicher Umfrageergebnisse  
(+: positive Korrelation, -: negative Korrelation)

	Motorrad		Fahrer	
	Hubraum	Baujahr	Alter	Geschlecht weiblich
Hubraum		+ (< 1%)	+ (< 1%)	- (< 1%)
Baujahr	+ (< 1%)		+ (< 5%)	Unkorreliert
Alter	+ (< 1%)	+ (< 5%)		Unkorreliert
Leistung	+ (< 1%)	+ (< 1%)	+ (< 5%)	- (< 5%)
Jährliche Fahrstrecke mit Krafträdern	+ (< 1%)	Unkorreliert	Unkorreliert	Unkorreliert
Anteil von Fahrten, die andere Verkehrsmittel ersetzen	(-)* (< 5%)	Unkorreliert	Unkorreliert	Unkorreliert
Gesamt-Fahrerfahrung auf Krafträdern	+ (< 1%)	+ (< 5%)	+ (< 1%)	- (< 1%)
Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch	+ (< 1%)	Unkorreliert	Unkorreliert	- (< 1%)

relationskoeffizient nach Bravais-Pearson sowie die Rangkorrelation nach Spearman betrachtet. Die Berechnung von Rangkorrelationen erfordert dabei im Gegensatz zur allgemeinen Korrelationsrechnung von den beteiligten Variablen nicht zwingend eine kardinale, sondern lediglich eine ordinale Skalierung, d.h. eine vorgegebene Rangfolge der Merkmalsausprägungen. Beide Verfahren führten für die dargestellten Zusammenhänge zu gleichen Korrelationsrichtungen. Außer in dem mit (\*) gekennzeichneten Fall ergaben beide Verfahren auch die gleichen Signifikanzniveaus, aus denen sich die Irrtumswahrscheinlichkeit der Aussage ablesen läßt.

Die wichtigsten Aussagen aus **Tabelle 4.1** lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Neuere Motorräder haben tendenziell größere Hubräume und mehr Leistung. Der Praxisverbrauch von Motorrädern ist trotz dieser motorischen Veränderungen unabhängig vom Alter der Maschine, d.h. der Verbrauchsvorteil neuerer Motorkonzepte wird im allgemeinen durch die höhere Motorleistung kompensiert.
- Neuere Motorräder werden häufig von älteren Fahrern gefahren. Diese älteren Fahrer bevorzugen Fahrzeuge mit größerem Hubraum. Die größeren jährlichen Fahrstrecken werden mit hubraumstarken Motorrädern zurückgelegt.
- Eine Abhängigkeit der jährlichen Fahrleistung sowie des überwiegenden Fahrzwecks vom Alter des Motorrads oder von Alter und Geschlecht des Fahrers wurde nicht gefunden. Die oben, **Bild 4.1**, dargestellte Abweichung der Altersverteilung der Umfrageteilnehmer von den Fahrzeughaltern besitzt daher keinen gravierenden Einfluß auf die Bestimmung einer typischen Motorradfahrstrecke aus den Antworten.
- Größere, d.h. hubraumstärkere Motorräder werden häufiger für Freizeitfahrten eingesetzt; ihr Anteil an Fahrten, die alternativ zum Motorrad mit anderen Ver-

kehrsmitteln durchgeführt würden, ist tendenziell geringer, wenn auch auf vergleichsweise geringem Signifikanzniveau.

- Frauen fahren im Vergleich zu Männern bevorzugt kleinere Motorräder und erzielen dadurch geringere Kraftstoffverbräuche. Sie verfügen im allgemeinen über geringere Gesamtfahrerfahrungen. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Geschlecht des Fahrers und den Einsatzbedingungen des Motorrads wurde nicht gefunden.

**Tabelle 4.2:** Vergleich der Mittelwerte der fzd-Umfrage 1997 mit einer Motorradumfrage 1988 [79]

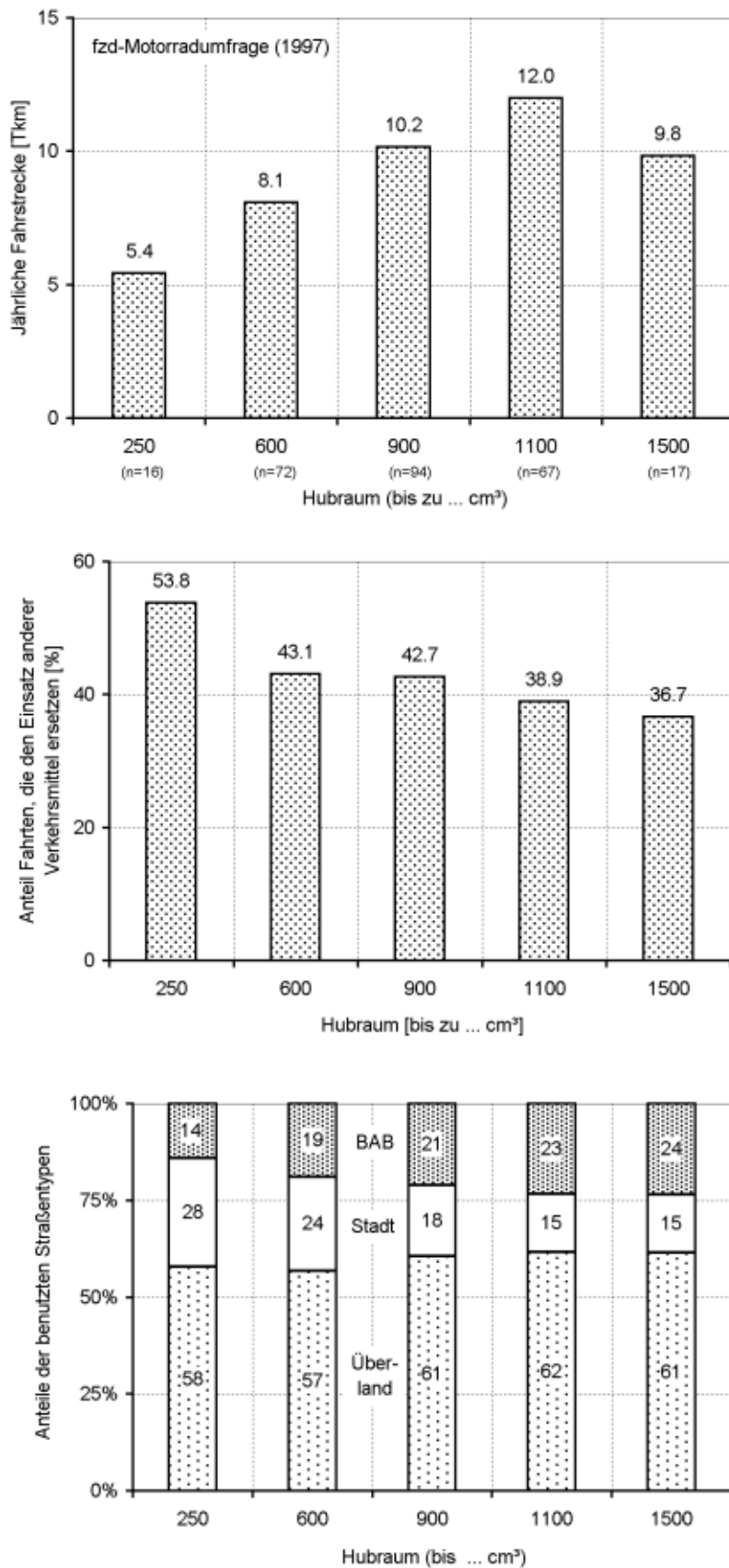
Geschlecht	Alter [Jahre]	jährl. Fahrstrecke [km]	Fahrerfahrung [km]	Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	max. Leistung [kW]
männlich					
1988	28,3	10.145	52.158	549	36,2
1997	32,7	9.959	97.700	780	51,1
weiblich					
1988	25,7	7.959	24.982	522	32,9
1997	30,6	7.480	40.600	599	39,6

Einen Vergleich der Mittelwerte zu verschiedenen Angaben aus der fzd-Umfrage mit den Ergebnissen einer in 1988 unter 1381 Motorradfahrern durch die Motorradpresse Stuttgart durchgeführten Umfrage zu „Motorradfahrern in Deutschland“ [79] zeigt **Tabelle 4.2.**

Nach den neueren Umfrageergebnissen ist der durchschnittliche Motorradfahrer um ca. 4,5 Jahre älter und verfügt über eine diesem Zeitraum entsprechende Zunahme an Fahrerfahrung. Die jährlich mit dem Motorrad zurückgelegten Fahrstrecken sind nach den Angaben beider Umfragen nahezu identisch. Der Trend zu hubraumstärkeren Motorrädern mit höherer Motorleistung zeigt sich vor allem unter den männlichen Fahrern.

Die in beiden Umfragen genannten mittleren Fahrleistungen der Fahrer erscheinen vergleichsweise hoch und deuten darauf hin, daß durch solche Aktionen überwiegend die besonders aktiven Motorradfahrer angesprochen werden.

Offizielle Statistiken [23, 45] schätzen die jährliche Fahrstrecke eines Motorrads auf durchschnittlich ca. 4.000 - 4.500 km pro Jahr, wobei [45] für das Jahr 1990 auch nach dem Hubraum differenziert und für die größte Kategorie ( $\geq 750 \text{ cm}^3$ ) eine jährliche Fahrstrecke von ca. 5.600 km nennt. Zu berücksichtigen ist allerdings auch, daß vergleichsweise viele Motorradhalter über mehr als ein Kraftrad verfügen, so daß die jährliche Fahrstrecke eines Fahrers deutlich höher sein kann als die eines einzelnen Fahrzeugs. Da die „aktiven“ Fahrer ihrerseits den dominierenden Anteil an der jährlichen Gesamtfahrleistung erbringen, erscheint eine Vernachlässigung der statistischen Einflüsse von Gelegenheitsfahrern hinsichtlich der genannten Untersuchungsziele zulässig.



Aus der typischen Nutzung von Motorrädern ergeben sich Hinweise auf eine sinnvolle Klasseneinteilung für Abgas- und Geräuschprüfungen, **Bild 4.3**. Die größten jährlichen Fahrstrecken werden mit Motorrädern mit Hubräumen zwischen 900 und 1200 cm<sup>3</sup> zurückgelegt. Diese Klasse enthält die überwiegende Anzahl der großen und für Langstreckenfahrten ausgerüsteten Tourenmotorräder. Noch größere Hubräume finden sich dagegen überwiegend in Cruiser- oder Chopper-Motorrädern, die für längere Motorradtouren weniger gut geeignet sind. Mit typischen Sportmotorrädern (600 – 900 cm<sup>3</sup>) werden überwiegend geringere jährliche Fahrleistungen erbracht als mit den größeren Tourenmaschinen.

Kleine Motorräder (< 250 cm<sup>3</sup>) werden zu grundsätzlich anderen Verwendungen eingesetzt, häufig z.B. für Fahrten innerhalb von Städten oder als „Nutzfahrzeug“ für die tägliche Fahrt zur Arbeit. Die jährlichen Fahrstrecken dieser Fahrzeugkategorie sind daher signifikant geringer, und ihr Einsatz für Fahrten, die überwiegend Transportzwecken dienen, liegt bei mehr als 50 % und

**Bild 4.3:** Typische Motorradnutzung nach verschiedenen Klassierungen laut fzd-Motorradumfrage

damit oberhalb der anderen Hubraumklassen. Die Nutzung kleiner Motorräder erfolgt häufiger innerhalb des Stadtverkehrs, der Autobahnanteil ist hingegen geringer.

In den in diesem Kapitel vorgestellten Betrachtungen zur typischen Motorradnutzung sind die rein als Stadtfahrzeuge konzipierten Roller und Mopeds nicht enthalten. Unter Berücksichtigung der gezeigten Ergebnisse zur Fahrzeugverwendung könnte eine Klasseneinteilung für zukünftige Abgasanforderungen, wie bereits in [73] vorgeschlagen, die folgenden Klassen enthalten:

- **Kategorie 1:** Hubraum  $< 150 \text{ cm}^3$ , enthält die Stadtfahrzeuge sowie die Leichtkrafträder mit motorradähnlicher Gestaltung, die jedoch nur eine eingeschränkte Tauglichkeit für längere Fahrstrecken aufweisen.
- **Kategorie 2:** Hubraum zwischen  $150 \text{ cm}^3$  und ca.  $400 \text{ cm}^3$ , enthalten wären die großen Motorroller sowie Motorräder für besondere Einsatzbedingungen, z.B. Enduro-Fahrzeuge.
- **Kategorie 3:** Hubraum  $> 400 \text{ cm}^3$ , „große“ Motorräder, die häufig im Freizeitverkehr, z.T. auf langen Touren eingesetzt werden.

Die in der vorliegenden Arbeit getroffenen Aussagen, Vorschläge und Empfehlungen für die Abgas- und Verbrauchsermittlung beziehen sich nach dieser Definition überwiegend auf Fahrzeuge der Kategorie 3. Die Anregungen zur Geräuschemessung können dagegen auch auf Motorräder der Kategorien 1 und 2 übertragen werden.

#### 4.1.2 Fahrerkollektiv, Fahrerklassifizierung

Als wesentliche Kriterien zur Klassifizierung von Fahrerkollektiven gelten nach [10, 17] Fahrerfahrung, Alter und Geschlecht. Daneben sind die generelle Einstellung zum Kraftfahrzeug und zum Fahren selbst (defensive oder aggressive Fahrweise) und zur Gesetzeslage im Bereich des Straßenverkehrs (z.B. Grad der Beachtung von Geschwindigkeitsbeschränkungen) von Bedeutung. Eine nachträgliche Beurteilung ist grundsätzlich möglich durch Bestimmung der beim Fahren erlebten Beanspruchung des Fahrers [17].

Aus orientierenden Vorversuchen stand ein kleines Fahrerkollektiv aus 5 Fahrern zur Verfügung, die aufgrund ihrer Zugehörigkeit zum Fachgebiet über die jeweiligen Untersuchungszusammenhänge unterrichtet waren („Erstkollektiv“, Kollektiv A). Von den 273 Teilnehmern an der fzd-Motorradumfrage erklärten sich 130 (48 %) bereit, an Fahrversuchen im öffentlichen Straßenverkehr teilzunehmen. Aus diesen wurde anhand statistischer Größen, insbesondere der Alters- und Fahrerfahrungsverteilung sowie der Angaben zum eigenen Motorrad, ein weiteres Kollektiv aus 30 Fahrern gebildet, das für die Fahrversuche mit zur Verfügung gestellten und mit versteckter Meßtechnik ausgestatteten Motorrädern eingeladen wurde („Normalkollektiv“, Kollektiv B).

Das ausgewählte Normalkollektiv sollte möglichst gut die Zusammensetzung der Halter von Motorrädern in Deutschland wiedergeben, den Vergleich enthält **Bild 4.1** auf Seite 42. Es zeigt sich, daß der Anteil junger männlicher Fahrer im Vergleich zur Verteilung der Fahrzeughalter im Kollektiv leicht überrepräsentiert war. Die Verteilung der Hubräume der vom Kollektiv gefahrenen Privat-Motorräder entsprach gut den aktuellen Neuzulassungszahlen, vgl. **Bild 4.2** auf Seite 42.

Die Teilnehmer des Erstkollektivs absolvierten die Versuchsfahrten mit zwei verschiedenen Fahraufträgen, zum einen „Fahren wie normal“, zum zweiten „Fahren unter strikter Einhaltung aller Geschwindigkeitsbeschränkungen und mit möglichst niedrigem Drehzahlniveau“ („Normfahrt“). Die Normfahrten dienten dabei zum Vergleich der Wirkungsgrade der eingesetzten Fahrzeuge unter möglichst ähnlichen Belastungen, da die Fahrleistungen bei Fahrten dieses Typs für alle untersuchten Pkw und Motorräder nahezu identisch waren.

Die Fahrer des Normalkollektivs wurden vor den Versuchsfahrten angewiesen, die vorgegebene Strecke zu befahren wie mit einem eigenen Fahrzeug, d.h. besondere Vorgaben hinsichtlich zu wählender Getriebegänge oder Fahrgeschwindigkeiten wurden nicht gemacht. Zusätzlich wurden die Fahrer jeweils ausdrücklich darauf hingewiesen, daß das Ziel der Versuchsfahrten nicht in einem Test des jeweiligen Fahrzeugs besteht, und daß die Folgen eventueller Verkehrsverstöße sowie die übliche Haftung für vorsätzlich oder fahrlässig verursachte Schäden den Fahrer treffen würden.

Hinsichtlich der Fahrweise mit einem ungewohnten Fahrzeug bestehen vermutlich zwei Effekte, die sich grundsätzlich in kompensierender Richtung auswirken sollten. Zum einen neigen die Fahrer dazu, die Leistungsfähigkeit des für sie unbekanntes Fahrzeugs zu erproben, was tendenziell zu einer Steigerung der Fahrleistungen im Vergleich zum eigenen Motorrad beitragen dürfte, zum anderen besteht aus der nicht vollständigen Eingewöhnung und der möglichen Zurückhaltung im Umgang mit fremdem Eigentum die Wahrscheinlichkeit, eine im Vergleich zum normalen Fahrstil eher zurückhaltendere Fahrweise anzuwenden. Aus Beobachtungen des Fahr- und Bremsverhaltens mehrerer Fahrer mit dem eigenen im Vergleich zu einem zur Verfügung gestellten Motorrad kommt [72] zu dem Ergebnis, daß keine auf signifikant unterschiedliches Fahrerverhalten zurückzuführenden Unterschiede bestehen.

#### 4.1.3 Fahrstrecken und Navigation im öffentlichen Verkehr

Anhand der Ergebnisse der Umfrage zu überwiegend benutzten Strecken sowie der Verteilung der Streckentypen im bundesdeutschen Straßennetz, **Bild 4.6**, wurden zwei Versuchsstrecken definiert, auf denen Fahrversuche mit meßtechnisch ausgerüsteten Fahrzeugen durchgeführt wurden, **Bild 4.5**.

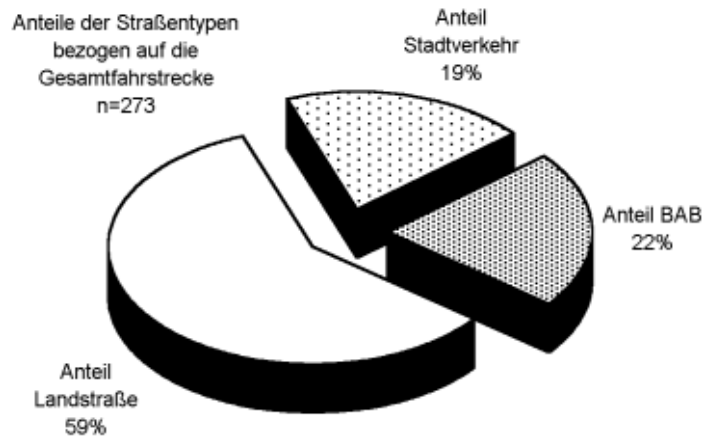
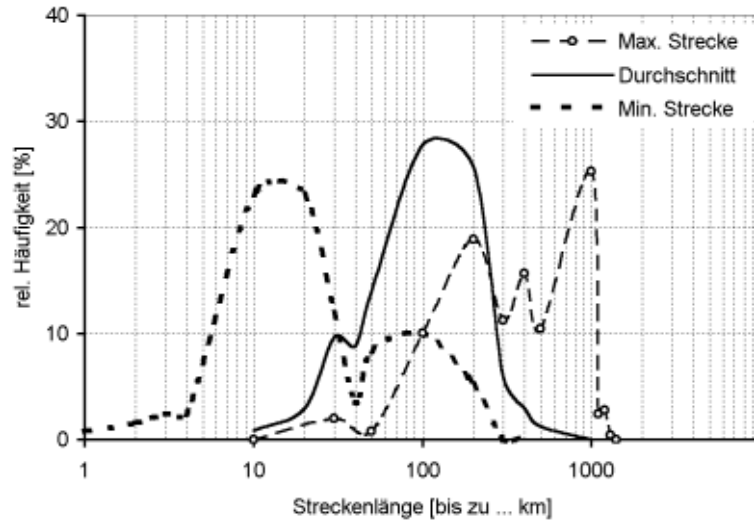
Entsprechend der mittleren Verteilung der Antworten zur Frage nach den während des Motorradfahrens überwiegend benutzten Straßentypen, **Bild 4.4**, setzten sich beide Versuchsstrecken aus ca. 20 % Stadtverkehr, 20 % Autobahn und 60 % Überlandverkehr zusammen.

Strecke A entsprach dabei weitgehend der Versuchsstrecke, auf der bereits von [10, 17, 72] Fahrversuche mit dem Ziel der Beobachtung des Fahrerverhaltens von Pkw- und Motorradfahrern in sicherheitskritischen Situationen durchgeführt wurden. Die Bezeichnung **ManMachineInteraction**-(MMI)-Strecke wurde daher auch für diese Arbeit beibehalten. Aufgrund ihrer Zielsetzung enthielt die Strecke vergleichsweise viele Straßenanteile mit unebenen Fahrbahnbelägen und unübersichtlicher Streckenführung. Durch den modularen Aufbau der Strecke wurde zudem die in dieser Arbeit eingesetzte Navigationsmethode mit GPS-Empfänger erschwert, so daß die fahrerisch etwas weniger anspruchsvolle **VerbrauchsMeßStrecke** (VMS, Versuchsstrecke B) als reiner Rundkurs

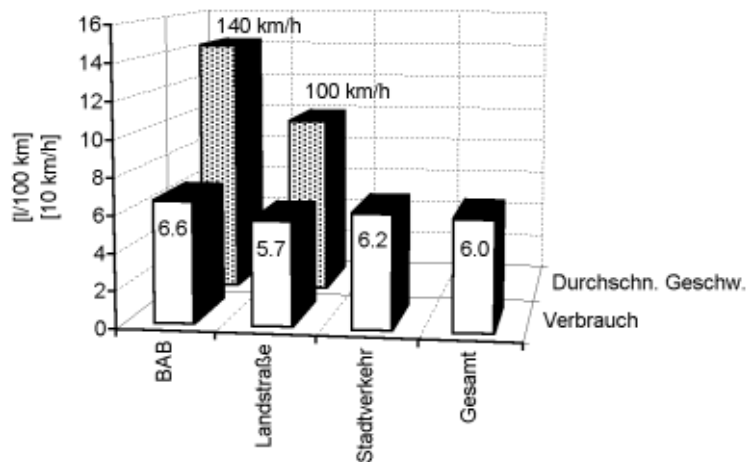
konzipiert wurde. Der Vergleich beider Strecken erlaubt es, den Streckeneinfluß auf die Fahrleistungen zu ermitteln.

Auf beiden Strecken beinhaltet der große Anteil des Überlandverkehrs die Durchquerung kleinerer Ortschaften. Eine Abgrenzung zum echten Stadtverkehr ist in dieser Hinsicht fließend, für die Quantifizierung der Versuchsstreckenanteile wurden zur Charakterisierung des Stadtverkehrs eine Untergrenze für die Länge der Ortsdurchfahrt von mindestens 2 km und das Vorhandensein mehrerer Kreuzungen und Lichtzeichenanlagen verwendet.

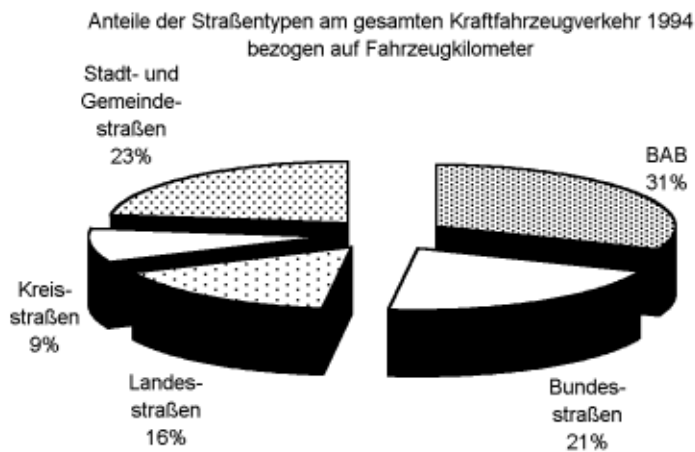
Auf den Versuchsstrecken bestanden zur Zeit der Versuchsdurchführungen die aus **Bild 4.7** zu entnehmenden Geschwindigkeitsbeschränkungen. Unter ständiger Ausnutzung und Einhaltung der geltenden Limits (Annahme: Beschleunigungszeiten = 0, Stillstandszeiten = 0) würden sich für beide Versuchsstrecken ähnliche mittlere Geschwindigkeiten von ca. 70 km/h ergeben.



Umfrageergebnisse: Gewählte Fahrgeschwindigkeiten bei freier Fahrt, mittlere Kraftstoffverbräuche im realen Betrieb, n=273



**Bild 4.4:** Angaben zu typischen Motorradfahrstrecken, gewählten Fahrgeschwindigkeiten und Praxisverbräuchen, Ergebnisse der fzd-Motorradumfrage, 1997



**Bild 4.6:** Verkehrsleistung des Kraftfahrzeugverkehrs nach Straßentypen, Angaben nach [1]

Im Vergleich zur Strecke A (MMI-Strecke, Gesamtlänge 95 km) war die Versuchsstrecke B (VMS) um ca. 3 % länger (97,8 km). Unterschiede bestanden außerdem bezüglich der auf dem Autobahnteilstück zulässigen Höchstgeschwindigkeiten. Bei Versuchsstrecke A war der Autobahnabschnitt im Zeitraum der Versuchsdurchführungen zu 65 % der Strecke auf 130 km/h beschränkt, auf der übrigen Strecke galt die Richtgeschwindigkeit von



Versuchsstrecken

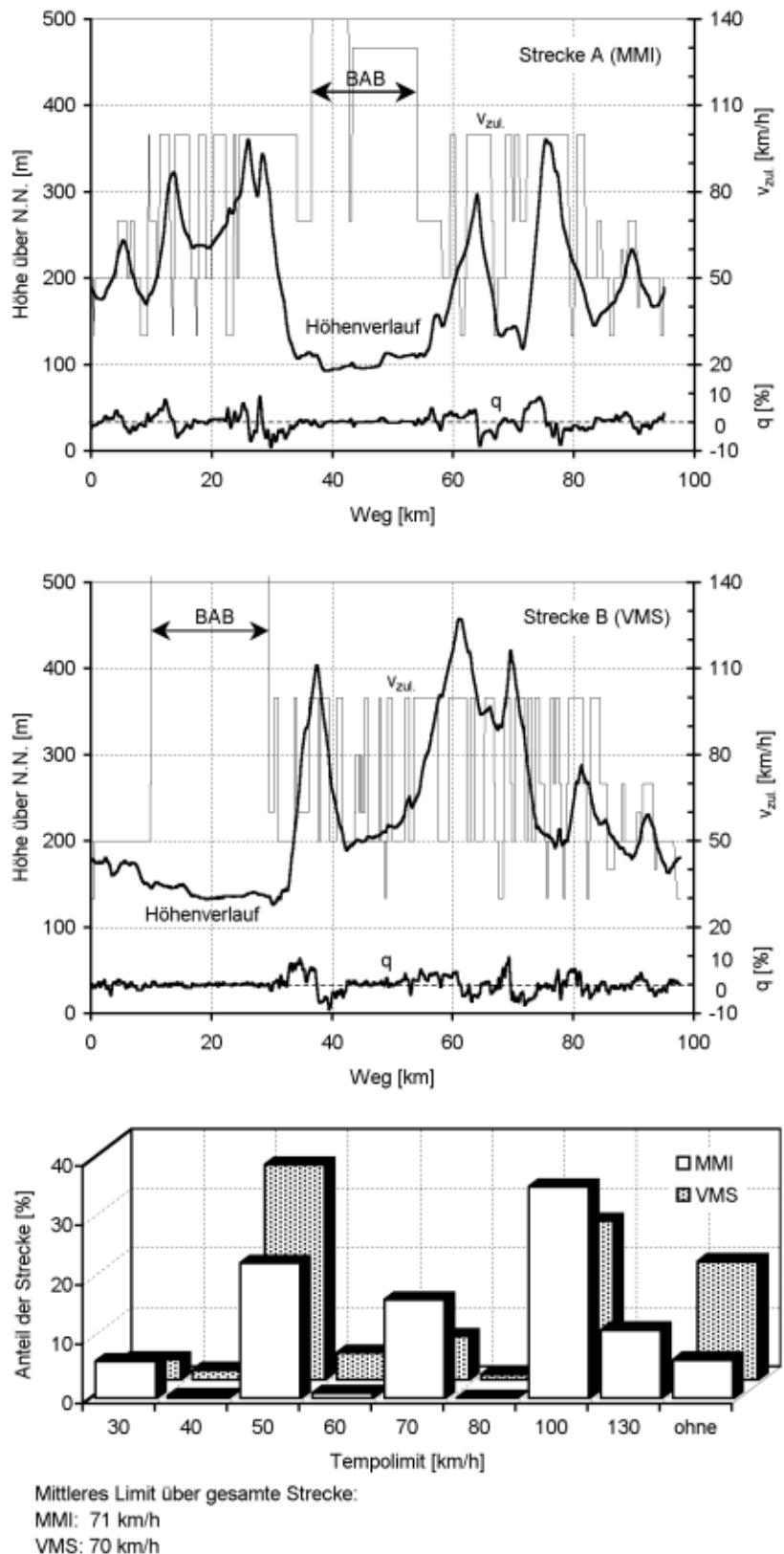
Strecke A (MMI)  
 Länge 95 km  
 22 % Stadtverkehr  
 24 % BAB  
 54 % Überland

Strecke B (VMS)  
 Länge 98 km  
 21 % Stadtverkehr  
 20 % BAB  
 59 % Überland

**Bild 4.5:** Versuchsstrecken für Fahrversuche im öffentlichen Verkehr

130 km/h ohne weitere Beschränkung. Der Autobahnanteil auf Strecke B war vollständig nicht durch ein Tempolimit beschränkt.

Die Navigation während der Versuchsfahrten erfolgte mit Hilfe eines GPS-Empfängers vom Typ Garmin GPS III [38], der im direkten Sichtfeld des Fahrers positioniert wurde, **Bild 4.8**. Dieses System wurde programmiert, indem die Versuchsstrecke vor Beginn der Versuchsreihen einmalig abgefahren und mittels des GPS-Empfängers aufgezeichnet wurde. Während der Versuchsfahrten wurde den Probanden dann jeweils ein Ausschnitt der Versuchsstrecke (ca. 500 m) im Display im direkten Vergleich zur eigenen Position angezeigt. Ergänzt wurden an wichtigen Wegpunkten, z.B. Kreuzungen oder Ausfahrten, kurze textuelle Hinweise zur Fahrtrichtung angegeben. Mit dieser Navigationsmethode wurde ohne äußere Beeinflussung der Probanden, z.B. durch ein begleitendes Versuchsfahrzeug, die gezielte Vorgabe von Fahrtrassen ermöglicht.



**Bild 4.7:** Steigungsprofile und Geschwindigkeitsbeschränkungen der Versuchsstrecken

### 4.1.4 Versuchsfahrzeuge

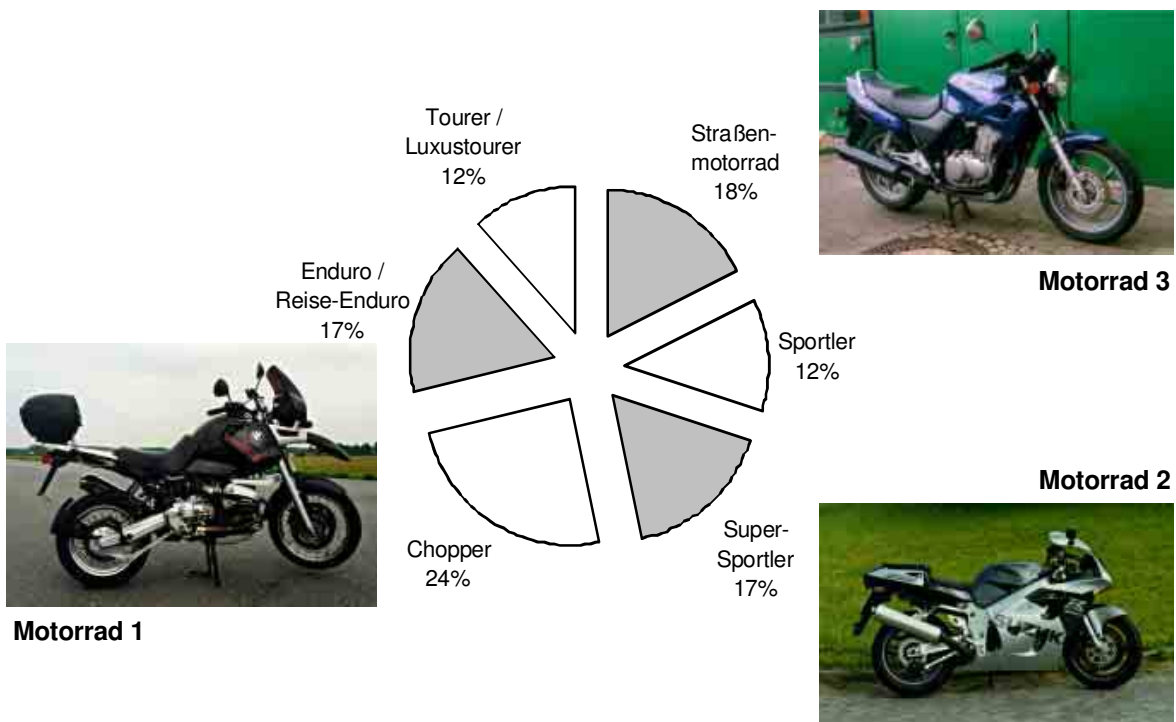
Um einen möglichst großen Querschnitt typischer Fahrzeuge abzudecken, wurden verschiedene serienmäßige Fahrzeuge benutzt, vgl. Tabelle A.1, Seite 107. Neben Motorrädern wurden hierbei auch Pkw der Mittelklasse eingesetzt, um Aussagen zu durch das Fahrzeugprinzip hervorgerufenen grundsätzlichen Unterschieden und zum Gesamtwirkungsgrad der Fahrzeugkonzepte abzuleiten.

Motorrad 1 stellt eine großvolumige Touren-Enduro mit auf vergleichsweise niedrige Drehzahlen ausgelegter Motorcharakteristik dar. Das Motorrad ist mit einem Zweizylinder Motor mit 1100 cm<sup>3</sup>, elektronischer Einspritzanlage (Alpha-n-Steuerung) und geregelterm Katalysator ausgerüstet, was für Motorräder hinsichtlich des Abgasverhaltens derzeit den Stand der Technik dargestellt. Die Gemischbildung erfolgt in mittleren Kennfeldbereichen stöchiometrisch, während zur Leerlaufstabilisierung sowie bei hohen Lasten und Drehzahlen eine Gemischanfettung vorgenommen wird. Im Schubetrieb wird die Kraftstoffzufuhr unterbrochen.

Motorrad 2 gehört zur aktuell in Deutschland sehr populären Art der sportlich ausgerichteten Motorräder mit hochdrehendem Vierzylinder-Reihenmotor, einem Hubraum von



**Bild 4.8:** GPS-Navigationssystem



**Bild 4.9:** Verwendete Versuchsfahrzeuge im Vergleich zu Motorrad-Neuzulassungen in Deutschland 1997 (Zahlenwerte für Neuzulassungen nach [52])

600 cm<sup>3</sup> und auf geringe Fahrzeugmasse optimierter Gestaltung. Zusatzsysteme zur Verringerung der Abgasemissionen gegenüber den Rohemissionen des Motors sind nicht vorhanden. Konzeptbedingt wird diese Form von Motorradmotoren aufgrund des hohen Drehzahlniveaus und zur Steigerung der spezifischen Leistung überwiegend mit unterstöchiometrischem Gemisch betrieben.

Motorrad 3 repräsentiert ein typisches Einsteigerfahrzeug in der Form eines klassischen Straßenmotorrads mit einem 500 cm<sup>3</sup> Zweizylinder-Reihenmotor. Aufgrund der Motorleistungsbeschränkung im derzeitigen Führerscheinrecht wird das Motorrad in Deutschland auch in einer von 43 kW auf 25 kW leistungsgedrosselten Variante angeboten. Die Drosselung, die am verwendeten Versuchsfahrzeug vorhanden war, erfolgt durch eine Verringerung des Ansaugquerschnitts mit Hilfe von Blenden in den Saugrohren motorseitig unterhalb der beiden Vergaser sowie durch eine angepaßte Vergaserbedüsung. Zur nachträglichen Oxidation der unverbrannten Kohlenwasserstoffe wird bei diesem Motorrad über ein Sekundärluftsystem unterdruckgesteuert Ansaugluft in die beiden Abgaskrümmen eingeblasen.

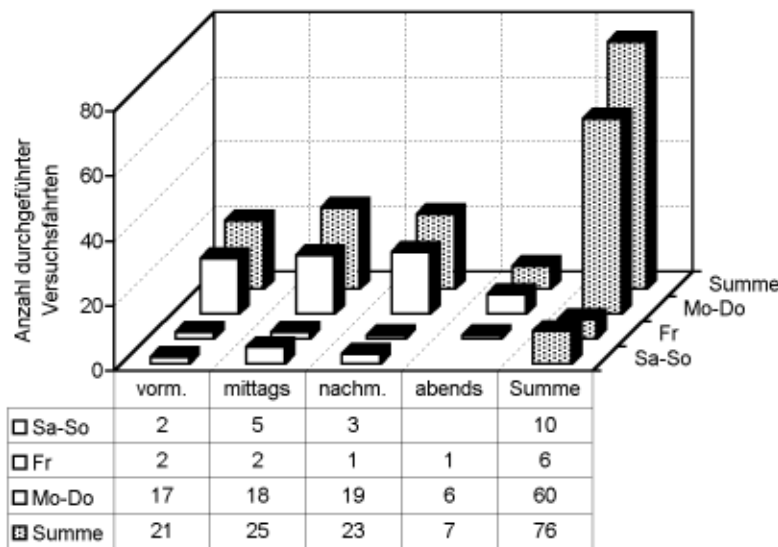
Die ausgewählten Motorräder repräsentieren einen Querschnitt über die derzeit in Deutschland im Markt befindlichen Modelle, **Bild 4.9**. Die Untersuchungen beziehen sich dabei ausschließlich auf Motorräder im Sinne der oben, vgl. Seite 46, vorgeschlagenen Zweirad-Kategorie 3, d.h. die überwiegend als Stadtfahrzeuge entwickelten und eingesetzten Zweiräder mit weniger als ca. 400 cm<sup>3</sup> werden hier nicht berücksichtigt.

Die Pkw wurden nicht im Sinne vergleichbarer Marktzugehörigkeiten oder Fahrleistungspotentiale ausgewählt, sondern sollten, ähnlich wie die Motorräder, typische Vertreter häufig im Markt befindlicher Fahrzeugklassen sein. Dementsprechend gehört Pkw 1 zur unteren Mittelklasse und ist ausgerüstet einem Vierzylinder mit 1600 cm<sup>3</sup>, einer Zentraleinspritzung und geregelter Katalysator.

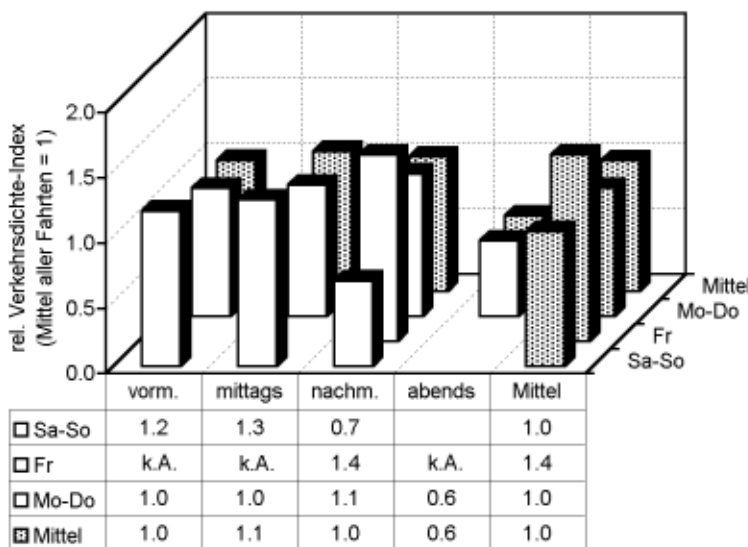
Pkw 2 ist ein Mittelklasse-Fahrzeug mit direkteinspritzendem Otto-Motor (Vierzylinder, 1800 cm<sup>3</sup>) und elektronisch geregelter Common-Rail Hochdruckeinspritzung und stellt damit ein vergleichsweise neuartiges und mit den Argumenten geringen Kraftstoffverbrauchs und niedriger Schadstoffemissionen beworbenes Konzept dar. Die mit diesem Fahrzeug durchgeführten Untersuchungen erfolgten in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen der TU Darmstadt. Umfassende Angaben zu Technik und Motorregelung des Fahrzeugs sind [44, 51] zu entnehmen. Der Motor besitzt verschiedene Betriebsbereiche mit unterschiedlicher Gemischzusammensetzung. In der unteren Teillast erfolgt ein geschichteter Motorbetrieb, bei dem die Gemischzusammensetzung im Brennraum gezielt inhomogen gestaltet wird. Um den NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator zu leeren, wird periodisch auf homogen unterstöchiometrischen Betrieb umgeschaltet. Im Bereich der mittleren Teillast erfolgt eine homogene überstöchiometrische Gemischbildung, die mit zunehmender Last in das stöchiometrische Verhältnis übergeht. In der oberen Teillast, bei Vollast sowie generell bei hohen Drehzahlen erfolgt eine Umschaltung auf unterstöchiometrischen Betrieb [44]. Erwartungsgemäß hängen Kraftstoffbedarf und Emissionszusammensetzung insbesondere bei diesem Pkw daher sehr stark von der Wahl der Betriebspunkte, d.h. vom Fahrerverhalten ab.

### 4.1.5 Wesentliche externe Einflußparameter

Bezüglich der typischen Zusammensetzung von Motorradfahrten ist grundsätzlich von großen inter- und intraindividuellen Streuungen auszugehen, wie bereits eine Betrachtung des alltäglichen Verkehrsgeschehens nahelegt. Zwischen der täglichen Fahrt zur Arbeit über wenige Kilometer, die z.B. aus Kosten- oder Parkraumgründen zuweilen mit dem Motorrad unternommen wird, und der mehrtägigen Urlaubsreise mit Tagesetappen von 1000 km und mehr treten dabei alle Variationen mit mehr oder weniger großer Häufigkeit auf.



**Bild 4.10:** Wochentage und Startzeiten der Versuchsfahrten mit den Motorrädern 1 – 3, Normalkollektiv (30 Fahrer), Versuchsstrecke B



**Bild 4.11:** Verteilung der Verkehrsdichte laut anschließender Befragung der Versuchsteilnehmer über der Startzeit

Ziel der vorliegenden Arbeit war jedoch nicht die Beschreibung der möglichen Extremfälle, sondern die Abbildung der bezüglich ihrer Häufigkeit als relevant erachteten Fälle. Zur Thematik der überwiegend innerstädtischen Nutzung von Motorrädern in Ballungszentren und Großstädten sowie außerhalb Deutschlands besteht über diese Arbeit hinausgehend noch Bedarf, die Übertragbarkeit der hier gewonnenen Ergebnisse sicherzustellen.

Als wesentliche externe Einflußgröße ist die momentane Verkehrsdichte anzusehen, die u.a. in Abhängigkeit von Tageszeit und Wochentag stark schwankt. Die vorgestellten Fahrversuche wurden daher unter Variation der Startzeit und des Wochentages durchgeführt, **Bild 4.10**.

Im Anschluß an die Versuchsfahrten wurden die Fahrer zur Verkehrsdichte auf den verschiedenen Streckenabschnitten be-

fragt. Hierbei wurde der Verkehrsfluß auf den Streckenabschnitten Stadtverkehr, Autobahn und Überlandverkehr anhand einer 5-stufigen Skala von „freie Fahrt“ (=0) bis „Stau“ (=4) beurteilt. Zur Bestimmung der Stärke der mittleren Verkehrsbehinderung wurde anschließend ein Summenwert über alle Streckenabschnitte als Verkehrsdichteindex für jede Versuchsfahrt definiert.

Aus den Antworten wurden für die verschiedenen Versuchszeitpunkte die Verkehrsdichte-Kenngrößen nach **Bild 4.11** bestimmt, wobei der Mittelwert aller Versuchsfahrten zu Eins gesetzt wurde. Die so errechneten Größen korrelieren allerdings im Einzelfall nicht mit den tatsächlichen Fahrleistungen, beurteilt z.B. anhand der Durchschnittsgeschwindigkeiten oder der Fahrzeiten.

Ein großer Teil der Fahrten mit großen Motorrädern findet als Freizeitverkehr an Wochenenden statt [35, 73], wobei häufig landschaftlich und fahrdynamisch interessante Nebenstraßen aufgesucht werden, so daß die vorgefundene Verkehrsdichte im Mittel vergleichsweise gering sein dürfte.

Zur besseren Beschreibung des Einflusses der Verkehrsdichte auf die Fahrleistungen erscheinen weitere Forschungsarbeiten sinnvoll. Ansätze hierfür könnte ein Vergleich der aktuellen Fahrgeschwindigkeiten mit Mittelwerten mehrerer Fahrten auf der bekannten Strecke liefern.

Von Einfluß ist auch das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer im unmittelbaren Verkehrsumfeld. Gerade bei Motorradfahrern, die das Fahren als sportliche Betätigung empfinden, kann sowohl aus der Streckenführung an sich als auch aus aufforderndem Verhalten anderer Motorradfahrer eine Steigerung der eigenen Fahrleistungen resultieren. Dieser Einfluß wurde anhand orientierender Versuche abgeschätzt, in denen sich auf ausgewählten Streckenabschnitten ein weiterer Motorradfahrer von hinten dem Probanden näherte und diesem im üblichen Sicherheitsabstand folgte, ohne eine Überholabsicht anzuzeigen. Anhand der Meßdaten des Versuchsfahrzeugs und einer versteckten Videoaufzeichnung des Versuchsfahrers vom folgenden Motorrad aus konnte das Fahrerverhalten anschließend analysiert werden.

In ähnlicher Weise wie bei Untersuchungen, die sich mit dem Einfluß vorhandener Sicherheitseinrichtungen (z.B. ABS-Bremsanlagen) auf das Fahrerverhalten unter dem Aspekt der Risikokompensation beschäftigen [72], können auch auf die vorliegende Fahrsituation reagierende und nicht reagierende Fahrer unterschieden werden. Die beobachteten Reaktionen auf den folgenden, schnelleren Motorradfahrer reichten dabei vom Reduzieren der eigenen Fahrgeschwindigkeit, um diesen überholen zu lassen, bis zu merklichen Erhöhungen der eigenen Fahrgeschwindigkeit und Verwenden höherer Motordrehzahlen auf seiten des Probanden. Die Anzahl der auf diese Art untersuchten Situationen reicht dabei allerdings nicht aus, um an dieser Stelle statistisch abgesicherte Erkenntnisse zur Beeinflussung des Fahrerverhaltens abzuleiten, wie sie beispielsweise bei Gruppenfahrten mit mehreren Motorrädern entstehen.

## 4.2 Betriebsweise im realen Verkehr

### 4.2.1 Vergleich von Fahrleistungen und Reisezeiten

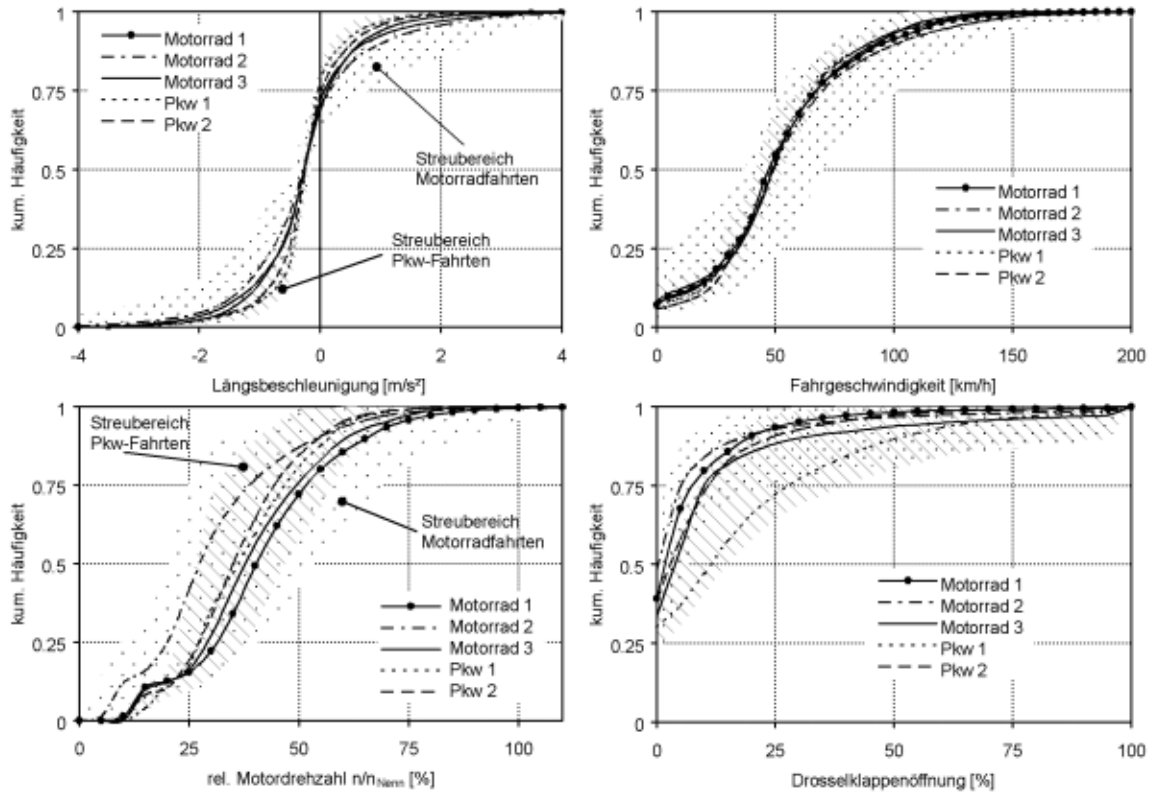
In **Bild 4.12** sind die kumulierten Häufigkeiten für die Fahrgeschwindigkeit, die Längsbeschleunigung, die Motordrehzahl relativ zur jeweiligen Nenndrehzahl sowie für die Drosselklappenbetätigung für die verwendeten Versuchsfahrzeuge dargestellt. Dazu wurden jeweils alle verfügbaren Daten zu jedem Fahrzeug gemittelt. Der für jedes Fahrzeug eingetragene Mittelwert der Verteilungen sollte daher die Einflüsse der Fahrweise der verschiedenen Fahrer, der Fahrstrecke (VMS- oder MMI-Strecke) sowie der im Einzelfall vorliegenden Randbedingungen wie Verkehrsdichte oder Witterungsverhältnisse weitgehend glätten. Für die Pkw und Motorräder sind darüber hinaus die Streubereiche für die Verteilungen aller Versuchsfahrten eingetragen, um die grundsätzliche Unterschiede der Fahrzeuge zu veranschaulichen.

Die im realen Verkehr erbrachten Fahrleistungen, z.B. beurteilt anhand der Verteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten, hängen, wie die größere Streubreite bei den Motorrädern verdeutlicht, bei diesen in sehr starker Weise und mehr als beim Pkw vom Fahrer ab. Insbesondere die Verteilung der Drosselklappenbetätigung zeigt, daß das vorhandene Potential der Motorräder nur gering ausgenutzt wird bzw. werden kann.

Die Häufigkeitsverteilungen der Fahrgeschwindigkeiten aller untersuchten Fahrzeuge unterscheiden sich nur in geringem Maße, wobei die Verteilungen der Beschleunigungen sowohl im positiven (Antreiben) als auch im negativen Bereich (Bremsen) die grundsätzlich höhere Dynamik des Motorradbetriebs belegen.

Eine anschauliche Darstellung der Zusammensetzung der Fahrt aus verschiedenen Fahrzuständen ergibt sich, wenn anstelle der Fahrgeschwindigkeit der Kehrwert der Geschwindigkeit als streckenbezogene Reisezeit in Sekunden pro Kilometer betrachtet wird. In **Bild 4.13** sind die Mittelwerte der streckenbezogenen Reisezeiten, d.h. die durchschnittliche Fahrdauer für jeweils einen Kilometer der Fahrstrecke, für die einzelnen Versuchsreihen dargestellt, wobei eine Aufteilung in Zeitanteile mit konstanter Fahrgeschwindigkeit sowie Beschleunigungs- und Verzögerungsanteile vorgenommen ist. In Anlehnung an vorliegende Arbeiten [39] wird die konstante Fahrt, die im realen Verkehr nur schwer in idealer Form zu realisieren ist, dabei als Fahrzustand definiert, bei dem der Betrag der Längsbeschleunigung kleiner  $0,11 \text{ m/s}^2$  und die Fahrgeschwindigkeit größer als Schrittgeschwindigkeit ( $4 \text{ km/h}$ ) ist.

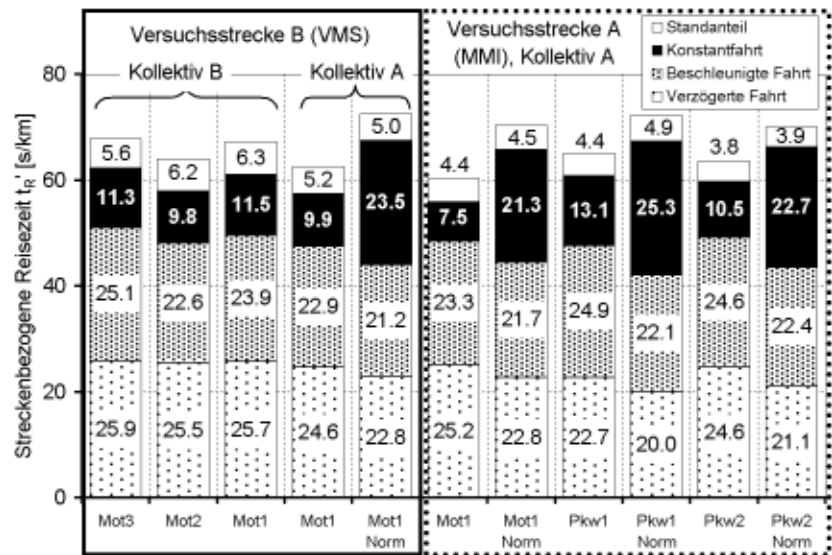
Die Darstellung nach **Bild 4.13** dient zur Abschätzung der grundsätzlichen Vergleichbarkeit der typischen Fahrweise auf beiden Versuchsstrecken sowie des durchschnittlichen Fahrerhaltens der Fahrerkollektive. Ein Überblick über den Einfluß der Fahrzeuge kann ebenfalls abgelesen werden, wobei detailliertere Betrachtungen zu den genannten Einflußgrößen sowie zu relevanten Einzelabschnitten der Strecken in den anschließenden Kapiteln folgen.



**Bild 4.12:** Zeitliche Häufigkeitsverteilungen von Fahrgeschwindigkeit, Beschleunigung, relativer Motordrehzahl und Drosselklappenbetätigung

Die längsten Reisezeiten, d.h. die geringsten durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeiten ergeben sich mit 70 – 72 s/km unabhängig von Fahrzeug (Pkw oder Motorrad) und Versuchsstrecke für die vom Erstkollektiv vorgenommenen Normfahrten (maßvolles Beschleunigen, niedrige Drehzahlen, strikte Einhaltung der StVO). Bei diesen Fahrten ist auch der Konstantfahranteil mit 30 – 35 % der gesamten Fahrdauer am höchsten und damit ca. doppelt so hoch wie während der freien Fahrten.

Im Vergleich der Versuchsstrecken liegt die mittlere Standzeit auf der MMI-Strecke mit 3,8 – 4,9 Sekunden pro Kilometer niedriger als auf der VMS (5,0 – 6,3 s/km), was auf einen etwas besseren Verkehrsfluß auf dieser Stre-



**Bild 4.13:** Streckenbezogene Reisezeiten der Fahrerkollektive mit verschiedenen Fahrzeugen auf den Versuchsstrecken A und B

cke hindeutet. Wie die Normfahrten und die freien Fahrten des Erstkollektivs mit Motorrad 1 zeigen, sind sowohl die streckenbezogenen Reisezeiten als auch die Zusammensetzung der Fahrdauer aus Stand-, Konstantfahr- und Beschleunigungsanteil der beiden Strecken über der gesamten Fahrdauer gut vergleichbar.

Während der freien Fahrten erreicht das kleine Erstkollektiv durchschnittlich höhere Geschwindigkeiten als das aus 30 Fahrern bestehende Normkollektiv. Die Reisezeiten des Erstkollektivs mit Motorrad 1 auf der VMS sind nahezu identisch mit denen des Normkollektivs unter Benutzung des leistungstärkeren Motorrads 2.

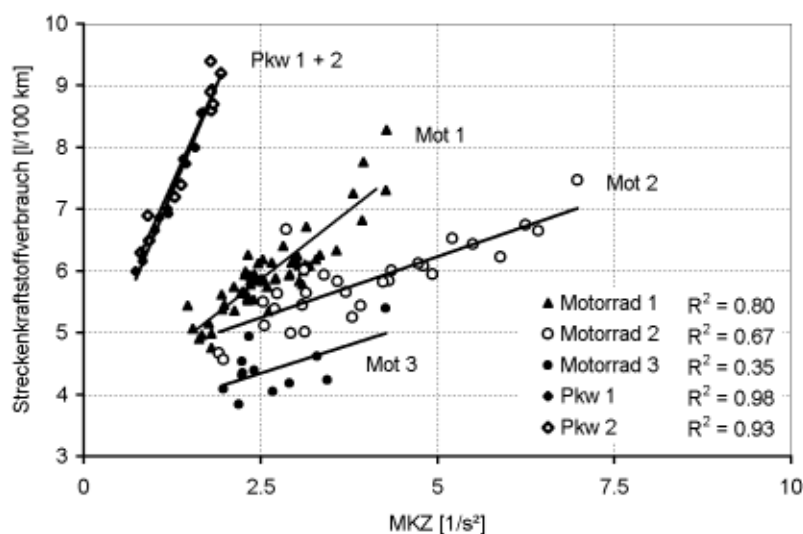
Die streckenbezogenen Zeitanteile mit verzögerter Fahrt aller Motorradfahrten mit Ausnahme der Normfahrten unterscheiden sich nur in sehr geringem Maße (zwischen 24,6 und 25,9 s/km). Deutlichere Unterschiede bestehen in den Beschleunigungszeiten, die erwartungsgemäß mit zunehmender Motorisierung für beide Fahrzeugkategorien abnehmen. Das vergleichsweise leistungsschwache Motorrad 3 führt im Vergleich aller Motorrad-Versuchsfahrten zum größten Zeitanteil der beschleunigten Fahrt, vergleichbar mit den Beschleunigungsanteilen mit den Pkw während der freien Fahrten.

#### 4.2.2 Kraftstoffverbrauch und Gesamtwirkungsgrade

Um den Einfluß der Fahrweise auf den Kraftstoffverbrauch zu quantifizieren, wurde in [39] eine Motorbetriebskennzahl (MKZ) definiert, die sich gemäß Formel 4.1 berechnet.

$$MKZ = \frac{n_{Fahr,mittel} \cdot a_{mittel}}{v_{Fahr,mittel}} \tag{4.1}$$

Hierin stellt die mittlere Fahrzeugbeschleunigung während der Beschleunigungsphasen der Meßfahrten eine näherungsweise Größe für die abgerufene Motorlast dar, was aufgrund der Vernachlässigung der übrigen Fahrwiderstände jedoch nur für geringe Fahrgeschwindigkeiten sinnvoll erscheint. Definitionsgemäß berücksichtigt die MKZ außer-



dem keine fahrzeugspezifischen Besonderheiten wie die Fahrzeugmasse und die Nenndrehzahl des Motors. Für unterschiedliche Fahrzeugkategorien wie Pkw und Motorräder sind daher grundsätzlich unterschiedliche Wertebereiche der MKZ zu erwarten.

Für den Betrieb von Pkw im Stadtverkehr zeigte sich in [39] eine befriedigende Korrelation der MKZ mit dem Kraftstoffverbrauch, die für die hier

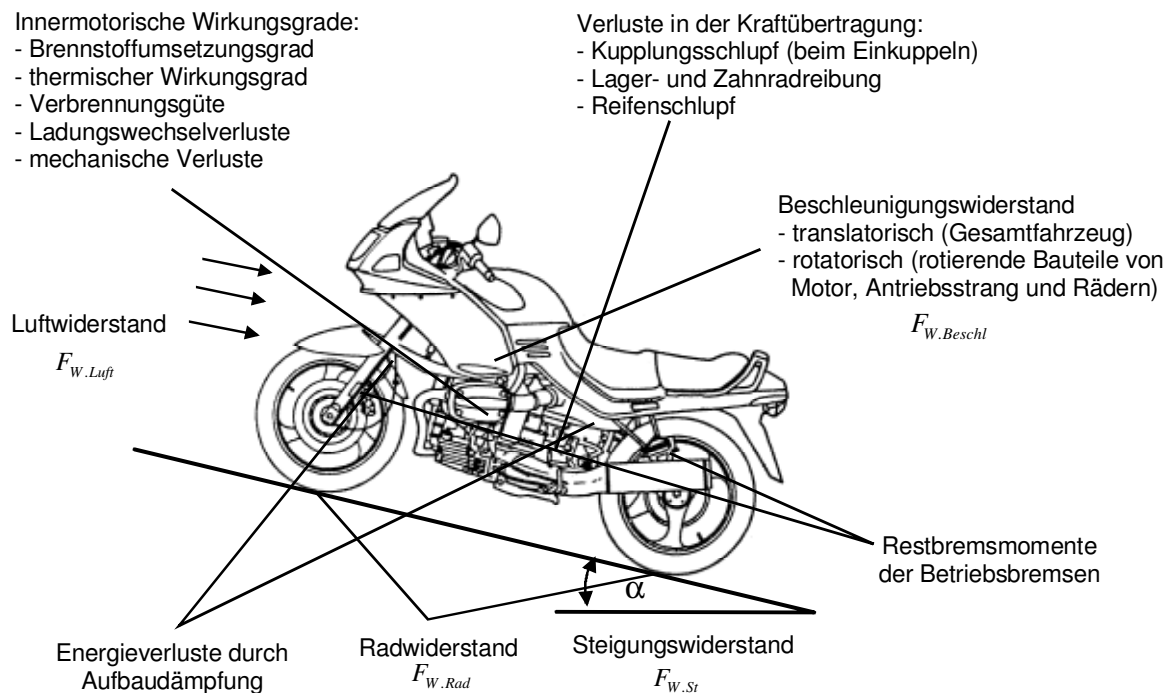
**Bild 4.14:** Motorbetriebskennzahlen und Streckenkraftstoffverbräuche

durchgeführten Pkw-Versuchsfahrten bestätigt werden konnte, **Bild 4.14**. Im Vergleich zum reinen Stadtverkehr liegen Fahrverbrauch und Streckenkraftstoffverbrauch während der verwendeten kombinierten Stadt-/Überlandfahrten nahe beisammen, so daß zur Gegenüberstellung hier der Streckenkraftstoffverbrauch herangezogen wurde.

Wie zu erwarten, liegen die MKZ der Motorräder in **Bild 4.14** aufgrund des höheren Drehzahlniveaus und Beschleunigungsvermögens deutlich höher. Die Bestimmtheitsmaße einer Korrelationsrechnung ( $R^2$ ) zeigen tendenziell schwächere Korrelationen zwischen der MKZ und dem Verbrauch für die Motorräder im Vergleich zu den Pkw. Besonders für das leistungsschwächere und mit dem im Vergleich geringsten Hubraum ausgestattete Motorrad 3 kommt dieses zum Ausdruck. Hieraus wird deutlich, daß für die Motorräder neben den in der Berechnung der MKZ berücksichtigten Größen weitere Einflüsse des Fahrerverhaltens von großer Bedeutung sind.

Eine weitergehende Beschreibung der während der Versuchsfahrten vorliegenden motorischen Betriebsbedingungen soll im folgenden durch eine Betrachtung der über der Gesamtdauer der Meßfahrt beobachteten Betriebspunkte hinsichtlich Last und Drehzahl erfolgen. Neben der direkt gemessenen Motordrehzahl ist hierzu die jeweilige Motorlast erforderlich, die aus den aktuellen Fahrwiderständen näherungsweise ermittelt werden kann.

Dazu wird aus dem gemessenen Geschwindigkeitsverlauf jeder Meßfahrt in Verbindung mit den relevanten Fahrwiderstandsgrößen (Gesamtmasse, Indizes für Luft- und Rollwiderstand, Massenfaktor) zu jedem Zeitpunkt einer Versuchsfahrt die aktuelle Fahrwiderstandsleistung berechnet gemäß Formel 4.2:



**Bild 4.15:** Wirkungsgrade und Fahrwiderstände

$$P_{W,ges} = (F_{W,Rad} + F_{W,Luft} + F_{W,Beschl} + F_{W,Steig}) \cdot v \quad (4.2)$$

Die hierbei zugrunde gelegten mechanischen Größen und Wirkungsgrade veranschaulicht **Bild 4.15**, das in vergleichbarer Weise auch für Pkw gilt.

Die einzelnen Widerstandskräfte berechnen sich wie folgt, wobei die erforderlichen Größen und Indizes experimentell in Ausroll- und Beschleunigungsversuchen ermittelt werden:

### Radwiderstand

$$F_{W,Rad} = m \cdot g \cdot f_{Roll} \cdot \cos(\alpha) \quad (4.3)$$

Aufgrund der Bestimmung des Rollwiderstandsindex durch Ausrollversuche werden hierbei die Restbremsmomente der Betriebsbremsen, soweit sie eine zeitlich konstante Größe aufweisen, mit berücksichtigt. Vernachlässigt werden hingegen Widerstandskräfte, die aus der Veränderung einer nachgiebigen Fahrbahnoberfläche (z.B. auf unbefestigten Wegen oder bei grober Fahrbahnverschmutzung) bzw. der Verdrängung eines Zwischenmediums zwischen Reifen und Straße resultieren (z.B. Schwallwiderstand eines Wasserfilms bei nasser Fahrbahn).

### Luftwiderstand

$$F_{W,Luft} = \frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot v_{rel}^2 \quad (4.4)$$

Die Luftdichte wird hierbei mit  $1,186 \text{ kg/m}^3$  als konstant angenommen, wodurch besonders der Einfluß von Außentemperaturschwankungen vernachlässigt wird. Die erforderlichen fahrzeugspezifischen Größen werden aus Ausrollversuchen bestimmt. Bei Motorrädern treten Veränderungen des Luftwiderstandsbeiwerts und der wirksamen Stirnfläche durch den Fahrer auf, z.B. durch variierende Sitzhaltung, Körperabmessungen und Kleidung. Diese werden in den vorliegenden Berechnungen nicht berücksichtigt, d.h. es wird eine jeweils mittlere Sitzhaltung und Körpergröße angenommen. Speziell auf den Autobahnabschnitten mit sehr hohen Fahrgeschwindigkeiten tritt hierdurch eine gelegentliche Überschätzung des tatsächlichen Luftwiderstands auf, da sich einige Fahrer bei sehr hohen Tempi in eine geduckte Fahrerhaltung begeben. Darüber hinaus wird der Einfluß von Rücken- oder Gegenwind vernachlässigt, d.h. die Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Umgebungsluft wird mit der Fahrzeuggeschwindigkeit über Grund gleichgesetzt.

### Beschleunigungswiderstand

$$F_{W,Beschl} = e_m \cdot m_{ges} \cdot a \quad (4.5)$$

Hierin stellt  $e_m$  den Massenfaktor dar, der die Trägheit der am und im Fahrzeug rotierenden Bauteile (Räder, Antriebsstrang) als scheinbare Erhöhung der translatorisch zu beschleunigenden Gesamtmasse beschreibt. Da die hier beschriebenen Berechnungen

sich stets auf den Bezugspunkt Motorausgang/Kupplung beziehen, spielt der eingelegte Getriebegang für die Ermittlung des benötigten Massenfaktors eine untergeordnete Rolle. Zu berücksichtigen wäre lediglich der Anteil der nach dem Einkuppeln mit Motordrehzahl rotierenden Getriebeeingangswelle. Daher wird der Massenfaktor, der für ein spezielles Motorrad durch Trägheitsmomentbestimmungen der beteiligten Bauteile aus früheren Untersuchungen bekannt ist, für alle Fahrzeuge mit 1,03 als konstant angenommen.

### Steigungswiderstand

$$F_{W,St} = m_{ges} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \approx m_{ges} \cdot g \cdot q \quad (4.6)$$

Das Steigungsmaß  $q$  der Versuchsstrecken wurde auf deren gesamter Länge bestimmt. Hierzu wurde für ca. 5 mit geringer Dynamik durchgeführte Versuchsfahrten ein Differenzsignal aus der gemessenen Längsbeschleunigung und der differenzierten Fahrgeschwindigkeit gebildet. Dieses Differenzsignal ist unter Vernachlässigung von Nickbewegungen des Fahrzeugs, die durch zeitliche Filterung unterhalb der ersten Aufbau-eigenfrequenzen eliminiert wurden, überwiegend auf den Einfluß der Erdbeschleunigung auf das Signal des Beschleunigungssensors beim Befahren von Steigungs- oder Gefällstrecken zurückzuführen. Das aus einer Mittelung dieser Steigungssignale errechnete Steigungsprofil wurde zusätzlich mit den Ergebnissen einer barometrischen Höhenbestimmung abgeglichen, die bei stabiler Wetterlage an ausgewählten Positionen der Versuchsstrecke erfolgte.

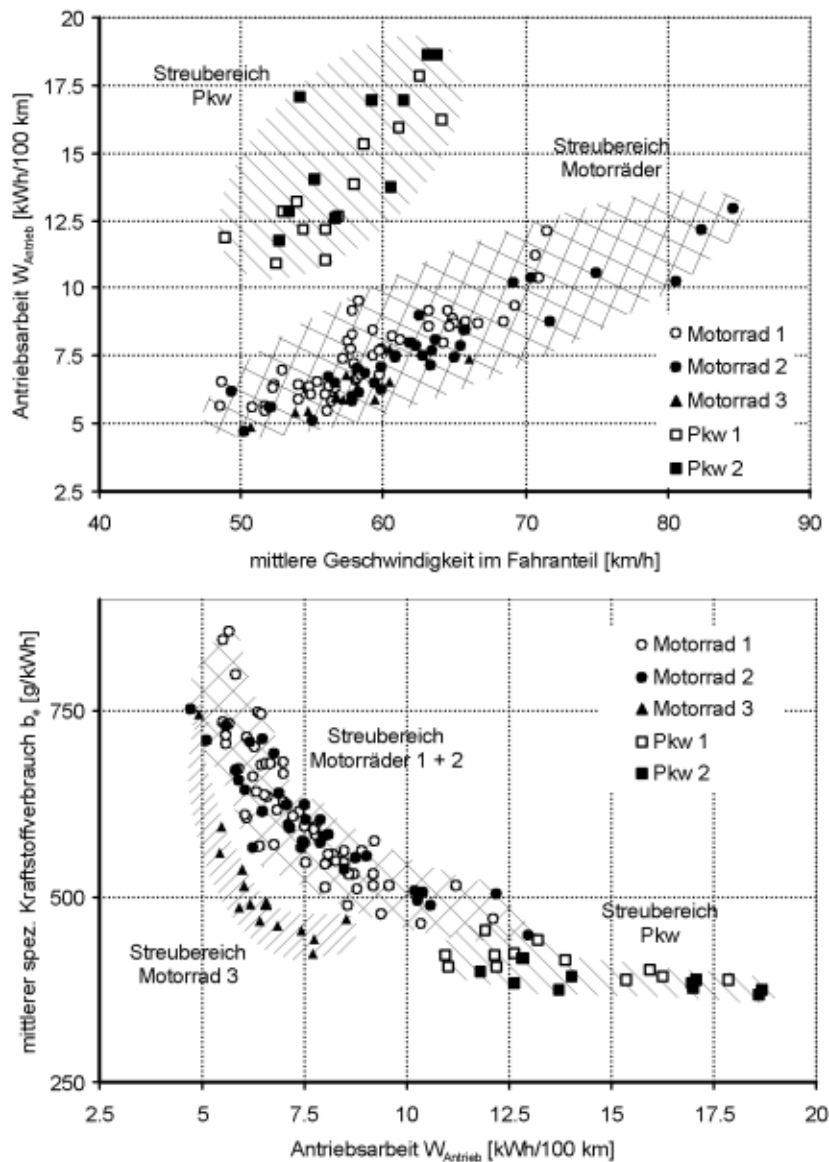
Die Fahrzeugposition und damit die Zuordnung zwischen Steigungsprofil und Versuchsfahrt wird aus einer numerischen Integration des Geschwindigkeitssignals bestimmt, wobei das so errechnete Wegsignal auf die jeweilige tatsächliche Streckenlänge, von der sich während einzelner Versuchsfahrten Abweichungen von maximal 1,5 % ergaben, interpoliert wird. Durch diese Interpolation werden Einflüsse der Fahrweise, die z.B. durch unterschiedliches Ausfahren von Kurvenradien oder durch variierenden Rad-schlupf entstehen, reduziert.

Integriert über der Dauer der Meßfahrt ergibt sich aus der Summe der positiven Antriebsleistungen an den angetriebenen Rädern, d.h. ohne Berücksichtigung der Verluste im Antriebsstrang, eine Abschätzung der aus dem Kraftstoff gewonnenen mechanischen Arbeit, die im Vergleich zur chemisch gebundenen Energie gut als Gesamtwirkungsgrad des Kraftfahrzeugs betrachtet werden kann und auch Vergleiche unterschiedlicher Fahrzeugtypen (Motorrad gegenüber Pkw) gestattet.

$$W_{Antrieb} = \int_T P_{W,ges} dt \quad | \quad P_{W,ges} > 0 \quad (4.7)$$

Die an der Kupplung vom Motor zu jedem Zeitpunkt der Versuchsfahrt zur Verfügung gestellte Antriebsleistung kann unter Berücksichtigung eines geschätzten (und konstant angenommenen) Wirkungsgrads der Kraftübertragung bestimmt werden zu:

$$P_{Motor} = \frac{P_{W,ges}}{\eta_{KÜ}} \quad (4.8)$$



**Bild 4.16:** Mittlere Fahrgeschwindigkeiten, mechanische Antriebsarbeiten und Kraftstoffverbräuche für Motorrad und Pkw

Diese Größe vernachlässigt den mit dem Rad-schlupf einhergehenden Leistungsverlust am angetriebenen Rad (abgesehen von kurzzeitigen, starken Beschleunigungsvorgängen  $\ll 2\%$ ) sowie eventuelle Variationen der Fahrwiderstände während der Fahrt (Luftwiderstandsänderungen durch variierende Sitzposition des Fahrers, Windeinflüsse, Windschattenfahren insbesondere auf Autobahnen, Masseverlust durch fortschreitenden Kraftstoffverbrauch, Temperatureinfluß auf Ölviskositäten), stellt aber eine brauchbare Näherungsbe-trachtung dar.

Im Falle einer negativen Summe der Fahrwiderstände (i.a. beim Verzögern) wird die Differenz zur Motorschleppleistung durch die Betriebsbremsen in Wärmeenergie um-gewandelt und verändert daher den hier definierten Gesamtwirkungsgrad des Fahrzeugs nicht.

**Bild 4.16** enthält für alle Versuchsfahrten die nach obiger Vorgehensweise ermittelten Arbeiten an der Antriebsachse im Vergleich zu den realisierten mittleren Fahrgeschwindigkeiten im Fahranteil und den Kraftstoffverbräuchen. Jeder eingetragene Punkt entspricht dabei einer kompletten Versuchsfahrt über eine der beiden Strecken (95 bzw. 97,8 km).

Es wird deutlich, daß die mittleren Fahrgeschwindigkeiten der Pkw und des überwiegenden Teils der Fahrten mit den Motorrädern einander sehr ähnlich sind. Aufgrund der in Relation zu den Fahrwiderständen erheblich leistungsstärkeren Motorisierung der Kraft-räder besteht darüber hinaus ein Potential für erhebliche Steigerungen der Fahr-geschwindigkeiten, das allerdings nur von einer kleinen Zahl der Motorradfahrer ausge-nutzt wird.

Die zum Erreichen einer gegebenen mittleren Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der jeweils fahrzeugspezifischen Fahrweise erforderliche mechanische Antriebsarbeit für die Pkw liegt in etwa um den Faktor Zwei über derjenigen der Motorräder. Aufgrund der höheren Fahrzeugmasse (+ 14 % gegenüber Pkw 1) ist der Energiebedarf des Pkw 2 trotz günstigerem Luftwiderstand (- 8 %) dabei tendenziell höher als bei Pkw 1. Die Bedarfe für das Sportmotorrad 2 und das Straßenmotorrad 3 liegen auf vergleichbarem Niveau, wobei die unterschiedlichen Fahrweisen beider Motorräder besonders im Bereich der Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen den prinzipiellen Luftwiderstands-Vorteil des vollverkleideten Sportlers aufzehren. Die höhere Masse des Enduro-Motorrads 1 führt zu dem im Vergleich der Krafträder höchsten Bedarf an Antriebsarbeit bei gegebener mittlerer Fahrgeschwindigkeit.

Aus dem integralen Kraftstoffverbrauch pro Versuchsfahrt und der daraus vom Motor geleisteten mechanischen Arbeit läßt sich der mittlere spezifische Kraftstoffverbrauch  $b_e$  (MSFC) in Gramm Kraftstoff pro Kilowattstunde am Getriebeeingang abgegebener Arbeit angeben, gemäß:

$$W_{Motor} = \int_T P_{Motor} dt \quad | \quad P_{Motor} > 0 \quad (4.9)$$

$$b_e = \frac{B_S \cdot s \cdot \rho_{Kraftstoff}}{W_{Motor}} \quad (4.10)$$

Dabei ist  $B_S$  der während der Versuche bestimmte Streckenkraftstoffverbrauch,  $\rho_{Kraftstoff}$  die Kraftstoffdichte und  $s$  die während der Meßfahrt zurückgelegte Wegstrecke.

Aus **Bild 4.16** wird für alle Fahrzeuge deutlich, wie sich mit zunehmender Belastung des Otto-Motors dessen MSFC verringert. Umgekehrt bedeutet dieser Zusammenhang, daß sich eine geringere Motorbelastung, z.B. durch moderatere Fahrweise, aufgrund des steigenden MSFC nur unterproportional auf den Streckenkraftstoffverbrauch auswirkt. Die Zunahme des MSFC mit fallender Belastung wird dabei um so steiler, je geringer die abgeforderte Arbeit im Vergleich zur potentiellen Leistungsfähigkeit des Motors steht, was für leistungsstarke Motorräder zu überproportional hohen Verbräuchen bei schonender Fahrweise führt.

Aus den gezeigten Zusammenhängen ist ein Vergleich des mechanischen Gesamtwirkungsgrades der verschiedenen Fahrzeugkonzepte möglich, der die für die Fahrzeuge jeweils typischen Betriebsweisen berücksichtigt. Zu dessen Beurteilung ist stets die gesamte Kette der Wirkungsgrade zu betrachten. Neben dem effektiven Wirkungsgrad des Motors, der sich aus dem Brennstoffwirkungsgrad, dem Innenwirkungsgrad und der Berücksichtigung der mechanischen Verluste im Motor zusammensetzt [50], sind hierbei die Verluste im Antriebsstrang des Fahrzeugs (Momentenverlust an Übersetzungsstufen, Drehzahlverlust an Reibkupplungen und Reifen) zu sehen.

Im Gegensatz zum oben gezeigten Vergleich der spezifischen Kraftstoffverbräuche muß die Betrachtung des Gesamtwirkungsgrads daher an den Antriebsrädern erfolgen. Die aus der Integration der Motorleistungen berechneten Arbeiten sind also um den Wirkungsgrad des Triebstrangs vermindert in Beziehung zum Energieinhalt des Kraftstoffs zu setzen:

$$\eta_{ges} = \frac{W_{Motor} \cdot \eta_{KÜ}}{W_{chem}} = \frac{W_{Antrieb}}{W_{chem}} \quad (4.11)$$

In dieser Betrachtung wird davon ausgegangen, daß die den Fahrzeugen abverlangte Transportarbeit jeweils gleich ist. Heute übliche Besetzungsgrade von Pkw liegen im Durchschnitt bei 1,6 Personen, in ca. 50 % aller Pkw-Fahrten ist das Fahrzeug mit nur einem Insassen besetzt [45]. Nach einem Ergebnis der fzd-Umfrage werden von den Umfrageteilnehmern ca. 12 % der Motorradfahrten mit Beifahrer durchgeführt, so daß sich ein mittlerer Motorradbesetzungsgrad von ca. 1,1 Personen ergibt. Aus diesem zahlenmäßigen Vergleich ergeben sich selbstverständlich Vorteile, die den Gesamtwirkungsgrad bezogen auf Personenkilometer deutlich zugunsten des Pkw beeinflussen, wobei für vollbesetzte bzw. stark beladene Pkw zusätzliche Verbesserungen eintreten. Auch der Anteil der reinen Spaß-/Freizeitfahrten ohne vorhandenes Mobilitätserfordernis (nach fzd-Umfrage annähernd 40 % der gesamten Motorradfahrten) kann zwischen Pkw und Motorrad nicht unmittelbar verglichen werden und entzieht sich weitgehend einer objektiven Beschreibung. Ziel der dargestellten Betrachtungen ist allerdings ein allein auf die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge abgestellter Vergleich, so daß die genannten, je nach Einsatz stark variierenden Parameter Besetzungsgrad und Transportbedarf in den Betrachtungen nicht berücksichtigt werden.

Der in chemischer Form gebundene Energieinhalt (spezifischer Heizwert) von 1 kg Superkraftstoff beträgt ca.  $43,5 \cdot 10^6$  J/kg (= 12,1 kWh/kg). Für einen technisch nicht möglichen Verbrennungsmotor mit einem Wirkungsgrad von 1 würde sich daraus ein Verbrauch von 83 g/kWh ergeben.

Der häufig als Vergleichsprozeß herangezogene Carnot Prozeß, dessen Wirkungsgrad sich nach Formel 4.12 unter realistischen Bedingungen zu 0,89 ergibt, würde zu einem minimalen Kraftstoffverbrauch von ca. 90 g/kWh führen.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (4.12)$$

Da sich dieser Prozeß in der Realität aufgrund der erforderlichen hohen Drücke und der teilweise isothermen Prozeßführung nicht darstellen läßt, hat sich für den Ottomotor der Gleichraumprozeß als besser geeignete obere Grenze erwiesen [36].

Bei diesem erfolgen die Wärmezufuhr und –abfuhr isochor in den Totpunkten der Kolbenstellungen, Kompression und Expansion finden isentrop statt, d.h. wärmedicht und reibungsfrei. Der Wirkungsgrad des Gleichraumprozesses ist nach Formel 4.13 gegeben, wobei Epsilon das Verdichtungsverhältnis und Kappa das Verhältnis der Wärmekapazitäten bei konstantem Druck bzw. konstantem Volumen (Adiabatexponent) darstellt. Unter realistischen Annahmen beträgt dieser Motorwirkungsgrad ca. 0,6, was ca. 145 g/kWh als theoretischer Untergrenze des spezifischen Verbrauchs entspricht.

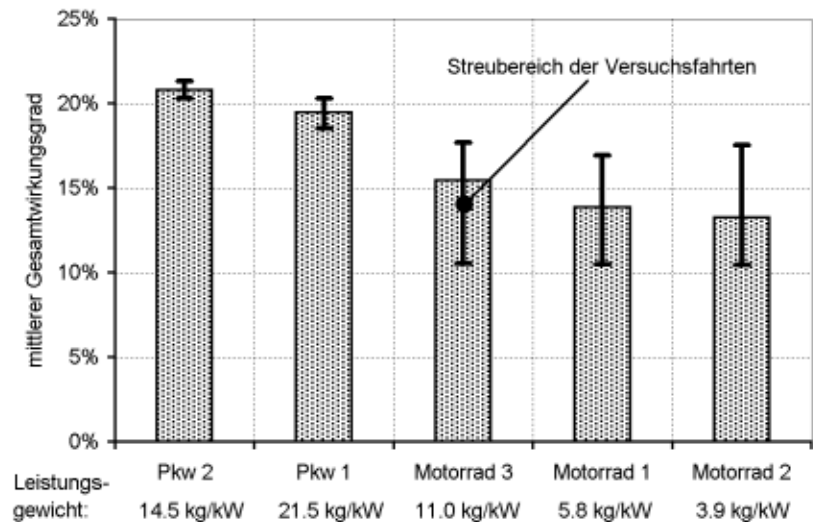
$$\eta_{Gleichraum} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \quad (4.13)$$

$$\text{mit } \kappa = \frac{c_p}{c_v} \approx 1,4 \quad (4.14)$$

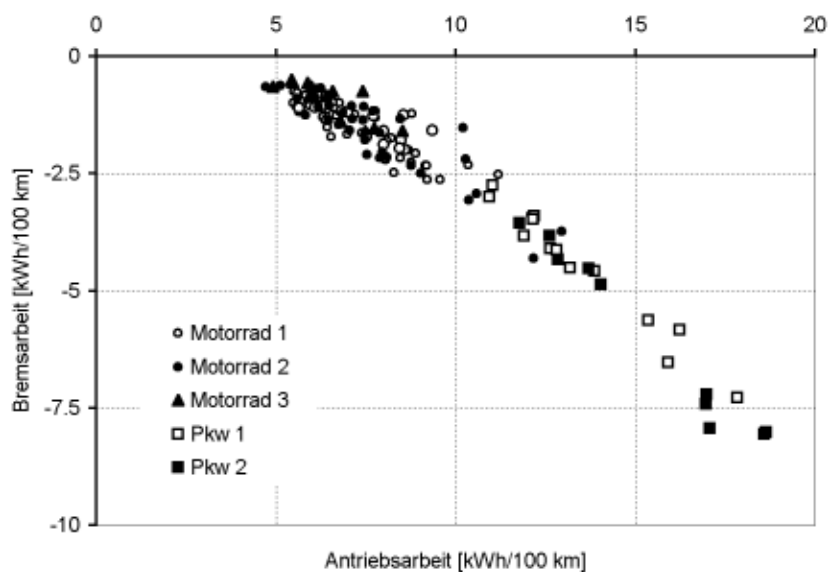
Der reale Gesamtwirkungsgrad der untersuchten Fahrzeuge unter Berücksichtigung der motorinternen Verluste und der Verluste im Antriebsstrang ergibt sich im Mittel über alle Meßfahrten zu den in **Bild 4.17** dargestellten Größen. Für die Motorräder korreliert der mittlere Wirkungsgrad nahezu exakt mit dem jeweiligen Leistungsgewicht des fahrfertigen Fahrzeugs (inkl. Masse des Fahrers). Bei den Pkw besitzen offensichtlich andere Einflüsse, wie Unterschiede der motorischen Eigenschaften und der geringere Luftwiderstand von Pkw 2, einen gravierenden Einfluß.

Aus dem Vergleich von **Bild 4.16** auf Seite 61 und **Bild 4.17** ergibt sich, daß die untersuchten Motorradmotoren bei vergleichbarer mechanischer Belastung (z.B. bei 12 kWh/100 km, **Bild 4.16**) einen ca. 10 % ungünstigeren spezifischen Verbrauch aufweisen als die Motoren der eingesetzten Versuchs-Pkw. Unter Berücksichtigung der Fahrweise und des mit steigender Motorisierung anwachsenden Teillastbetriebs entstehen im realen Verkehrsgeschehen dann allerdings die in **Bild 4.17** gezeigten Unterschiede im Gesamtwirkungsgrad der Fahrzeugkategorien in der Größenordnung von 30 %.

**Bild 4.18** zeigt für alle Fahrzeuge einen mit zunehmender Antriebsarbeit, d.h. zunehmend dynamischer Fahrweise, überproportionalen Anstieg der Bremsarbeit, die durch eine Kombination aus Motorschleppmoment und Betriebsbremsen aufgebracht wird. Das Verhältnis von Brems- zu Antriebsarbeit beträgt dabei ca. 14 % für die langsamsten Fahrten mit Motorrädern und steigert sich bis auf ca. 35 % bei sehr dynamischer Fahrweise. Für Pkw mit deutlich höherer Masse und dadurch höherem Verhältnis zwischen kinetischer Fahrzeugenergie und angreifenden Fahrwiderständen liegt das Verhältnis von Brems- zu



**Bild 4.17:** Gesamtwirkungsgrade von Pkw und Motorrad, Mittelwerte der Versuchsfahrten (Versuchsstrecken und Fahrerkollektive gleichgewichtet gemittelt)



**Bild 4.18:** Zusammenhang zwischen Antriebs- und Bremsarbeit für alle Versuchsfahrzeuge

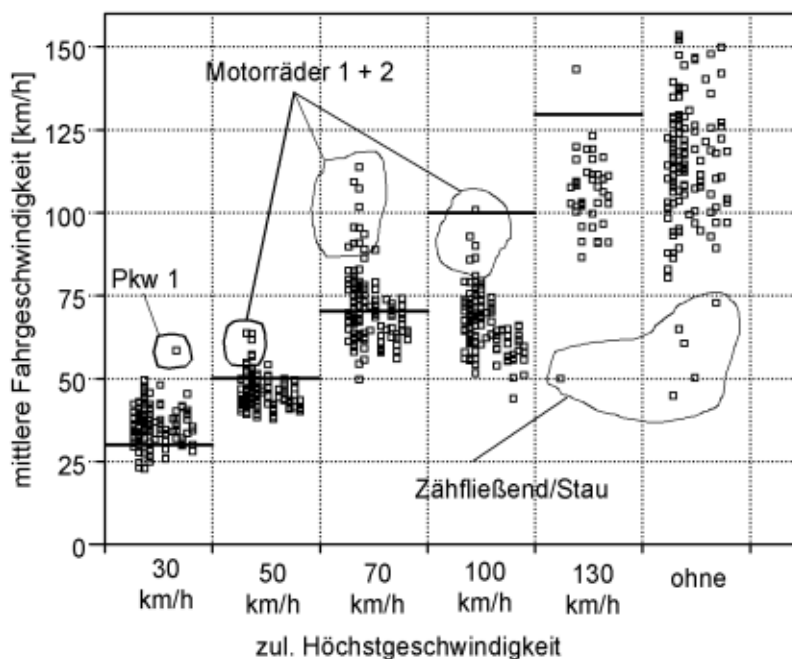
Antriebsarbeit bei der hier unterstellten Streckenzusammensetzung zwischen ca. 25 % und ca. 40 %.

Diese Verhältnisse zeigen die theoretischen Obergrenzen für potentielle Energieeinsparungen zukünftiger Antriebssysteme mit Rekuperationseigenschaften bei überwiegendem Überlandfahranteil. Die Höhe der Einsparung ist dabei für dynamisch eingesetzte Fahrzeuge höher als für Fahrweisen mit überwiegend stationären Zeitanteilen, d.h. mit geringen Beschleunigungs- und Verzögerungswerten.

### 4.2.3 Einfluß der Fahrerkollektive und der Versuchsstrecken

**Bild 4.19** enthält einen Überblick über die Streubereiche der mittleren Fahrgeschwindigkeiten ohne Standanteile für alle Versuchsfahrten, wobei eine Klassierung der Streckenanteile nach der jeweils zulässigen Höchstgeschwindigkeit vorgenommen wurde. Von geringen Abweichungen abgesehen, können die Höchstgeschwindigkeitsbereiche 30 km/h und 50 km/h dabei mit den Streckenanteilen innerhalb geschlossener Ortschaften gleichgesetzt werden. Die Limitierungen auf 70 km/h und 100 km/h bestanden während der Versuchsdurchführung ausschließlich auf Landstraßen, die Autobahnabschnitte waren vollständig unbeschränkt (VMS) bzw. zu zwei Dritteln der Strecke auf 130 km/h limitiert und ansonsten unbeschränkt (MMI).

In den Tempo-30-Zonen sind, abgesehen von einer Versuchsfahrt mit Pkw 1, bei der der Fahrer das Limit weitgehend ignorierte, kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeugen und Fahrzeugkategorien zu erkennen. Bereits im Tempo-50-Bereich der Ortsdurchfahrten zeigen sich hingegen, sofern die für jedes Fahrzeug erzielten Höchstwerte verglichen werden, für die leistungsstarken Motorräder 1 und 2 die höchsten mittleren Geschwindigkeiten.



**Bild 4.19:** Streubereiche der mittleren Fahrgeschwindigkeiten für alle Versuchsfahrten

Wie zu erwarten, bestehen die größten Unterschiede zwischen den Motorrädern und den Pkw auf den außerörtlichen Streckenabschnitten, die in **Bild 4.19** anhand der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 70 und 100 km/h zu identifizieren sind. Hier werden besonders mit den leistungsstarken Motorrädern die mit Abstand höchsten Durchschnittsgeschwindigkeiten realisiert.

Für alle Fahrzeuge wird deutlich, daß auf beiden

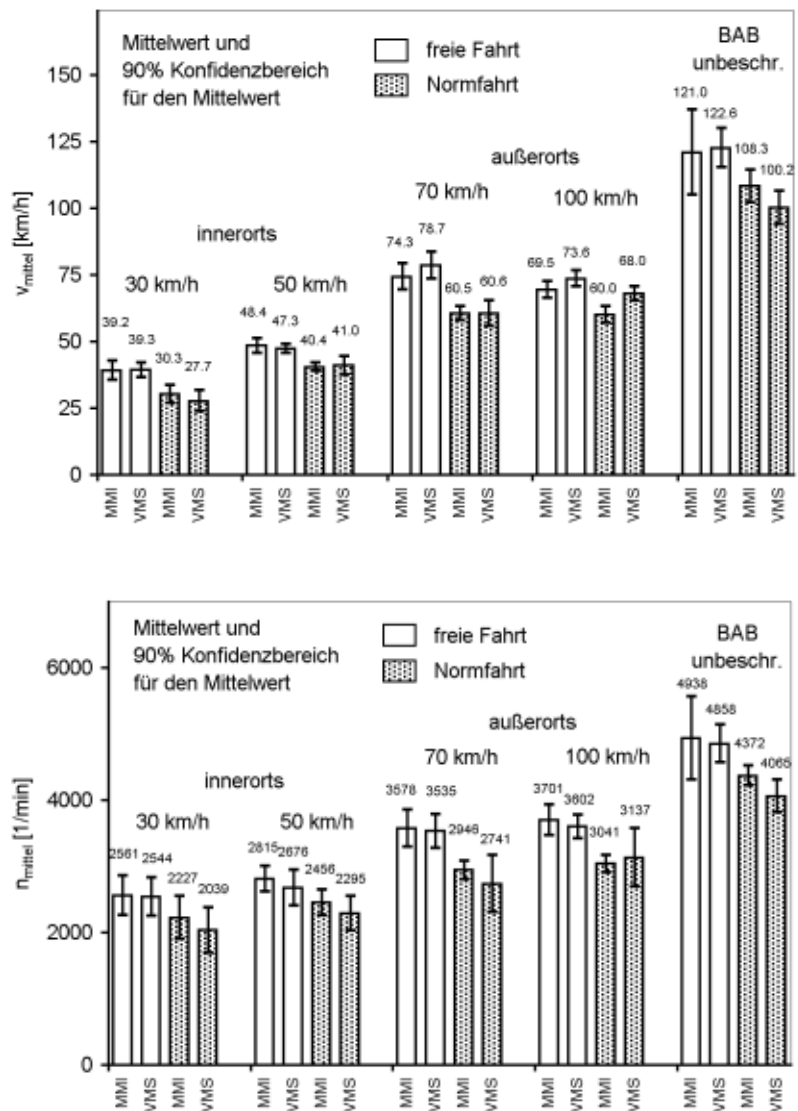
Versuchsstrecken die mittleren Fahrgeschwindigkeiten in den auf 70 km/h limitierten Streckenabschnitten höher liegen als auf den nur durch das generelle Tempo-100-Limit beschränkten Streckenbereichen. Der Grund hierfür dürfte sein, daß die vorhandenen 70 km/h-Limits überwiegend auf sehr gut ausgebauten, weitgehend geraden Streckenabschnitten bestehen mit dem Ziel, die Geschwindigkeit z.B. an Kreuzungen und Einmündungen zu beschränken. Da diese Geschwindigkeitslimits jedoch aus Sicht der Fahrdynamik nicht erforderlich wären, entstehen häufige und zum Teil erhebliche Überschreitungen.

Auf den Autobahnabschnitten sind anhand der mittleren Fahrgeschwindigkeit deutlich die zeitweiligen Verkehrsbehinderungen durch zählfließenden Verkehr zu erkennen. Für die folgenden Mittelwertbetrachtungen wurden diese Fahrtabschnitte nicht weiter berücksichtigt, da ihr Auftreten weitgehend zufälliger Natur ist.

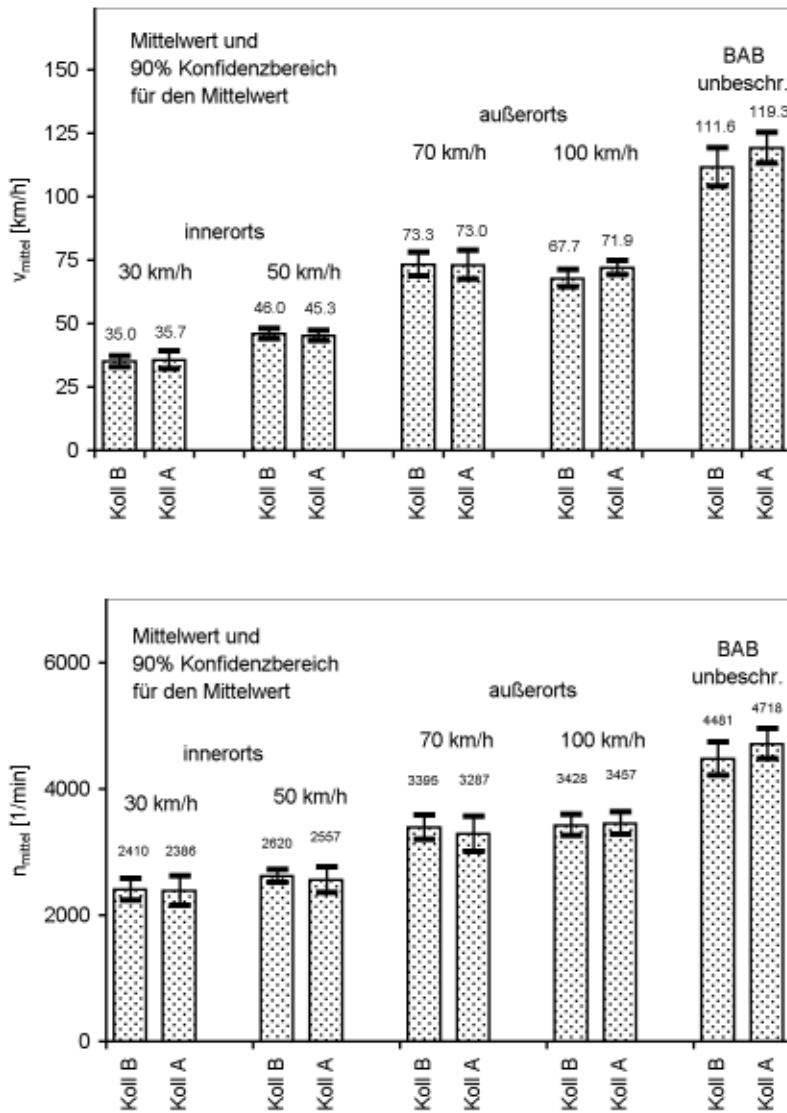
Wie oben erläutert, wurden die Versuchsfahrten auf zwei unterschiedlichen Strecken mit ähnlicher Zusammensetzung durchgeführt. Eine Übersicht über die während der Versuchsdurchführungen bestehenden Tempolimits kann **Bild 4.7** auf Seite 50 entnommen werden.

Ergänzend zur Darstellung aus **Bild 4.13**, Seite 56, enthält **Bild 4.20** einen Vergleich der auf den Streckenabschnitten beobachteten mittleren Fahrgeschwindigkeiten und Motordrehzahlen sowie die zugehörigen 90%-Konfidenzintervalle für den Mittelwert des Erstkollektivs mit Motorrad 1.

Die auf beiden Versuchsstrecken gefahrenen mittleren Geschwindigkeiten sind für die Streckenanteile innerhalb geschlossener Ortschaften sehr ähnlich. Auf den nicht weiter beschränkten Außerortsanteilen ergeben sich geringfügig höhere Fahrgeschwindigkeiten auf der VMS, was besonders während der



**Bild 4.20:** Gegenüberstellung der Versuchsstrecken, mittleren Fahrgeschwindigkeiten und Motordrehzahlen des Erstkollektivs (5 Fahrer) mit Motorrad 1



**Bild 4.21:** Gegenüberstellung der Fahrerkollektive, mittleren Fahrgeschwindigkeiten und Motordrehzahlen auf Versuchsstrecke B (VMS) mit Motorrad 1

Normfahrten, d.h. bei strikter Einhaltung aller Tempolimits, deutlich wird. Der Grund hierfür dürfte in der fahrdynamisch etwas weniger anspruchsvollen Streckenführung der VMS liegen, die im Vergleich zur MMI-Strecke weniger Anteile von Straßen unterer Kategorie enthält. Auf den nicht geschwindigkeitsbeschränkten Autobahnabschnitten ergeben sich für beide Versuchsstrecken mit gut 120 km/h ähnliche mittlere Fahrgeschwindigkeiten.

Das mittlere Fahrverhalten des Erstkollektivs ist dem des größeren Normkollektivs sehr ähnlich, sofern bei der Mittelwertbildung für das Erstkollektiv neben den freien Fahrten auch die oben erläuterten Normfahrten mit halber Gewichtung berücksichtigt werden, **Bild 4.21**. Durch diese Normfahrten werden die nur im größeren Fahrerkollektiv

vorhandenen überdurchschnittlich langsamen Fahrer (Fahranfänger, Wenigfahrer) abgebildet.

#### 4.2.4 Identifikation von Parametern mit Einfluß auf die Betriebsweise

Um verschiedene, die Betriebsweise beeinflussende Größen trennen und quantifizieren zu können, wurden für die Fahrten des großen Fahrerkollektivs B statistische Modelle erstellt, die die Fahrweise in Abhängigkeit von Fahrer-, Fahrzeug- und Umgebungsparmetern beschreiben.

Als Kenngröße für die Betriebsweise, d.h. als zu erklärende Größe für das statistische Beschreibungsmodell, wurde die während einer Meßfahrt eingesetzte Antriebsarbeit verwendet, da diese eine zentrale und kraftstoffverbrauchsrelevante Größe darstellt und

als Summenwert das Fahrerverhalten während der gesamten Fahrzeit beinhaltet. Das Modell wurde formuliert gemäß den folgenden Abhängigkeiten:

$$W_{\text{Meßrunde}} = f(v_{\text{mittel, Fahranteil}}, \text{Fahrereigenschaften}, \text{Fahrzeugeigenschaften}, \text{Randbedingungen}) \quad (4.15)$$

Die mittlere Geschwindigkeit im Fahranteil ist dabei die bedeutsamste Größe, die für eine gegebene Meßrunde bei bekanntem Steckenverlauf und Steigungsmaßen die erforderliche Antriebsarbeit bestimmt. Der Fahrer nimmt bei gegebener mittlerer Geschwindigkeit durch die Verteilung des Geschwindigkeitsprofils über der Strecke zusätzlichen Einfluß auf die Höhe der integralen Antriebsarbeit. Ebenso wird der Summenwert durch die Fahrzeugeigenschaften, hierbei überwiegend durch die Gesamtmasse, sowie durch verschiedene Randbedingungen wie Verkehrsdichte und Straßenzustand beeinflusst, deren relative Bedeutung und deren Korrelationsrichtungen mit der Antriebsarbeit anhand der unten aufgeführten Variablen bestimmt werden sollen.

Im ersten Schritt werden dabei jeweils lineare Abhängigkeiten zwischen den erklärenden und der zu erklärenden Variablen unterstellt. Da erwartet werden kann, daß einige Abhängigkeiten keinem linearen Zusammenhang gehorchen, wird diese Einschränkung in einem zweiten, nichtlinearen Modell fallen gelassen.

Aus den Versuchsdaten werden zur statistischen Erklärung der Antriebsarbeit die folgenden Größen berücksichtigt:

#### *Fahrereigenschaften*

- „Geschlecht“: Nominale Variable.
- „Alter“: Kardinale Variable, Alter des Fahrers in Jahren.
- „Fahrerfahrung“: Kardinale Variable, insgesamt von der Versuchsperson bisher mit einem Motorrad zurückgelegte Fahrstrecke in Tkm.
- „Jahresfahrleistung“: Kardinale Variable, von der Versuchsperson in den vergangenen zwei Jahren pro Jahr mit einem Motorrad zurückgelegte Entfernung in Tkm.
- „Fahrstil“: nominale Variable, durch den Fahrer vor Fahrtantritt vorgenommene subjektive Einschätzung des eigenen Fahrstils, Auswahlmöglichkeiten waren: Sportfahrer, Sporttourer, Tourenfahrer, Reise-Enduro-Fahrer, Enduro-Fahrer.

#### *Fahrzeugeigenschaften*

- „Fahrzeug“: Nominale Variable, Fahrzeug, mit dem die Meßstrecke zurückgelegt wurde (Motorrad 1-3), sortiert nach abnehmender Gesamtmasse.

#### *Randbedingungen (Auswahl)*

- „Wochentag“: Nominale Variable, Zeitpunkt der Versuchsdurchführung, unterschieden wurden Montag bis Donnerstag, Freitag, Samstag bis Sonntag.

- „Abfahrtszeit“: Nominale Variable, unterschieden nach Abfahrt vormittags, mittags, nachmittags, abends.
- „Straßenzustand“: Kardinale Variable, prozentualer Anteil der Strecke, die während der Versuchsfahrt naß oder feucht war, Zahlenwert wurde nach jeder Fahrt vom Fahrer geschätzt.
- „Fahrzeit“: Kardinale Variable, gesamte Fahrzeit für die Versuchsfahrt, stellt in Verbindung mit der mittleren Geschwindigkeit im Fahranteil eine indirekte Größe für die vorgefundene Verkehrsdichte dar.
- „Verkehrsdichteindex“: Ordinale Variable, rechnerische Größe, die aus subjektiven Angaben der Fahrer zum Verkehrsfluß während der jeweiligen Meßfahrt gebildet wurde. Zahlenwerte von 0 bis 12 beschreiben zunehmende, subjektiv empfundene Behinderung des Versuchsfahrers durch andere Verkehrsteilnehmer, zur Ermittlung vgl. Kap. 4.1.5, Seite 53. Der Zahlenwert 0 würde dabei freie Fahrt auf der gesamten Strecke bedeuten, 12 eine ständige Begrenzung der eigenen Geschwindigkeit durch vorausfahrenden Verkehr.

Aufgrund der Größe der Grundgesamtheit der Motorradfahrer in Deutschland kann angenommen werden, daß auch Teilgruppen der Grundgesamtheit, gebildet nach verschiedenen Merkmalsausprägungen (z.B. Fahrerfahrung, Fahrstil) noch groß genug sind, um als normalverteilt betrachtet werden zu können. Vor der Anwendung der Regressionsrechnung wird mittels eines Kolmogorov-Smirnov-(K-S-)Tests auch für die vorliegenden Stichprobendaten die Hypothese untersucht, daß diese näherungsweise einer Normalverteilung folgen. Der K-S-Test vergleicht die beobachtete kumulative Verteilungsfunktion für jede der genannten Variablen mit einer Normalverteilung und basiert auf der größten absoluten Differenz zwischen beobachteter und erwarteter kumulativer Verteilung. Für jede der hier untersuchten kardinalskalierten Variablen führt der Test zu einem positiven Ergebnis auf einem Signifikanzniveau besser 0,05. Es wird daher angenommen, daß auch die Stichprobendaten hinreichend gut einer Normalverteilung entsprechen.

### *Multiples lineares Regressionsmodell*

In diesem Modell wird unterstellt, daß die abhängige Variable mit den unabhängigen Variablen  $X_2, \dots, X_k$  in einem linearen Zusammenhang steht, wobei zusätzlich unabhängige Störgrößen  $U_i$  auftreten können, Formel 4.16.

$$Y_i = \beta_1 + \sum_{j=2}^k \beta_j \cdot X_{ji} + U_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4.16)$$

Zusätzlich muß gelten, daß zwischen den (k-1) unabhängigen Variablen keine vollständige lineare Abhängigkeit besteht, da sonst keine eindeutige Schätzung der Regressionskoeffizienten möglich ist. Als Maß für die Güte des Regressionsmodells gilt das lineare multiple Bestimmtheitsmaß, das Verhältnis zwischen Gesamtabweichungsquadratsumme und erklärter Abweichungsquadratsumme.

Das verwendete Verfahren der schrittweisen Regression (partieller F-Test) beginnt mit der Prüfung, ob mindestens eine erklärende Variable einen signifikanten linearen Zu-

sammenhang mit der zu erklärenden Variablen aufweist. Liegen mehrere signifikante Variablen vor, wird diejenige mit dem höchsten linearen Einfachkorrelationskoeffizienten ausgewählt. Erwartungsgemäß wird dieser stärkste Einfluß auf die umgesetzte Antriebsarbeit für die Variable „ $v_{\text{mittel, Fahranteil}}$ “ gefunden.

Anschließend wird in weiteren Iterationsschritten diejenige Variable mit dem jeweils höchsten Erklärungsbeitrag zur Varianz der abhängigen Größe in das Modell aufgenommen. Auf jeder Stufe des Verfahrens werden nach Aufnahme einer neuen Variablen alle Variablen des Regressionsansatzes auf Signifikanz überprüft. Sind eine oder mehrere nicht länger signifikant, wird diejenige Variable mit dem kleinsten Erklärungsbeitrag ausgeschlossen. Anschließend wird die Regressionsfunktion neu berechnet. Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis keine Variablen mehr aufgenommen oder ausgeschlossen werden können. Die rechnerische Durchführung dieser iterativen Operationen erfolgt mit der Statistik-Software SPSS, Näheres zum theoretischen Hintergrund und zum Ablauf des Verfahrens findet sich in [4, 11].

Bei der Analyse der Daten wird für die Aufnahme einer Variablen in die Regression ein Signifikanzniveau von 0,05, für den Ausschluß aus dem Modell ein Signifikanzniveau von 0,10 gewählt. Unter Anwendung der aus der Regressionsrechnung resultierenden Faktoren für die einzelnen Einflußgrößen sind theoretisch auch quantitative Angaben abzuleiten, aufgrund der geringen Datenbasis ( $N=74$  Versuchsfahrten) und der Vielzahl der zusätzlich denkbaren Einflüsse werden hier jedoch nur die qualitativen Beeinflussungen dargestellt und diskutiert.

Zusammenfassend lassen sich aus dem statistisch optimalen linearen Regressionsmodell die folgenden Variablen und Korrelationsrichtungen identifizieren, wobei die Reihenfolge der Nennung dem geleisteten Erklärungsbeitrag zur Varianz der Antriebsarbeit entspricht:

- 1  $v_{\text{mittel, Fahranteil}}$ , Korrelation positiv, d.h. mit steigender mittlerer Fahrgeschwindigkeit steigt die erforderliche Antriebsarbeit.
- 2 Fahrzeug, Korrelation negativ, d.h. mit Fahrzeug 1 wird bei gegebener mittlerer Fahrgeschwindigkeit die höchste Antriebsarbeit umgesetzt, mit den Fahrzeugen 2 und 3 geringere.
- 3 Jahresfahrleistung, Korrelation negativ, d.h. bei Konstanz aller übrigen Parameter, insbesondere bei gleicher mittlerer Fahrgeschwindigkeit, absolviert der Fahrer mit der höheren Jahresfahrleistung (dem größeren Übungsgrad) die Meßrunde mit geringerer Antriebsarbeit, er fährt demzufolge „flüssiger“.
- 4 Straßenzustand, Korrelation negativ, d.h. mit zunehmender Fahrbahnnässe sinkt bei gleicher mittlerer Fahrgeschwindigkeit die umgesetzte Antriebsarbeit, was als Hinweis auf sanfteres Beschleunigen gedeutet werden kann.
- 5 gesamte Fahrzeit, Korrelation positiv, d.h. mit zunehmender Fahrzeit kommt es zu stärkeren Behinderungen des Versuchsfahrers durch den übrigen Verkehr, die er zum Erzielen einer gleichen mittleren Fahrgeschwindigkeit durch schärfere Fahrweise ausgleichen muß.

Das Bestimmtheitsmaß dieses Modells beträgt 0,881, d.h. 88,1 % der gemessenen Antriebsarbeiten werden durch die genannten Variablen des Modells erklärt. Durch die

Aufnahme weiterer der eingangs genannten Variablen läßt sich dieses Bestimmtheitsmaß nicht mehr signifikant steigern.

Bemerkenswert ist, daß von den individuellen Daten zum Fahrer lediglich die Jahresfahrleistung, die am ehesten mit dem aktuellen Übungsgrad des Fahrers gleichgesetzt werden kann, im Modell enthalten ist. Weitere Parameter, vor allem das Geschlecht, können innerhalb der betrachteten Zusammenhänge als nicht signifikant angesehen werden.

Grundsätzlich problematisch ist bei linearen Regressionsmodellen die Tatsache, daß die nominalen Daten nicht als solche erkannt und daher wie metrische Daten behandelt werden. Um auch nominale Daten in sinnvoller Weise berücksichtigen zu können, bietet sich die Verwendung von Dummy-Variablen an, wie sie beim Übergang zum nichtlinearen Regressionsmodell eingeführt werden.

### *Berücksichtigung nominaler Variablen, nichtlineares Regressionsmodell*

Im linearen Regressionsansatz sind nominale Daten, die z.B. bestimmte Gruppen oder Kategorien darstellen, nicht in numerisch korrekter Form zu berücksichtigen. Um diese Daten in den Regressionsansatz einzuführen, werden sogenannte Dummy-Variablen verwendet. Dies sind Variablen, die nur die Werte 0 und 1 annehmen können. Der Vorteil ihrer Verwendung liegt vor allem darin, daß qualitative Variable, z.B. das Geschlecht, durch sie quantifiziert werden können. Aus der Variablen „Geschlecht“ werden dabei zwei Variablen „Weiblich“ und „Männlich“, die jeweils nur die Werte 0 (trifft nicht zu) und 1 (trifft zu) annehmen können. In der anschließenden Regressionsrechnung werden die Dummy-Variablen wie quantitative Variablen behandelt. Die entsprechenden Verfahren zur Bestimmung von Konfidenzintervallen sowie zum Testen von Hypothesen über die Regressionskoeffizienten der Grundgesamtheit können somit angewendet werden. Im beschriebenen Modell werden die folgenden Dummy-Variablen verwendet:

- „Männlich“, „Weiblich“: Geschlecht des Fahrers
- „Motorrad 1“, „Motorrad 2“, „Motorrad 3“: Verwendetes Versuchsmotorrad.
- „Sportfahrer“, „Sporttourer“, „Tourer“, „Reise-Enduro“, „Enduro“: Beschreibung des Fahrstils anhand der Selbsteinschätzung der Probanden.

Die Vermutung liegt nahe, daß bestimmte Variablen (z.B. das Alter der Fahrer) keinen linearen Zusammenhang mit der abhängigen Variablen besitzen, sondern nichtlineare Funktionen diesen Zusammenhang besser beschreiben. Um aus der Menge der nichtlinearen Funktionstypen einen Typ auszuwählen, wird der Regressionsansatz mit verschiedenen Funktionen wiederholt und anschließend der Funktionstyp mit dem höchsten Signifikanzniveau ausgewählt.

Aus einer größeren Anzahl in Frage kommender mathematischer Funktionen, **Tabelle 4.3**, wird ein zusammengesetzter Ansatz (Typ 6) als hinreichend signifikant ( $\alpha=0,014$ ) für die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Alter und umgesetzter Antriebsarbeit identifiziert, wobei eine mit zunehmendem Alter fallende umgesetzte Antriebsarbeit festgestellt wird ( $b_0 < 1$ ).

**Tabelle 4.3:** Anpassungstabelle verschiedener nichtlinearer Funktionstypen für den Einfluß von Alter, Jahresfahrleistung und Fahrerfahrung auf die umgesetzte Antriebsarbeit

Nr.	Funktionstyp	Ansatz	Signifikanz für Alter	Signifikanz für Jahresfahrleistung	Signifikanz für Fahrerfahrung
1	Linear	$b_0 + b_1 \cdot t$	0,030	0,331	0,381
2	Logarithmisch	$b_0 + b_1 \cdot \ln(t)$	0,054	0,760	0,196
3	Invers	$b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{t}$	0,096	0,011	0,161
4	Quadratisch	$b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2$	0,023	0,073	0,410
5	Kubisch	$b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3$	0,021	0,016	0,103
6	Zusammengesetzt	$b_0 + b_1^t$	0,014	0,338	0,352
7	S-Kurve	$e^{b_0 + b_1 \cdot t}$	0,049	0,020	0,162

Für den Einfluß der Jahresfahrleistung kann unterstellt werden, daß die umgesetzte Antriebsarbeit mit zunehmender Jahresfahrleistung asymptotisch einem Grenzwert zustrebt, d.h. bei hohem Übungsgrad findet mit weiter zunehmender Fahrleistung keine große Änderung der Fahrgewohnheiten mehr statt. Unter verschiedenen mathematischen Funktionen ist daher der als signifikant ( $\alpha=0,011$ ) gefundene inverse Ansatz (Typ 3) für die Beschreibung der Abhängigkeit der Antriebsarbeit von der Jahresfahrleistung auch im Hinblick auf die Erwartungen plausibel.

Für die Anpassung der Gesamtfahrerfahrung existiert kein hinreichend signifikanter ( $\alpha \leq 0,05$ ) Funktionstyp, **Tabelle 4.3**, so daß diese Variable, die sich auch im linearen Modell als nicht signifikant herausgestellt hat, nicht weiter betrachtet wird.

Aus den neuen Funktionstypen werden Schätzwerte für die Antriebsarbeit berechnet und mit neuen Variablenbezeichnungen versehen. Mit diesen neuen Variablen und mit den eingeführten Dummy-Variablen wird ein weiteres Regressionsmodell erstellt.

Im optimalen nichtlinearen Modell wird ein Bestimmtheitsmaß von 91,2 % erreicht, im Vergleich zur linearen Betrachtung eine Verbesserung um 3,1 Prozentpunkte. Unterschiede und Gemeinsamkeiten zum linearen Modell sind die folgenden, wobei die Reihenfolge der Nennung der Variablen wiederum deren Signifikanzniveau anzeigt:

- 1  $v_{\text{mittel}}$ , Fahranteil (unverändert)
- 2 „Fahrzeug“ wird ersetzt durch „Fahrzeug 1“: Korrelation positiv.
- 3 „Jahresfahrleistung“ wird ersetzt durch die nichtlinear angepaßte, degressiv fallende Funktion: Korrelation (mit fallendem Funktionsansatz) positiv.
- 4 „Straßenzustand“ (unverändert)
- 5 „Alter“ wird ersetzt durch die nichtlinear angepaßte, degressiv fallende Funktion: Korrelation (mit fallendem Funktionsansatz) positiv, die Variable wird zusätzlich als signifikant aufgenommen. „Gesamte Fahrzeit“ fällt dagegen als nicht signifikant aus dem Modell heraus.

Aus dem nichtlinearen Regressionsmodell ergeben sich in Ergänzung zur linearen Betrachtung die folgenden Aussagen:

- Fahrzeug 1 unterscheidet sich signifikant von den beiden übrigen, was durch die höhere Leermasse (ca. + 45 kg gegenüber Fahrzeug 2, Fahrzeuge 2 und 3 unterscheiden sich lediglich um 9 kg), begründet sein dürfte.
- Für die Jahresfahrleistung und das Alter des Fahrers kehren sich die Korrelationsrichtungen mit der Antriebsarbeit im Vergleich zum linearen Modell um, was durch den fallenden Ansatz der nichtlinearen Funktion verursacht wird und keine Änderung des Zusammenhangs bedeutet.
- Beide nichtlinear angepaßten Variablen (Jahresfahrleistung und Alter des Fahrers) sind in der optimalen Form des Regressionsmodells enthalten, was auf jeweils plausible Annahmen hinsichtlich des Funktionstyps hindeutet.

#### *Zusammenfassung der Korrelations- und Regressionsbetrachtungen:*

Die folgenden Aussagen stellen eine Zusammenfassung der geschilderten Korrelations- und Regressionsrechnungen zur Identifikation von Parametern mit Einfluß auf die Betriebsweise von Motorrädern im realen Straßenverkehr dar. Sie können für zukünftige Untersuchungen als Anhalt für die Auswahl von Probanden und die Festlegung von Versuchsparametern dienen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Datenbasis (betrachtet wurden insgesamt 74 Versuchsfahrten) werden im Rahmen dieser Arbeit lediglich qualitative Aussagen getroffen, deren quantitative Konkretisierung weiterer Untersuchungen bedarf.

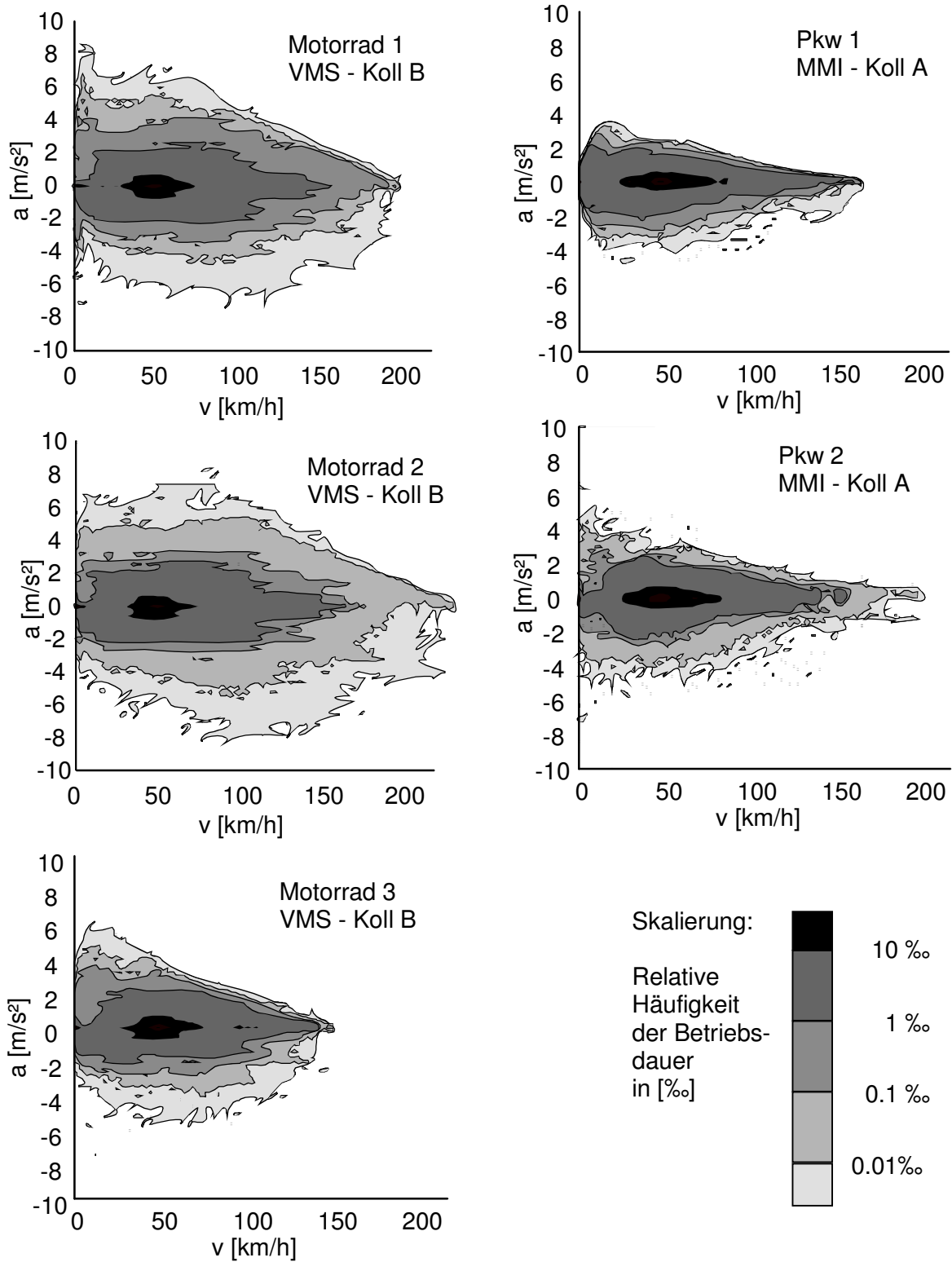
- Von den untersuchten Parametern sind für die Betriebsweise, beurteilt anhand der umgesetzten Antriebsarbeiten, von signifikanter Bedeutung:
  - Fahrzeugeigenschaften, besonders die Fahrzeugmasse,
  - die Jahresfahrleistung der Probanden,
  - der Straßenzustand hinsichtlich Fahrbahnnässe,
  - die Verkehrsdichte, sofern eine objektive Beschreibung, hier in Form einer Fahrzeit für eine vorgegebene Strecke, vorliegt,
  - das Alter der Probanden.
- Als im Vergleich zu den genannten Parametern nicht signifikant werden ermittelt:
  - Das Geschlecht der Probanden,
  - die Gesamtfahrerfahrung der Probanden,
  - die Selbsteinschätzung des Fahrstils der Probanden,
  - Wochentag und Abfahrtszeit der Versuche,
  - eine subjektive Einschätzung der Verkehrsdichte durch die Probanden.
- Gegebene mittlere Fahrgeschwindigkeiten werden von Fahrern mit hohem Übungsgrad mit geringerer Antriebsleistung erreicht, was für einen flüssigeren Fahrstil spricht. Relevant sind hierfür weniger die Gesamtfahrerfahrung oder das Alter als die zurückgelegte Fahrstrecke in der jüngeren Vergangenheit.
- Mit zunehmender Fahrbahnnässe werden gleiche mittlere Fahrgeschwindigkeiten mit geringeren Antriebsleistungen erreicht, was durch sanftere Beschleunigungsvorgänge hervorgerufen werden dürfte.

#### 4.2.5 Typische Betriebspunkte und Antriebsleistungen

Die Fahrgrenzen der untersuchten Kraftfahrzeuge erlauben, wie bereits die technischen Daten erwarten lassen, sehr unterschiedliche Fahrweisen. Diese werden weitgehend vom unterschiedlichen Leistungspotential der Fahrzeuge hinsichtlich Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit begrenzt, das aus den jeweiligen Einhüllenden der zweidimensionalen Häufigkeitsverteilungen der Längsbeschleunigungen über der Fahrgeschwindigkeit, **Bild 4.22**, direkt abgelesen werden kann. Dennoch ergibt sich für alle Fahrzeuge eine Konzentration der Beschleunigungen bei Werten zwischen ca.  $-2$  und  $2 \text{ m/s}^2$ , so daß diese Werte als Grenzen des Komfortempfindens bei Beschleunigungen und Verzögerungen interpretiert werden können. Daneben zeigt sich eine weitgehend symmetrische Verteilung zwischen den Antriebsbeschleunigungen und den Verzögerungswerten, obwohl zumindest im Bremsbereich für alle Fahrzeuge nahezu identische Zahlenwerte mit Maxima von mindestens  $9 \text{ m/s}^2$  erreichbar wären.

Neben dem objektiven Leistungspotential der Fahrzeuge wird die Betriebsweise aber auch stark von der Art der technischen Ausführung beeinflusst, z.B. durch die Verwendung hochdrehender kleiner Motoren gegenüber großvolumigen, durchzugsstarken Ausführungen oder eine sportlich geduckte Sitzposition gegenüber einer aufrechten Sitzhaltung des Fahrers. Durch diese und weitere Gestaltungselemente, von der Motorakustik bis zum Markenimage, verfügen besonders sportlich ausgelegte Fahrzeuge über einen Aufforderungscharakter, der je nach Fahrer und Fahrmotivation zu mehr oder weniger starken Abweichungen vom typischen Betrieb „durchschnittlicher“ Motorräder führt.

Ein Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der tatsächlich eingesetzten Antriebs- und Bremsleistungen, **Bild 4.23**, verdeutlicht den Einfluß des Fahrzeugs, zeigt aber auch die Tatsache, daß der Fahrereinfluß beim Motorrad denjenigen des Fahrzeugs deutlich übersteigt. Die Streubreite der Antriebsleistungen steigt mit zunehmender Motorisierung, wobei die langsamen Fahrten mit den beiden leistungsstarken Fahrzeugen dem Mittelwert der Fahrten mit dem schwächeren Motorrad ähnlich sind. Die langsamsten Fahrer fordern den leistungsstarken Motorrädern kurzzeitige maximale Antriebsleistungen in der Größenordnung von  $22 - 25 \text{ kW}$  ab. Dies entspricht dem Verhalten eines durchschnittlichen Fahrers mit dem leistungsschwächeren Fahrzeug. Die langsamsten Fahrer rufen jedoch auch mit dem leistungsschwächeren Fahrzeug deutlich weniger Antriebsleistung ab als der Durchschnitt der Fahrer. Hieran zeigt sich, daß die Fahrweise stark vom Leistungsangebot des Fahrzeugs beeinflusst wird, d.h. die Fahrer neigen dazu, ein Fahrzeug in einer bestimmten Relation zum Fahrzeugpotential auszunutzen.



**Bild 4.22:** Häufigkeitsverteilung der gefahrenen Beschleunigungen über der Fahrgeschwindigkeit

Ein Vergleich der für das jeweilige Fahrzeug typischen Betriebspunkte kann aus den bereits ermittelten mechanischen Antriebsleistungen und der Kenntnis des jeweils eingelegten Getriebegangs bzw. der zugehörigen Motordrehzahl dargestellt werden, indem Häufigkeitsverteilungen für die Dauer einzelner Betriebszustände im Motorkennfeld berechnet werden. Hierzu wird das Antriebsmoment nach Formel 4.17 bestimmt und der direkt gemessenen Motordrehzahl gegenübergestellt, **Bild 4.24**.

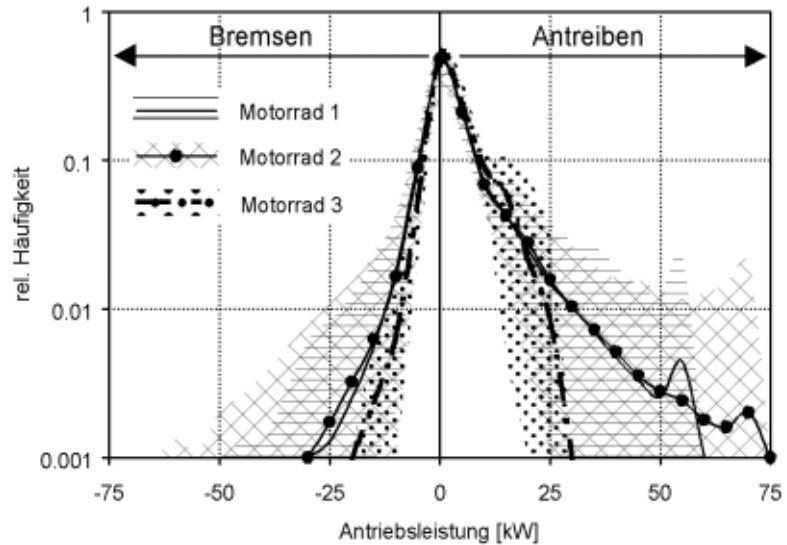
$$M_{Motor} = \frac{P_{Motor}}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (4.17)$$

Berücksichtigt sind hierbei jeweils nur die Fahrzustände, in denen der Motor ein positives Antriebsmoment abgibt, d.h. Leerlaufanteile und Zeiten mit geschlepptem Motorbetrieb sind in der Darstellung nicht enthalten.

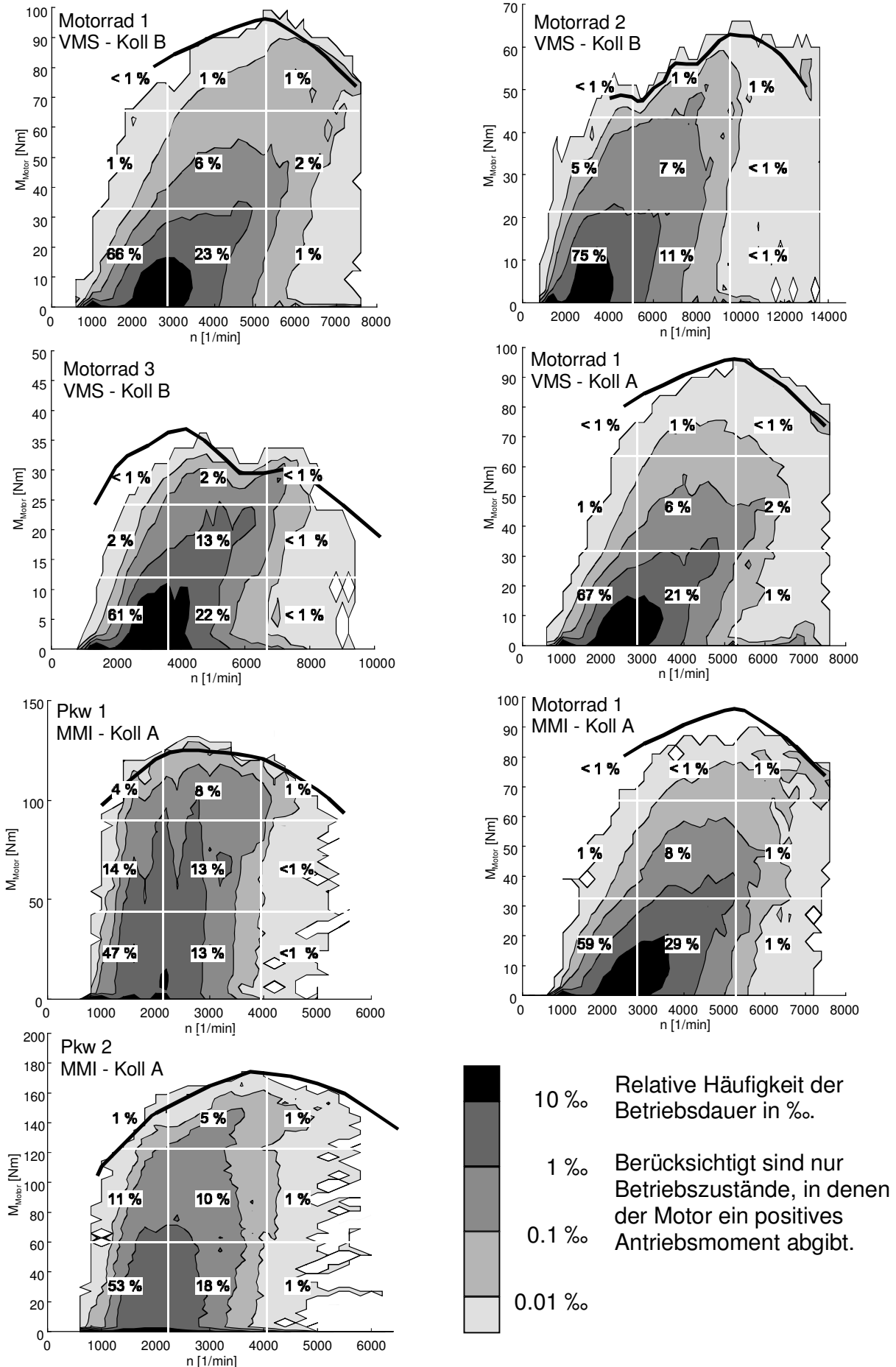
Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten, die eine hohe Drehzahl und Motorlast erfordern, tritt bei den Motorrädern, besonders deutlich beim leistungsschwachen Motorrad 3 zu sehen, der Effekt auf, daß einige Fahrer sich zur Verringerung des Luftwiderstands in eine geduckte Sitzposition begeben. Die hierdurch erzielte Verringerung des Fahrwiderstandes wird in der angegebenen Berechnung der Motorleistung aus den Fahrwiderständen nicht berücksichtigt, so daß in diesem Betriebsbereich für die Motorräder aufgrund der Überschätzung des tatsächlich wirksamen Luftwiderstands zu hohe Motormomente berechnet werden.

Aus der Darstellung von **Bild 4.24** wird deutlich, wie sehr bei allen Fahrzeugen der Betrieb bei (niedriger) Teillast die Zeitanteile mit hoher Last überwiegt. Für die untersuchten Pkw werden ca. 50 % der Fahrzeit mit positiver Leistungsabgabe im unteren Last-Drehzahl-Drittel absolviert, der Zeitanteil mit Momentenabgabe von mehr als zwei Dritteln des maximalen Motormoments beträgt selbst für das relativ leistungsschwächste Fahrzeug (Pkw 1) lediglich 13 % der Fahrzeit mit Leistungsabgabe.

Erwartungsgemäß steigen mit abnehmendem Leistungsgewicht der Fahrzeuge die Zeitanteile niedriger Teillast. Das leistungsstärkste Motorrad 2 wird zu drei Vierteln der Fahrzeit mit weniger als einem Drittel des maximalen Moments und der maximalen Drehzahl betrieben, der Volllastanteil liegt im Mittel aller Fahrer bei weniger als 3 %.



**Bild 4.23:** Zeitliche Häufigkeitsverteilung der im realen Verkehr eingesetzten Antriebs- und Bremsleistungen, Mittelwerte und Streubereiche



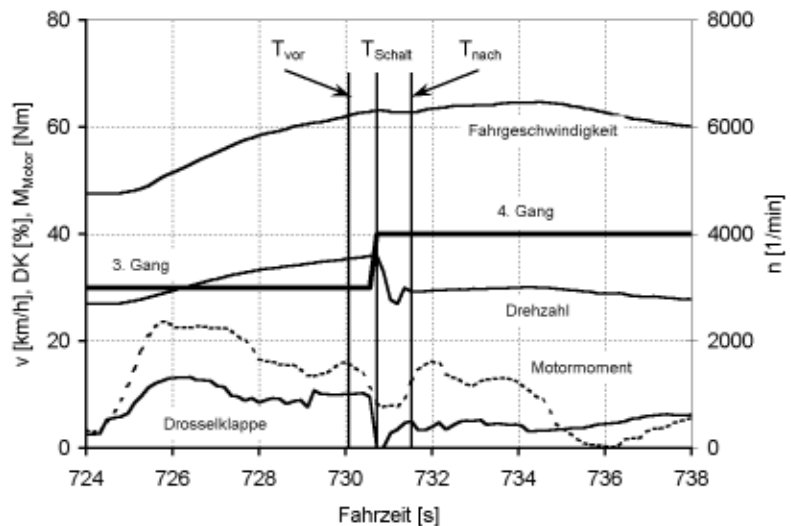
**Bild 4.24:** Häufigkeitsverteilungen der Motorbetriebspunkte bei Fahrten im öffentlichen Straßenverkehr

Für eine praxisorientierte Auslegung des Motors sollte der Verbrauch daher weniger stark im jeweiligen Bestpunkt (i.a. hohe Last bei mittlerer Drehzahl), sondern vielmehr im Betriebsbereich geringer Last optimiert werden, wobei die Darstellungen aus **Bild 4.24** die für die untersuchten Fahrzeuge relevanten Bereiche beschreiben.

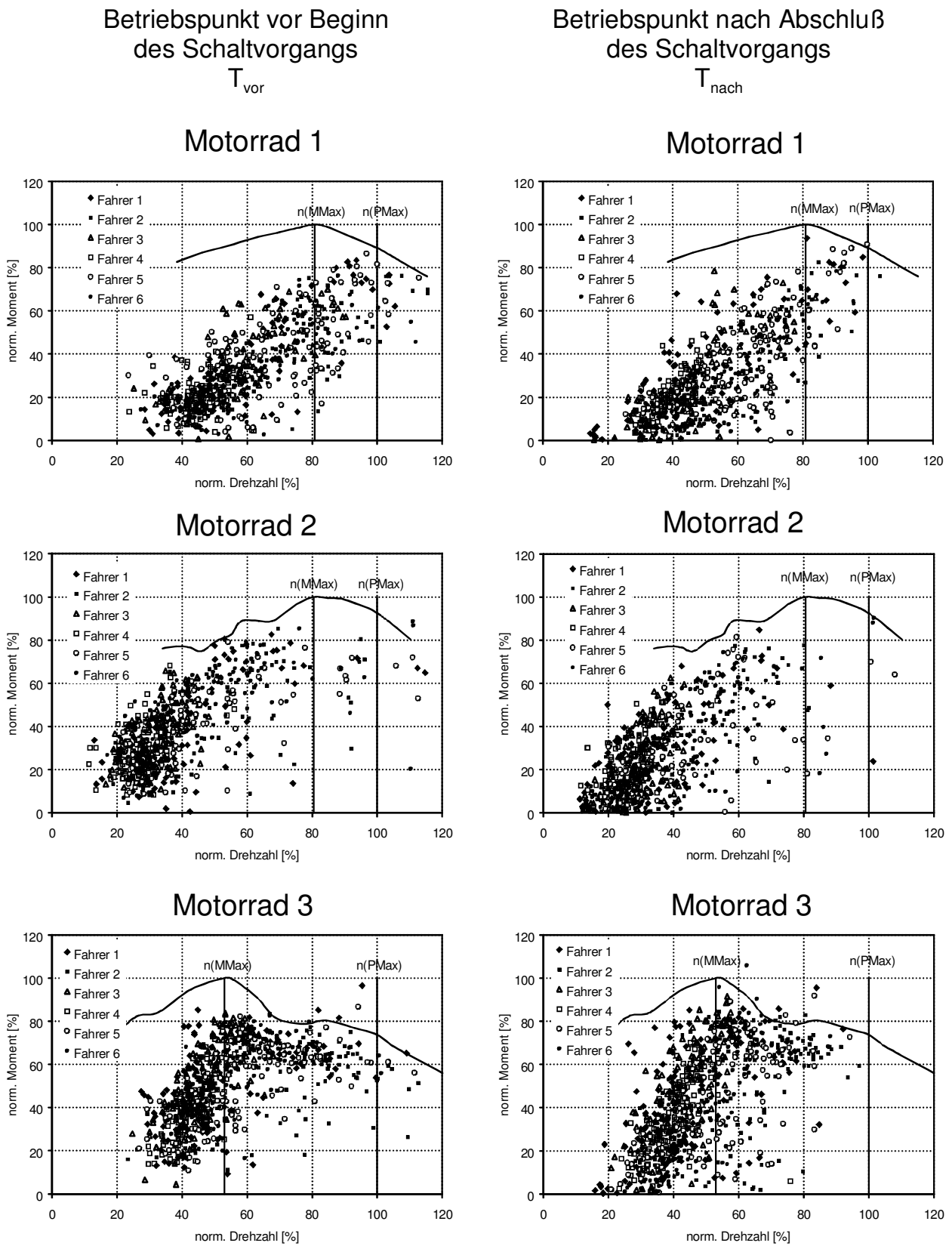
Mit den Motorrädern 1 und 3 wird die Vollast bei niedrigen Drehzahlen weitgehend gemieden. Neben den deutlich spürbaren Motorschwingungen der Zweizylinder-Triebwerke dieser Motorräder in diesem Betriebsbereich ist hierfür vermutlich auch die Notwendigkeit des Umgreifens am Gasdrehgriff zum Erreichen den Vollastanschlags mit verantwortlich. Darüber hinaus besteht beim drehmomentenstarken Motorrad 1 im Bereich des maximalen Motormoments in kleinen Gängen, besonders in Fahrsituationen auf unebenen Straßen oder auf Steigungsabschnitten, die Gefahr des Abhebens des Vorderrads oder Durchdrehens des Hinterrads, was von der überwiegenden Zahl der Fahrer mit einem subjektiv als ausreichend betrachteten Sicherheitsabstand vermieden wurde.

#### 4.2.6 Schaltpunkte und Schaltstrategien

In **Bild 4.26** sind für 6 verschiedene Fahrer, die jeweils unter vergleichbaren Bedingungen mit allen untersuchten Motorrädern die Versuchsstrecke VMS befuhren (sommerliche Außentemperaturen, trockene oder allenfalls auf geringen Streckenanteilen feuchte Fahrbahn), die Schaltpunkte für Gangwechsel in höhere Getriebegänge eingetragen. Als Auswahlkriterium für die angegebenen Betriebspunkte wird dabei ein Zeitintervall von  $\pm 0,8$  Sekunden um den Zeitpunkt des Gangwechsels herum betrachtet. In diesem Zeitintervall wird sowohl vor als auch nach dem Schaltvorgang der Zeitpunkt mit der maximalen Antriebsleistung bestimmt, wie in **Bild 4.25** exemplarisch für einen Schaltvorgang gezeigt. Die zugehörigen Drehzahl/ Motormomentwerte bilden die in **Bild 4.26** als Ausgangspunkt bzw. Zielpunkt dargestellten Kennfeldpunkte.



**Bild 4.25:** Bestimmung des Betriebspunkts vor und nach einem Schaltvorgang



**Bild 4.26:** Hochschaltpunkte im Motorkennfeld, Vergleich von 6 Fahrern mit den Motorrädern 1, 2 und 3, Versuchsstrecke B

Wie auch schon die umgesetzten Motorleistungen zeigten (**Bild 4.23** auf Seite 76), ist der Einfluß des Fahrzeugs auf die Fahrweise gering im Vergleich zum Unterschied, der durch den Fahrer hervorgerufen wird. Fahrer 4, der als privates Motorrad ein zum Versuchsfahrzeug 1 sehr ähnliches Modell besitzt (gleiches Motor-/ Getriebekonzept), fährt auch mit den anderen Motorrädern mit ähnlich geringen Motordrehzahlen. Umgekehrt neigen die Fahrer, die Drehzahlen bis in den Bereich der Nenndrehzahl verwenden, dazu, diese Fahrweise bei allen zur Verfügung gestellten Motorrädern anzuwenden.

Die unter dem Aspekt des spezifischen Kraftstoffverbrauchs günstigen Kennfeldpunkte bei niedriger Drehzahl und hoher Last werden mit Motorrädern offensichtlich häufig nicht genutzt. Vielmehr wird bei vielen Schaltvorgängen, z.B. wie in **Bild 4.25**, ein Beschleunigungsvorgang auch bei mäßiger Last noch im niedrigen Gang vorgenommen, was angesichts des hohen Drehvermögens der Motorradmotoren im öffentlichen Verkehr nur selten durch die zulässige Höchstdrehzahl beschränkt wird. Nach erfolgtem Schaltvorgang sinkt daher vor allem bei Schaltvorgängen, die bei geringer Last und maximal mittlerer Drehzahl vorgenommen werden, sowohl die Motordrehzahl als auch die Last, was einer verbrauchsoptimalen Betriebsweise widerspricht.

Wird hingegen bei forcierter Fahrweise erst bei hohen Drehzahlen hochgeschaltet, so steigt durch den Schaltvorgang dem Motorverhalten bei konstanter Leistungsabforderung entsprechend die Last an.

Wie aus **Bild 4.26** abzulesen, erfolgt die überwiegende Zahl der Hochschaltvorgänge aller Fahrer für die untersuchten Fahrzeuge bei weniger als 60 % der jeweiligen Nenndrehzahl, wobei die vor dem Schaltvorgang anliegende Motorlast tendenziell mit der zugehörigen Drehzahl ansteigt.

#### 4.2.7 Zusammenfassende Quantifizierung typischer Betriebsbedingungen

Aus den vorangehenden Betrachtungen ergeben sich für eine typische Motorrad- bzw. Pkw-Fahrt auf verschiedenen Streckenkategorien die quantitativen Beschreibungen nach **Tabelle 4.4**. Aus diesen Zahlenwerten lassen sich Größenordnungen für Fahrten unter unterschiedlichen Einsatzbedingungen, z.B. ausschließlich Stadtverkehr oder häufiger Autobahnbetrieb, abschätzen, die für die Definition realitätsnaher Meßabläufe zugrunde gelegt werden sollen.

Um den Fahrzeugeinfluß zu belegen, stellen die in der Tabelle angegebenen Extremwerte dabei jeweils Mittelwerte aller mit einem der Fahrzeuge durchgeführten Versuchsfahrten dar. Die Einflüsse Fahrer und Verkehrsdichte, die bei jeder Einzelfahrt dominieren, sind daher durch diese Mittelung reduziert, d.h. die Differenz der Minimal- und Maximalwerte resultiert überwiegend aus dem unterschiedlichen Fahrleistungspotential der Fahrzeuge.

Signifikante Unterschiede der Standanteile konnten zwischen den Fahrzeugen und Fahrzeugkategorien nicht gefunden werden, so daß die angegebenen Werte sowohl für Pkw als auch für Motorräder gelten. Wie die mittleren Fahrgeschwindigkeiten im Fahranteil zeigen, sind die Motorräder besonders außerhalb geschlossener Ortschaften im Mittel schneller, wobei der Unterschied für die hier betrachteten Fahrzeuge auf nicht

**Tabelle 4.4:** Typische Betriebszustände von Motorrädern und Pkw in Abhängigkeit vom Straßentyp, Mittelwerte und Extremwerte für die untersuchten Fahrzeuge, jeweils über alle Versuchsfahrten mit einem Fahrzeug gemittelt

Straßenkategorie	Mittlere Standzeit, bezogen auf die gesamte Fahrzeit	Beobachtete mittlere Geschwindigkeit im Fahranteil, Motorräder [km/h]	Beobachtete mittlere Geschwindigkeit im Fahranteil, Pkw [km/h]	Mittlere Antriebsarbeit Motorräder [ca. kJ/km]	Mittlere Antriebsarbeit Pkw [ca. kJ/km]
Stadtverkehr, $v_{\max}=30$ km/h	Min 1 % Ø 5 % Max 10 %	Min 34 Ø 38 Max 41	Min 33 Ø 37 Max 40	Min 110 Ø 200 Max 230	Min 250 Ø 320 Max 370
Stadtverkehr und Ortsdurchfahrten, $v_{\max}=50$ km/h	9 % 11 % 13 %	Min 41 Ø 48 Max 51	Min 42 Ø 45 Max 46	Min 150 Ø 190 Max 210	Min 340 Ø 420 Max 490
Landstraße, $v_{\max}=70$ km/h	1 % 4 % 9 %	Min 61 Ø 70 Max 81	Min 60 Ø 66 Max 69	Min 210 Ø 240 Max 270	Min 410 Ø 480 Max 530
Landstraße, $v_{\max}=100$ km/h	< 1 % 2 % 7 %	Min 58 Ø 66 Max 73	Min 53 Ø 58 Max 63	Min 260 Ø 320 Max 340	Min 480 Ø 580 Max 710
Autobahn, $v_{\max}=130$ km/h	0 % 1 % 2 %	Min 97 Ø 109 Max 114	Min 98 Ø 102 Max 109	Min 290 Ø 340 Max 420	Min 560 Ø 630 Max 680
Autobahn, $v_{\max}$ unbeschränkt	0 % 2 % 3 %	Min 100 Ø 114 Max 124	Min 98 Ø 114 Max 130	Min 410 Ø 480 Max 740	Min 530 Ø 700 Max 870
<b>Mittelwert für untersuchte Motorradfahrstrecken</b>	2 % 4 % 8 %	Min 59 Ø 62 Max 65	Min 53 Ø 58 Max 60	Min 260 Ø 290 Max 320	Min 460 Ø 550 Max 640

gesondert beschränkten Landstraßenabschnitten in der Größenordnung von ca. 10 bis 15 % liegt.

Die Gegenüberstellung der erforderlichen mittleren streckenbezogenen Antriebsarbeiten zeigt, wie mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit und damit wachsendem Anteil des Luftwiderstands am Gesamtwiderstand der Energiebedarfsvorteil des Motorrads geringer wird.

Anhand der Zahlenwerte nach **Tabelle 4.4** können auch Abschätzungen für Streckenkollektive vorgenommen werden, die nicht der für die diese Arbeit ausgewählten Zusammensetzung entsprechen (z.B. Fahrweise von Pkw und Motorrädern im Stadtverkehr). Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, daß die Streckenwahl vorwiegend durch Überlegungen zu typischen Motorradfahrstrecken geleitet war, so daß eine Übertragung auf reinen Stadtverkehr in Großstädten nur eingeschränkt erfolgen sollte bzw. einer zumindest exemplarischen experimentellen Überprüfung bedarf.

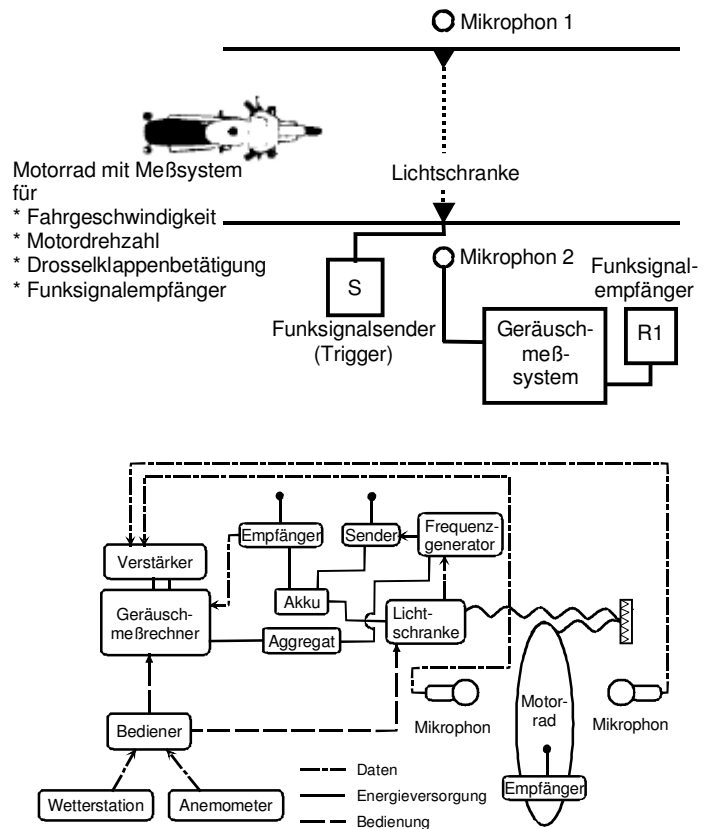
### 4.3 Abhängigkeit des Fahrgeräuschs vom Betriebszustand

Schon die Darstellung des Betriebsbereichs während der gesetzlichen Fahrgeräuschprüfung nach ISO R 362 nach **Bild 3.7** auf Seite 36 zeigt, daß das Potential des nutzbaren Drehzahlbandes bei weitem nicht ausgenutzt wird. Die Messung kann daher keine Worst-case-Betrachtung darstellen, wie es mit ihrer ursprünglichen Definition beabsichtigt war. In der Praxis entscheidet daher aufgrund des gezeigten großen Fahrereinflusses auf die Häufigkeiten einzelner Motorbetriebspunkte weitestgehend der Fahrer, welchen Geräuschpegel er mit seinem Fahrzeug verursacht.

Um den Bereich der möglichen Geräuschemissionen in Abhängigkeit vom Betriebszustand zu erfassen, wurde der in ISO R 362 beschriebene Meßaufbau gemäß **Bild 4.27** um eine Ortsmessung des Fahrzeugs beim Durchfahren der Mikrofonlinie (Lichtschranke) sowie fahrzeugfeste Meßtechnik zur Erfassung des Fahrzustands erweitert, **Bild 4.28**.

Mit diesem Meßaufbau wurden Geräuschkennfelder in Abhängigkeit vom Fahrzustand bestimmt, **Bild 4.29**. Diese zeigen, daß das Fahrgeräusch von Motorrädern schon im serienmäßigen Zustand, d.h. ohne Veränderungen z.B. an der Abgasanlage durch Zeitablauf (Verschleiß, Korrosion) oder Manipulation, um ein Vielfaches höher liegen kann als der Geräuschgrenzwert von derzeit 80 dB(A) angibt.

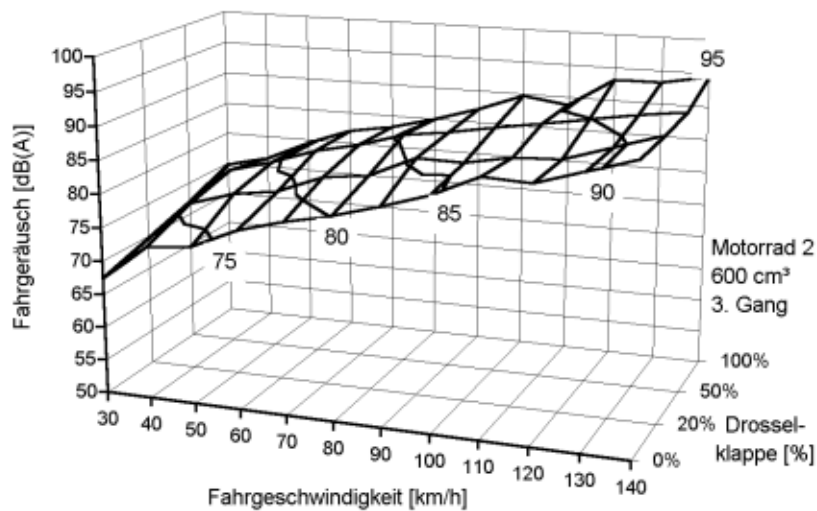
Neben dieser Erkenntnis gehen aktuelle Schätzungen davon aus, daß beim derzeitigen Fahrzeugbestand in Deutschland rund 35 % der Fahrzeuge über Abgasanlagen verfügen, die



**Bild 4.27:** Meßaufbau zur Geräuschmessung nach ISO R 362, Zusätzliche Meßtechnik



**Bild 4.28:** Durchführung der Fahrgeräuschmessungen



**Bild 4.29:** Geräuschkennfeld, Geräuschemissionen in Abhängigkeit von Last und Fahrgeschwindigkeit im 3. Gang

nicht oder nicht mehr den gesetzlichen Anforderungen genügen [65]. Mit solchen Anlagen wurden unter Typprüfbedingungen Geräuscherhöhungen von bis zu 20 dB(A) festgestellt [82, 83], wobei für das reale Verkehrsgeschehen zusätzlich die oben für serienmäßige Fahrzeuge dargestellten Steigerungen beim Betrieb außerhalb der Prüfbedingungen angenommen werden müssen.

Hieraus ergibt sich die Forderung nach einem besser geeigneten Ge-

räuschmeßverfahren sowohl für die Typprüfung als auch für Verkehrsüberwachungsmaßnahmen ab, da die aktuellen Verfahren vielfache Mängel und Probleme aufweisen, vgl. Kapitel 3.3.2, Seite 33.

#### 4.4 Geräuschemissionen im realen Verkehr

Die Kombination der Geräuschkennfelder aller Getriebestufen mit den gemessenen Fahrzustandsgrößen Fahrgeschwindigkeit, Motordrehzahl und Drosselklappenstellung erlaubt eine näherungsweise Quantifizierung der im realen Verkehr emittierten Fahrgeräusche, **Bild 4.30**. Die Steckenbereiche außerhalb geschlossener Ortschaften sind in dieser Darstellung grau hinterlegt. Besonders deutlich ist anhand der deutlich höheren Geräuschemissionen, die durch hohe Fahrgeschwindigkeiten und Motordrehzahlen hervorgerufen werden, der Streckenbereich auf Autobahnen zwischen Streckenkilometer 10 und 29,5 zu erkennen.

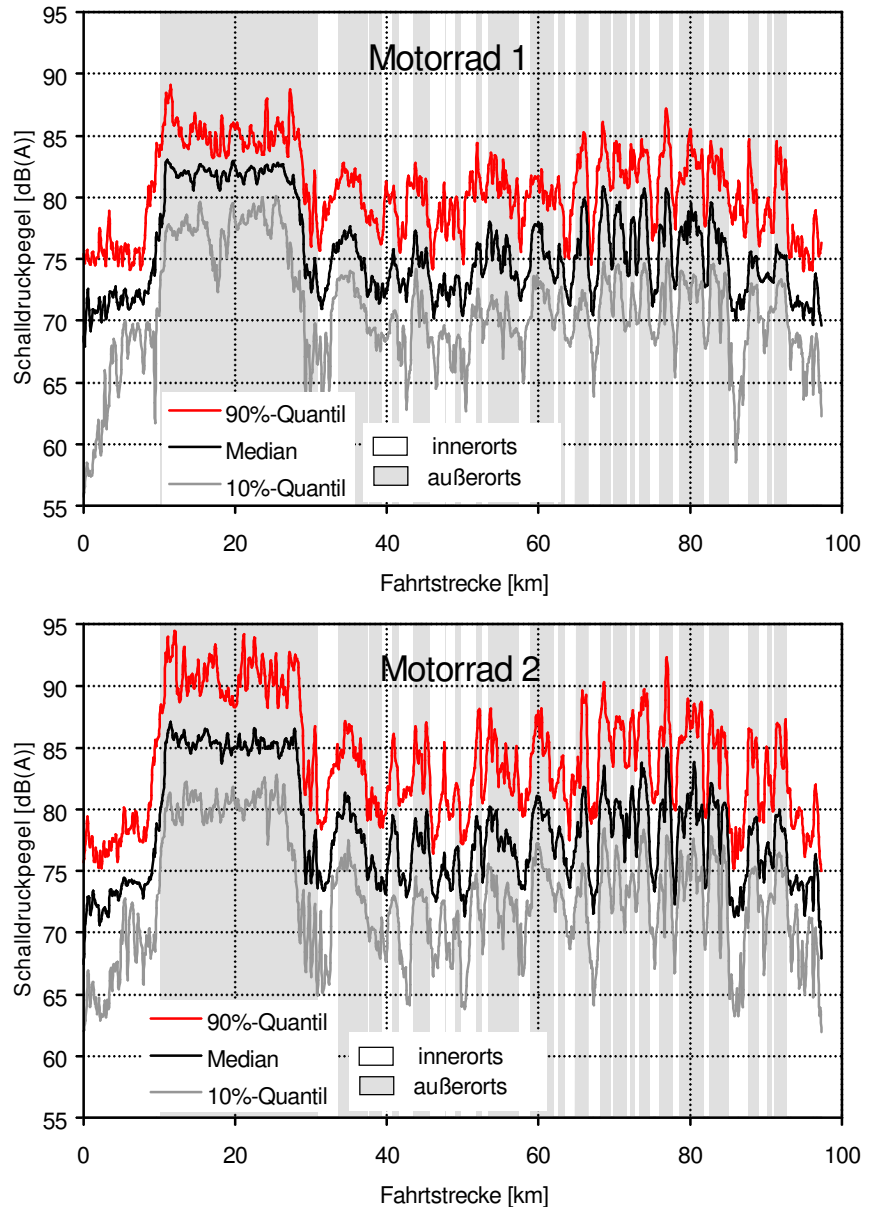
In dieser Art der Bestimmung der Emissionen sind lokale Effekte der Schallausbreitung nicht enthalten, wie sie durch Reflexionen in engen Häuserschluchten oder durch die ungehinderte Ausbreitung innerhalb von Tälern entstehen, sondern es wird eine gleichförmige Schallausbreitung im freien Feld unterstellt.

Anhand der Darstellung nach **Bild 4.30** wird der gravierende Einfluß der Fahrweise besonders deutlich. Die Differenz des 10%-Quantils der „leisesten“ zum 90%-Quantil der „lautesten“ Fahrer beträgt auf allen Streckenbereichen und für beide Motorräder zwischen ca. 10 und 15 dB(A), wobei bereits die Erhöhung um 10 dB(A) hinsichtlich des subjektiven Höreindrucks in etwa einer Verdoppelung der Lautstärkeempfindung entspricht. Hierbei sind aufgrund der Betrachtung der Quantile die absoluten Extrema noch nicht enthalten. Unabhängig von allen zukünftig zu diskutierenden technischen Gestal-

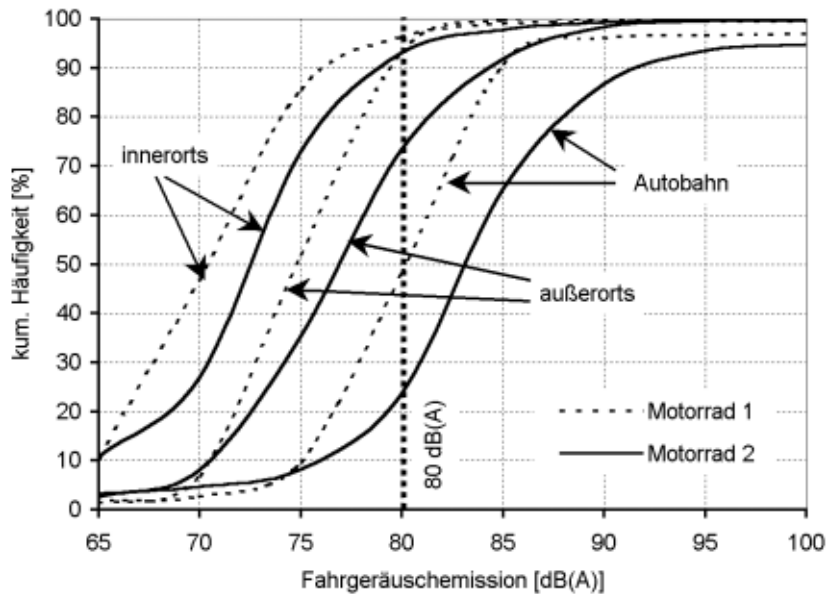
tungen zur Geräuschreduzierung muß daher festgestellt werden, daß der Einfluß des Fahrers vermutlich die dominierende Größe bleiben wird.

Der Grund für den großen Fahrereinfluß liegt in der Tatsache, daß aufgrund des hohen Leistungsangebots der Motorräder stets eine Fülle möglicher Betriebspunkte zur Erfüllung des momentanen Leistungsbedarfs zur Verfügung steht, wobei deren Auswahl dem Fahrer obliegt. Die im realen Verkehr überwiegend erforderlichen Motorleistungen können dabei im allgemeinen in wenigstens 3, zuweilen sogar 4 oder 5 verschiedenen Getriebe­gängen mit den zugehörigen Last/Drehzahlkombinationen erreicht werden, was besonders aufgrund des starken Drehzahleinflusses zu den gravierenden Unterschieden des resultierenden Fahrgeräuschs führt.

Anhand der Summenhäufigkeiten der Geräuschemissionen auf verschiedenen Streckenabschnitten, **Bild 4.33**, wird erkennbar, wie oft der als Grenzwert bezeichnete Fahrgeräuschwert von 80 dB(A) im realen Verkehrsgeschehen überschritten wird. Besonders die Stadt- und Landstraßenanteile wirken sich dabei maßgeblich auf die Lärmbelastigung der Bevölkerung aus. Innerhalb der geschlossenen Ortschaften liegt der Anteil der Fahrstrecke, auf der mehr als 80 dB(A) emittiert werden, für Motorrad 1 bei knapp 4 %, für Motorrad 2 sogar bei annähernd 7 %. Auf den Landstraßenabschnitten der untersuchten Strecke ist Motorrad 1 bei mittlerer Fahrweise bereits auf ca. 7 % der Fahrstrecke lauter als 80 dB(A), Motorrad 2 hingegen sogar auf gut 16 %. Der im Meßverfahren gemäß ISO R 362 ermittelte Fahrgeräuschwert stellt daher bei weitem keinen realistischen Geräuschgrenzwert für Fahrten im realen Straßenverkehr dar.



**Bild 4.30:** Geschätzte Geräuschemissionen der Motorräder 1 und 2 im realen Verkehr, 10 %-, 90 %-Quantil und Median des Fahrerkollektivs B (30 Fahrer) auf Versuchsstrecke VMS



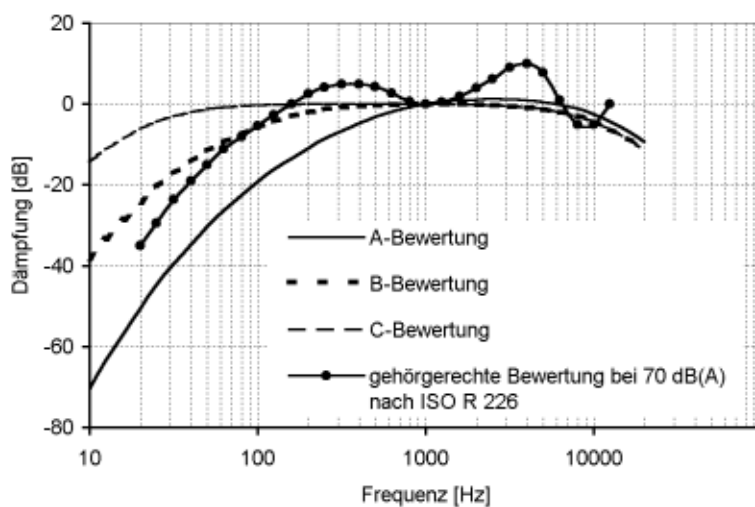
**Bild 4.31:** Mediane der Häufigkeitsverteilungen der streckenbezogenen Geräuschemissionen im realen Verkehr, Fahrerkollektiv B (30 Fahrer), Versuchsstrecke VMS

Bei einer unterstellten mittleren Fahrweise ergeben sich im direkten Vergleich der mit serienmäßigen Abgasanlagen ausgestatteten Motorräder 1 und 2 nach **Bild 4.31** trotz sehr unterschiedlicher Gestaltung hinsichtlich Hubraum und Drehvermögen Geräuschunterschiede von im Mittel 2,6 dB(A). Diese im realen Verkehr vorgefundene Differenz der Pegel beider Motorräder entspricht gut den aus den jeweiligen Geräuschkennfeldern ermittelten Unterschieden. Dort betrug die mittlere

Abweichung zwischen beiden Fahrzeugen im Mittel 2,4 dB(A) bezogen auf alle Kennfeldpunkte und ca. 2,9 dB(A) bei Nulllast sowie bei 20 % Last, also den in der Realität besonders häufig auftretenden Lastzuständen. Der Vergleich von Geräuschkennfeldern stellt daher ein geeignetes Mittel zur Beurteilung der Geräuschemissionen im realen Verkehr dar.

Dabei ist zu berücksichtigen, daß die genannten Unterschiede von 2 bis 3 dB(A) zwar subjektiv deutlich wahrnehmbar sind, aber bei weitem unterhalb des Fahrereinflusses liegen, so daß kaum von einem lauten Motorrad, sondern besser von einer lauten Mo-

torrad/Fahrerkombination gesprochen werden sollte. Für die tatsächlichen Geräuschemissionen eines Fahrzeugs spielen daher neben den rein technischen auch psychologische Faktoren (wie z.B. der Aufforderungscharakter eines Motorrads) eine erhebliche Rolle.



**Bild 4.32:** Bewertungsfilter zur Berücksichtigung des menschlichen Geräuschempfindens, Vergleich zur gehörgerechten Bewertung nach ISO R 226

Zur Beurteilung der subjektiv empfundenen Lästigkeit eines Geräusches ist neben dem Pegel auch die Frequenzzusammensetzung von großer Bedeutung. Die grobe Annä-

herung des menschlichen Frequenzempfindens durch Filter mit frequenzabhängiger Dämpfung zeigt **Bild 4.32**. Eine bessere Annäherung an das durchschnittliche menschliche Lautstärkeempfinden kann nach ISO R 226 erfolgen, indem für jedes Pegelniveau gemäß Formel 4.18 eine eigene Bewertungskurve angewendet wird, die den unbewerteten Pegel  $L_f$  in den bewerteten Pegel  $L_i$  überführt.

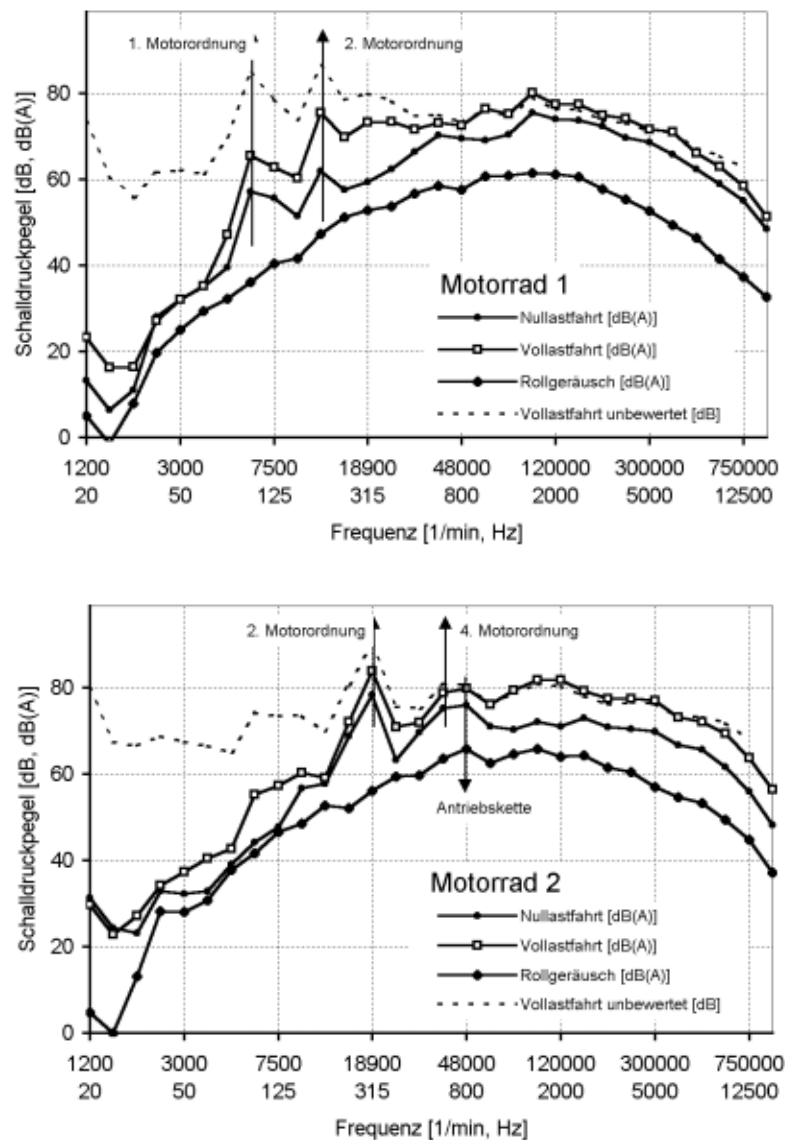
$$L_i = 4,2 + \frac{a_f \cdot (L_f - T_f)}{1 + b_f \cdot (L_f - T_f)} \quad (4.18)$$

Darin sind  $a_f$ ,  $b_f$  und  $T_f$  Parameter, die aus einer Tabelle in Abhängigkeit von der Frequenz entnommen werden [56]. Der exemplarische Vergleich zwischen der gehörge rechten Bewertung nach ISO 226 bei 70 dB und der üblichen A-Bewertung zeigt, daß die A-Bewertung in weiten Frequenzbereichen erheblich stärker dämpft, als es dem menschlichen Hörempfinden entspricht.

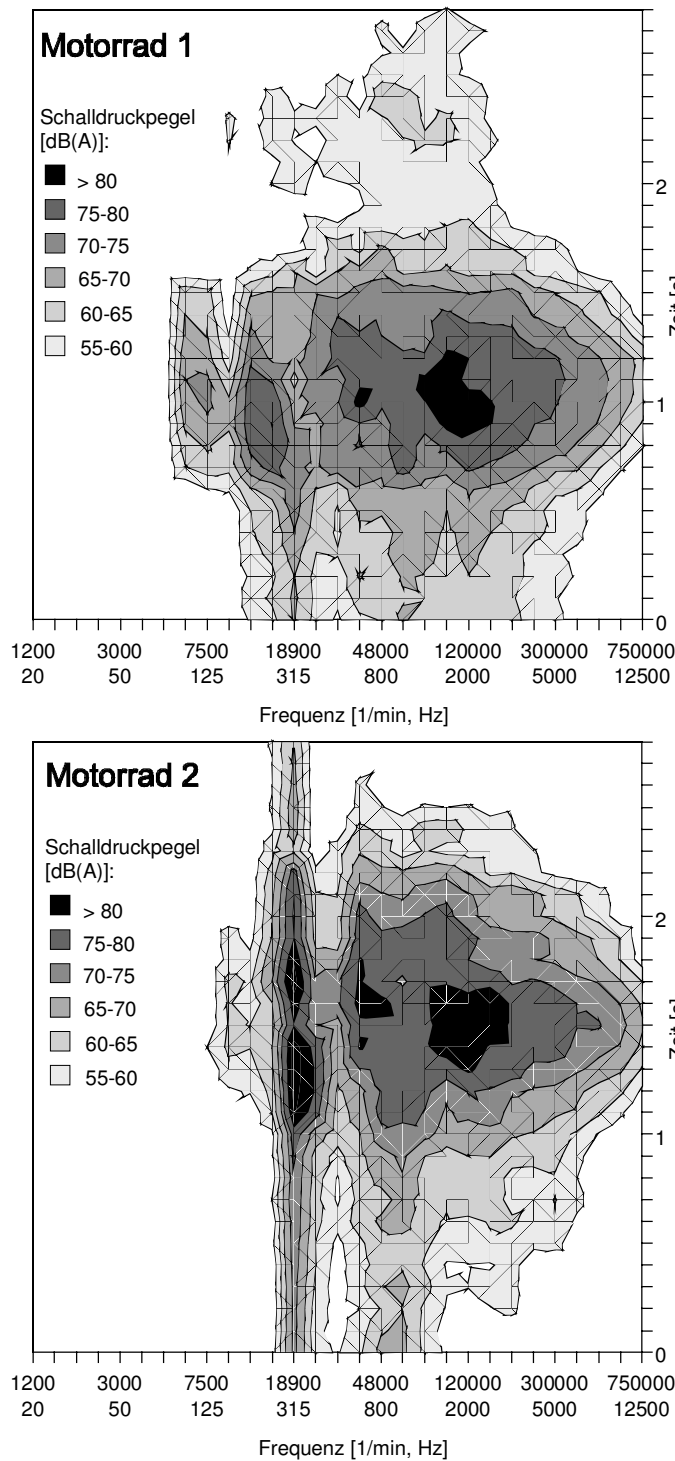
Die B-Bewertung würde in diesem Pegelbereich besonders für tiefe Frequenzen eine bessere Annäherung liefern, wird in der meßtechnischen Praxis jedoch kaum verwendet, so daß ihre Anwendung für Geräuschuntersuchungen an Kraftfahrzeugen kaum durchsetzbar erscheint.

Die Terzspektren des Fahrgeräusches, **Bild 4.33**, verdeutlichen für Motorrad 1 sowohl bei Vollast als auch bei Nullast einen deutlichen Einfluß der Schwingungen in erster und zweiter Motorordnung des Zweizylinder-Boxermotors, die zum Teil auf die nicht ausgeglichenen Massenmomente dieses Motorkonzepts zurückzuführen sind und zusätzlich von den Schwingungen des Ansaug- und Abgasmassenstroms überlagert werden.

Im Vergleich dazu treten bei Motorrad 2 mit Vierzylinder-Reihenmotor ledig-



**Bild 4.33:** Terzspektren der Motorräder 1 und 2, Vorbeifahrgeräusch bei konstant 120 km/h im 3. Gang



**Bild 4.34:** Zeitliche Veränderung des Frequenzspektrums bei der beschleunigten Vorbeifahrt, Vollastbeschleunigung im 3. Gang, Ausgangsgeschwindigkeit 120 km/h

lich die Motorordnungen 2 und 4 deutlich hervor, die Massenkräfte erster Ordnung sind aufgrund des Motorkonzepts ausgeglichen. Der hohe Anteil der vierten Motorordnung läßt auf pulsierende Gassäulen schließen, die durch geeignete Auslegungen von Ansaug- und Abgasstrakt entstehen und für eine Verbesserung der Zylinderfüllung sorgen können.

Für beide Motorräder kann festgestellt werden, daß durch die A-Bewertung im Vergleich zur gehörgerechten Bewertung beide Motorräder begünstigt werden, d.h. die abwerteten Schalldruckpegel sind geringer als die tatsächliche subjektive Empfindung des menschlichen Gehörs.

Mit der Vorbeifahrt eines beschleunigenden Motorrads an einem stehenden Beobachter ändert sich sowohl der wahrgenommene Schalldruckpegel als auch die spektrale Zusammensetzung des Geräusches. In **Bild 4.34** ist die zeitliche Veränderung des Motorrad-Vorbeifahrgeräusches als Schalldruckpegel über der Frequenz für die Motorräder 1 und 2 dargestellt.

Gut erkennbar sind für Motorrad 1 die Maxima der ersten und zweiten Motorordnung im Bereich von 125 Hz und 250 Hz sowie die höchsten Pegel bei 630 Hz und 2.500 Hz. Die Pegel aller Frequenzen fallen bei diesem Motorrad vor und nach dem Spektrum mit dem höchsten Gesamtpegel vergleichsweise schnell und gleichmäßig ab.

Für Motorrad 2 ähnelt der zeitliche Verlauf der Spektren von Motorrad 2 demjenigen von Fahrzeug 1. Wie für Motorrad 2 schon bei der Betrachtung der Einzelspektren festgestellt wurde, liegen die maximalen Terzpegel im Bereich der zweiten Motorordnung, hier also bei ca. 315 Hz. Neben der absoluten Höhe der Pegel fällt auf, daß sie besonders

vor, aber auch nach dem Maximum erheblich langsamer abfallen als diejenigen von Fahrzeug 1. Über der gesamten dargestellten Meßzeit, d.h. während der Durchfahrt durch die komplette Meßstrecke, übertrifft die zweite Motorordnung die Höhe der übrigen Pegel. Diese Geräuschanteile werden vom Motorrad also zu wesentlichen Anteilen nach vorne und hinten abgestrahlt, was für einen dominierenden Einfluß der Ansaug- und Abgasgeräusche auf das Gesamtgeräusch bei diesem vollverkleideten Sportmotorrad spricht. Einerseits führen diese Einflüsse zu einem charakteristischen Klangbild, andererseits aber auch zu einem aus dem üblichen Verkehrsgeschehen herausstechenden Fahrgeräusch, das besonders deutlich und teilweise auch besonders störend wahrgenommen werden kann.

Neben Pegel und Frequenzzusammensetzung sind zeitliche Veränderungen der enthaltenen Frequenzen wie Rauigkeit, Schärfe und weitere Größen neuerer psychoakustischer Forschungen von Bedeutung, deren Anwendung und Übereinstimmung mit dem subjektiven Empfinden Gegenstand weiterer Forschung sein muß. Allerdings haben alle meßtechnischen Möglichkeiten zur Geräuscherfassung den Nachteil, daß interindividuelle Streuungen des Geräuschempfindens oder Veränderungen mit dem Lebensalter keine Berücksichtigung finden, so daß Optimierungen mit dem Ergebnis eines von allen Hörern als angenehm empfundenen Geräuschs kaum möglich erscheinen. Nicht zuletzt spielen auch Erwartungshaltung und Sympathiewert einer Geräuschquelle eine erhebliche Rolle für das kognitive Geräuschempfinden.

#### **4.5 Fazit aus Kapitel 4**

Mit Hilfe der angewendeten Vorgehensweise aus Befragung einer größeren Motorradfahrer-Gruppe und anschließender meßtechnischer Beobachtung des Fahrerverhaltens ausgewählter Fahrer im realen Verkehr konnten die typischen Betriebsweisen in Abhängigkeit vom eingesetzten Fahrzeugtyp identifiziert und quantifiziert werden.

Die Streckenlängen üblicher Motorradfahrstrecken liegen für leistungsstarke Fahrzeuge mit überwiegend freizeitorientierter Nutzung deutlich oberhalb durchschnittlicher Streckenlängen von Pkw. Die gewöhnliche Straßennutzung ist bei Motorrädern stark zugunsten des Überlandverkehrs auf Bundes- und Landstraßen verschoben. Die im Mittel höhere Dynamik des Betriebs von Motorrädern kommt vor allem auf Streckenabschnitten außerhalb von geschlossenen Ortschaften zum Ausdruck.

Wie die Betrachtungen zum Gesamtwirkungsgrad der untersuchten Pkw und Motorräder verdeutlichen, geht der vergleichsweise hohe spezifische Kraftstoffverbrauch der hochmotorisierten Krafträder überwiegend auf die Teillastproblematik des Otto-Motors zurück. Maßnahmen zur Verbrauchssenkung sollten daher überwiegend den Betriebsbereich der niedrigen Teillast zum Gegenstand haben und sich weniger am spezifischen Bestpunkt des Motors orientieren. Wie die Darstellungen zu üblichen Bedienstrategien von Schaltgetrieben zeigen, sind die vom Fahrer gewählten Schaltpunkte unter Verbrauchsaspekten suboptimal, so daß auch beim Motorrad im Antriebsstrang durch intelligente Übersetzungsanpassungen ein bedeutendes Potential für Kraftstoffeinsparungen besteht.

Zusätzlich zu den untersuchten Fahrzeugeigenschaften konnten auch einige für die Betriebsweise relevante Eigenschaften von Verkehrsumfeld und Fahrer statistisch identifi-

ziert werden. Neben Verkehrsdichte und Straßenzustand sind für die Fahrweise vor allem der aktuelle Übungsgrad sowie das Lebensalter des Fahrers von Einfluß.

Aufgrund der unterschiedlichen Verwendungszwecke und Einsatzbedingungen erscheint hinsichtlich der anzuwendenden Prüfprozeduren eine Unterscheidung verschiedener Klassen motorisierter Zweiräder angebracht. Eine mögliche Gruppierung in drei Klassen wurde weiter oben vorgeschlagen.

Der Vergleich des Betriebszustands während der europaweit vorgeschriebenen gesetzlichen Fahrgeräuschmessung mit häufigen Fahrzuständen auf ausgewählten Problemabschnitten der untersuchten Fahrstrecken im öffentlichen Verkehr verdeutlicht den Handlungsbedarf für die Entwicklung eines besser an den realen Motorradbetrieb angepaßten Meßablaufs. Das Ziel sollte hierbei vor allem die Erfassung der häufig als besonders störend empfundenen Geräuschpegel bei hohen Motordrehzahlen sein. Langfristig kann durch eine Vorgabe des zu prüfenden Drehzahlbereichs auch eine Begrenzung des dargestellten Entwicklungstrends zu ständig wachsenden Nenndrehzahlen der Motorräder erreicht werden, ohne dabei eine gesetzliche Höchstdrehzahl explizit vorzuschreiben.

Die im folgenden entwickelten konkreten Vorschläge zur Abgasmessung berücksichtigen hauptsächlich die Eigenschaften und Betriebsweisen für die stark motorisierten Zweiräder im Sinne der vorgeschlagenen Klasse 3. Eine Anpassung für kleinere Krafträder sollte in ähnlicher Art und vergleichbarem Umfang anhand von weitergehenden Untersuchungen zur typischen Verwendung und Betriebsweise dieser Fahrzeuge vorgenommen werden. Die Vorschläge zur Fahrgeräuschmessung sind hingegen auch für die kleineren Fahrzeugkategorien unmittelbar anwendbar, wobei gegebenenfalls die Ausgangsgeschwindigkeit an das jeweilige Fahrzeugpotential angeglichen werden muß.

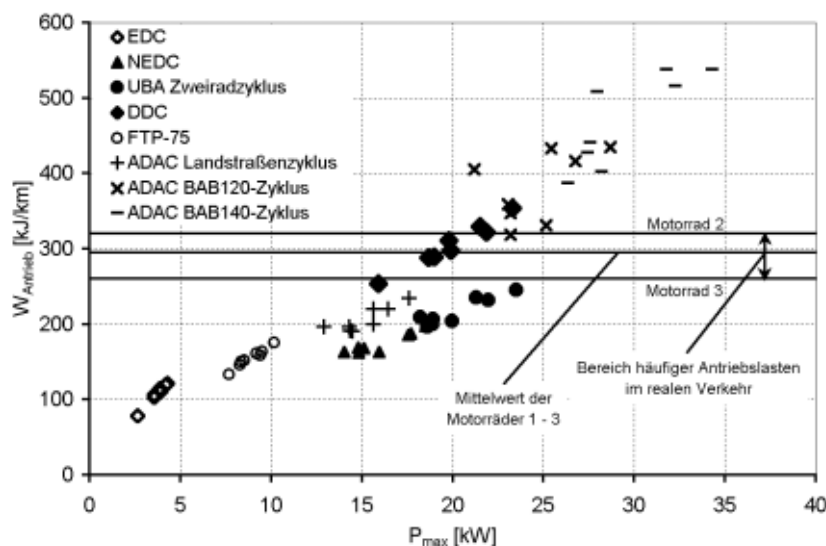
## 5 Empfehlungen für realitätsnahe Meß- und Prüfbedingungen

### 5.1 Abgas- und Verbrauchsmessung

Während des Fahrzeugbetriebs auf dem Rollenprüfstand in gesetzlich geregelten Fahrzyklen werden nur der Luftwiderstand, der Rollwiderstand und der Beschleunigungswiderstand einer Straßenfahrt nachgebildet. Der in der Realität ebenfalls bedeutsame Steigungswiderstand wird hingegen vernachlässigt. Die erforderliche Antriebsleistung hängt daher neben dem Geschwindigkeitsprofil maßgeblich von der im Prüfstand simulierten Fahrzeugmasse, dem Luftwiderstand und dem Rollwiderstand ab. Entscheidend für die Realitätsnähe synthetischer Fahrzyklen ist daher die realistische Kombination von Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsvorgaben, da sich hieraus unmittelbar der Beschleunigungswiderstand und damit die erforderliche Motorlast ergeben.

Nach 97/24/EG erfolgen die Abgasmessungen an motorisierten Zweirädern im EDC. Ein Übergang zum NEDC wurde und wird diskutiert. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Anwendung des US FTP-75 Zyklus. Daneben existieren noch verschiedene Fahrzyklen von Prüfinstitutionen und Verbänden (z.B. ADAC). Allen Zyklen ist gemeinsam, daß sie aus Beobachtungen des Fahrverhaltens von Pkw mit einem Übergewicht auf dem Betrieb im Stadtverkehr gewonnen wurden und die Betriebsweise von Motorrädern daher nur unzureichend repräsentieren können.

Wie der Vergleich dieser bestehenden Fahrzyklen mit den Ergebnissen aus den Fahrversuchen zeigt, **Bild 5.1**, bilden die vorhandenen Zyklen eine typische Motorradfahrt nur unzureichend ab. Für die Darstellung der Lasten in den Prüfzyklen wurden dabei die technischen Daten ausgewählter Motorräder unterstellt, die weitgehend die heute am Markt befindliche Bandbreite der Modelle bezüglich der Fahrwiderstandsgrößen Masse und Luftwiderstand abdecken. Zusätzlich zu den genannten Fahrzyklen sind bereits die



**Bild 5.1:** Vergleich der Motorbelastungen in üblichen Prüfzyklen und im realen Verkehr für 8 typische Motorräder (Hubraum 125 bis 1500 cm<sup>3</sup>, Leermasse 105 bis 290 kg)

Ergebnisse für den unten vorgeschlagenen Motorrad-Fahrzyklus DDC enthalten.

Speziell die heute angewendete Prüfung nach 97/24/EG auf Basis des EDC erfordert von Motorradmotoren kurzzeitige Leistungsabgaben von weniger als 5 kW, die Arbeitsbelastung für ein mittleres Motorrad liegt bei ca. 110 kJ/km.

Der NEDC, bereits seit längerer Zeit aufgrund praktischer Erwägungen als Alternative für Motor-

radmessungen in der Diskussion, erfordert aufgrund der Beschleunigungsvorgänge bei höheren Geschwindigkeiten zwar kurzzeitig höhere Leistungen, die mittlere Arbeitsbelastung liegt jedoch ebenfalls auf unrealistisch niedrigem Niveau.

Auch eine Weiterentwicklung des NEDC unter Vorgabe erhöhter Beschleunigungswerte (UBA-Zweiradzyklus) [114] führt überwiegend zu einer Steigerung der kurzzeitig maximal erforderlichen Motorleistungen, ohne die mittleren Motorlasten nennenswert zu erhöhen. Diese liegen immerhin im Bereich der langsamsten im realen Verkehr beobachteten Motorradfahrten.

Reine Autobahnfahrten, wie sie die ADAC-Autobahnfahrzyklen simulieren, erfordern aufgrund des permanenten Betriebs in hohen Geschwindigkeitsbereichen zu hohe Antriebslasten und –leistungen. Außerdem führt die Höhe der Fahrgeschwindigkeiten zu Schwierigkeiten in der praktischen Durchführung der Versuche auf Rollenprüfständen, und der Betrieb erfolgt weitgehend stationär im oberen Drehzahl-Last-Bereich des Kennfelds.

Um einen maximalen Nutzen aus den Gestaltungsmöglichkeiten zukünftiger Motor-konzepte zur Verringerung der realen Umweltbelastung ziehen zu können, wurde daher im Rahmen dieser Arbeit für Motorräder ein eigenständiges, die speziellen Eigenschaften des Motorrads und seiner Benutzung im Verkehr berücksichtigendes Belastungskollektiv entwickelt (Fahrzyklus DDC, **Bild 5.2**). Dieser Fahrzyklus orientiert sich am Mittelwert der im realen Verkehr gefundenen Fahrleistungen gemäß **Tabelle 4.4**, Seite 81, und berücksichtigt dabei die typische Dynamik des Motorradfahrbetriebs, d.h. er deckt verglichen mit den existierenden Zyklen einen vergrößerten Bereich der möglichen Betriebspunkte im Motorkennfeld ab.

Wie die Gegenüberstellung der resultierenden Motorbelastungen nach **Bild 5.1** zeigt, ist

### Fahrzyklus DDC

Dauer:	490 s
Strecke:	7.34 km
Mittlere Geschwindigkeit:	54 km/h
Zeitanteil $v=0$ :	10 %
Mittlere Geschwindigkeit (Fahranteil):	60 km/h
Maximale Geschwindigkeit:	114.6 km/h
Maximale Beschleunigung:	2.5 m/s <sup>2</sup>
Maximale Verzögerung:	-2.0 m/s <sup>2</sup>

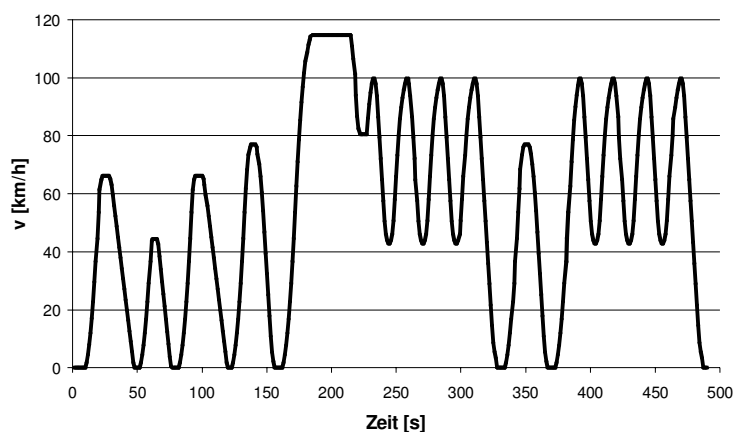
### Durchführung der Messungen:

Der Zyklus wird nach Kaltstart 3x gefahren.  
Es werden die Getriebegänge 1 - 5 verwendet.

Schaltpunkte:	
1->2	30 km/h
2->3	45 km/h
3->4	60 km/h
4->5	80 km/h

5->4	40 % Nenndrehzahl
4->3	35 % Nenndrehzahl
3->2	30 % Nenndrehzahl

In den 1. Gang wird nicht zurückgeschaltet.

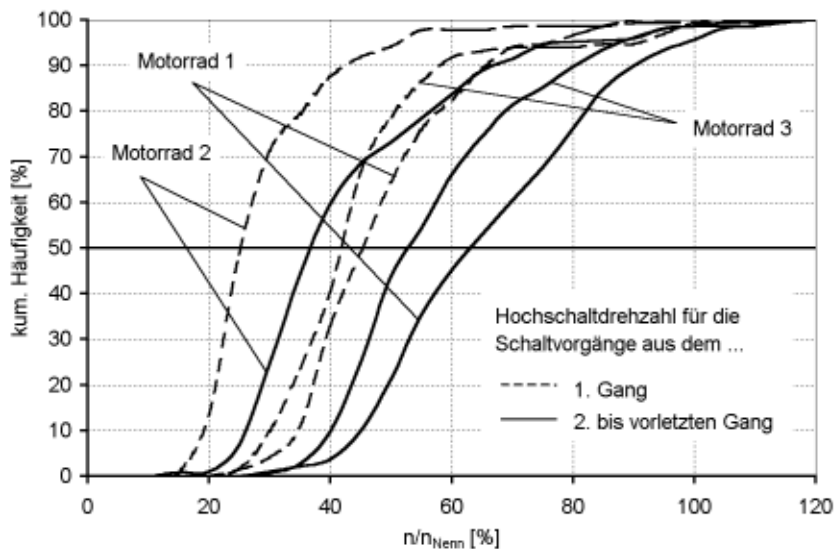


**Bild 5.2:** Darmstädter Fahrzyklus (DDC) für leistungsstarke motorisierte Zweiräder

der Fahrzyklus DDC je nach Fahrzeugeigenschaften mit Motorrädern mit einer minimalen Motorleistung ab ca. 16 - 24 kW bei geeigneter Getriebeabstufung und Schaltstrategie fahrbar, was von den heute auf dem Markt befindlichen Motorrädern oberhalb der Klasse der Leichtkrafträder erfüllt wird.

In Analogie zu anderen gesetzlichen Bestimmungen kann der Zyklus auch mit leistungsschwächeren Fahrzeugen gefahren werden, sofern zeitweise Unterschreitungen der vorgegebenen Geschwindigkeit geduldet werden und das Fahrzeug während dieser Zeiten mit Vollast betrieben wird. Dieser erhöhte Zeitanteil Vollast dürfte dabei durchaus dem realen Betrieb von leistungsschwachen Motorrädern entsprechen.

Die Schaltpunkte für den Fahrzyklus DDC wurden in Anlehnung an die Ergebnisse der



**Bild 5.3:** Häufigkeitsverteilungen der im realen Verkehr beobachteten Hochschaltdrehzahlen für verschiedene Motorräder

Fahrversuche festgelegt. **Bild 5.3** zeigt, daß Schaltvorgänge grundsätzlich nahezu im gesamten nutzbaren Drehzahlband vorgenommen werden. Vom 1. in den 2. Gang wird bei allen Fahrzeugen bereits bei vergleichsweise geringen Drehzahlen geschaltet. Da die höheren Gänge jeweils in ähnlichen Drehzahlbereichen gewechselt werden, sind in **Bild 5.3** für die Gänge 2 bis 5 lediglich die gemittelten Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Fahrzeuge

dargestellt. Wie aus einem Vergleich der Motorräder zu erkennen ist, erfolgt mit zunehmender Breite des verfügbaren Drehzahlbands die überwiegende Zahl der Hochschaltvorgänge bereits bei geringeren Relativedrehzahlen. Die Fahrer wählen die Schaltpunkte mit verschiedenen Fahrzeugen also weniger in Relation zur Ausnutzung der Motordrehzahl, sondern eher in Abhängigkeit von bestimmten Fahrgeschwindigkeiten. Daher wurden für den Fahrzyklus DDC die Hochschaltpunkte über die in **Bild 5.2** auf Seite 91 genannten Fahrgeschwindigkeiten definiert. Je nach Motorcharakteristik, Getriebeabstufung und Gesamtübersetzung des zu prüfenden Fahrzeugs können von den angegebenen Werten allerdings Abweichungen erforderlich werden.

Um die Fahrbarkeit des DDC sowie den Einfluß des Fahrzyklus auf die resultierenden Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbräuche nachzuweisen, wurden Messungen im Abgasprüflabor des TÜH durchgeführt, **Bild 5.4**. Dabei wurden die Emissionen verschiedener Motorräder unter Variation des Prüfzyklus (EDC, NEDC, DDC) gemessen. Analog zum Meßablauf für Pkw ab der Grenzwertstufe Euro III wurde dabei im NEDC sowie im DDC der Kaltstart der Motorräder mit erfaßt, d.h. die vormals übliche Warmlaufphase von 40 Sekunden Leerlauf entfiel. Die wesentlichen technischen Daten der

für die Abgasmessungen verwendeten Motorräder können der Tabelle A.1 des Anhangs, Seite 107 entnommen werden.

Es zeigt sich der erwartete, gravierende Einfluß der Motorbelastung und des zusätzlichen Kaltstarts auf die Abgasemissionen und den Verbrauch, **Bild 5.5**. Hierbei fällt speziell für die leistungsstarken Motorräder der Streckenkraftstoffverbrauch mit Erhöhung der Motorlast (NEDC gegenüber EDC) zunächst ab, was als Folge der Verlagerung der typischen Betriebspunkte in Kennfeldbereiche mit geringerem spezifischem Verbrauch interpretiert werden kann.



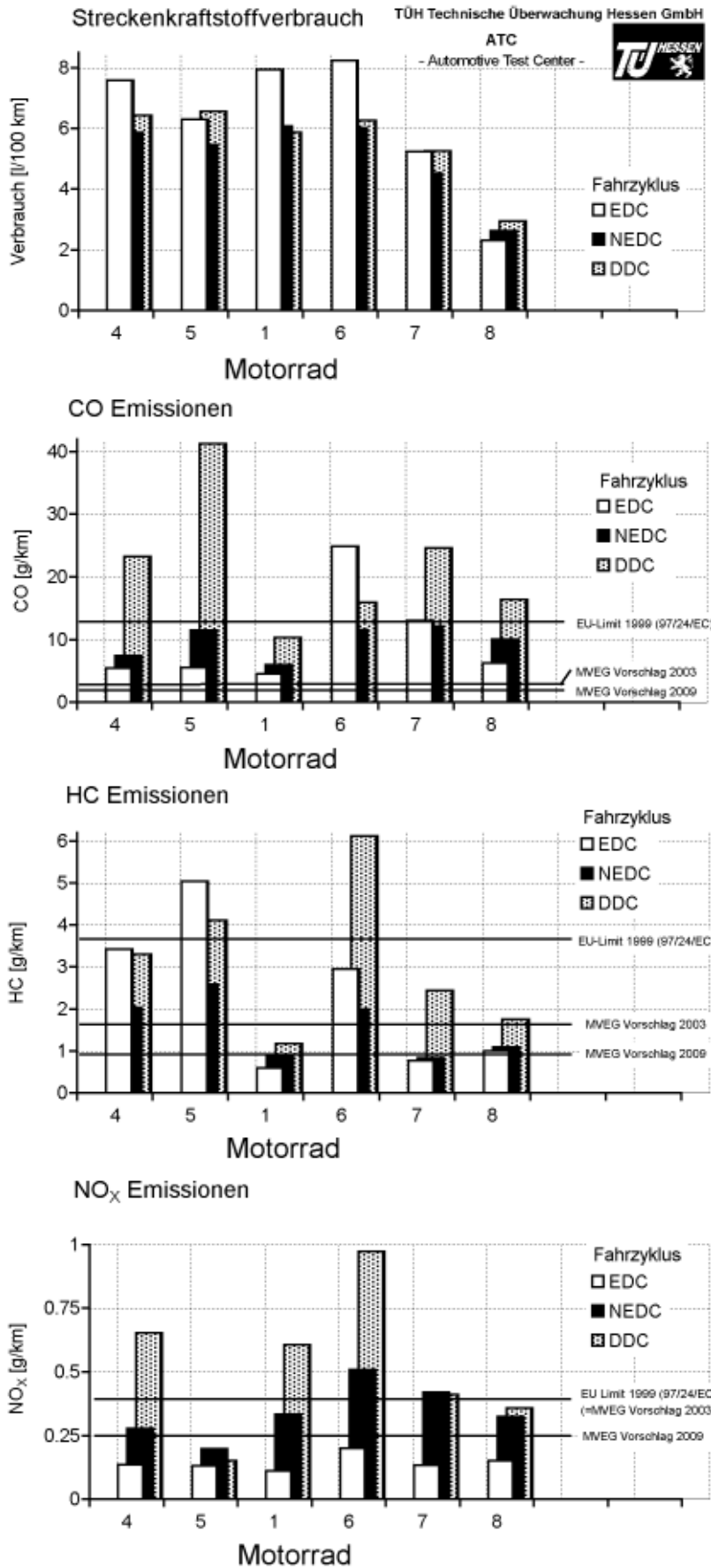
**Bild 5.4:** Durchführung der Abgasmessungen auf dem Rollenprüfstand

Mit weiterer Steigerung der Motorlast (DDC statt NEDC, für das leistungsschwache 125 cm<sup>3</sup>-Motorrad bereits beim Übergang vom EDC zum NEDC) steigt der Streckenverbrauch dann wegen des überproportionalen Anstiegs der Belastung für einige Fahrzeuge wieder an.

Hinsichtlich der Schadstoffemissionen wird deutlich, daß die untersuchten Neufahrzeuge die derzeit gültigen Grenzwerte mehr oder weniger leicht einhalten. Die gebrauchten Fahrzeuge 4, 5, und 6, die bereits nach alten Bestimmungen mit geringeren Anforderungen an das Emissionsverhalten homologiert wurden, liegen in jeweils einer Schadstoffkomponente oberhalb des aktuell gültigen Grenzwerts. Für Fahrzeug 6 stellt dabei die CO-Emission das Problem dar, während die Motorräder 4 und 5 zu hohe HC-Emissionen aufweisen. Dennoch zeigt sich an diesen Fahrzeugen, daß auch mit vergleichsweise alten Motorkonzepten und ohne aufwendige Maßnahmen zur Emissionsreduzierung Schadstoffausstöße im Bereich der heute gültigen Grenzwerte zu realisieren sind.

Die geplanten zukünftigen Anforderungen (Vorschlag der deutschen Vertreter innerhalb der MVEG) stellen deutliche Verschärfungen dar, die unter einer zusätzlichen Veränderung der Prüfbedingungen (verschärfter Zyklus) mit derzeitigen Motorauslegungen kaum noch zu erfüllen sein werden.

Um zu vermeiden, daß im Zuge einer Veränderung des Meßverfahrens Erhöhungen bereits verabschiedeter Grenzwerte erforderlich werden, was unter politischen Aspekten kaum durchführbar sein wird, sollte eine Anpassung der Prüfbedingungen möglichst frühzeitig erfolgen, bevor das Inkrafttreten weiterer Grenzwertstufen den vorhandenen Spielraum noch weitergehend einschränkt.



**Bild 5.5:** Ergebnisse der Abgasuntersuchungen unter Variation des Fahrzyklus, aktuelle und zukünftige Grenzwerte

Für die Definition sinnvoller Grenzwerte sowie weiterer Grenzwertstufen für die folgenden Zeiträume wären dann zunächst Erhebungen zum Ist-Stand aktueller Modelle durchzuführen, wobei aufgrund der vorliegenden Meßergebnisse Schadstoffgrenzen in der Größenordnung der heute gültigen Werte möglich erscheinen.

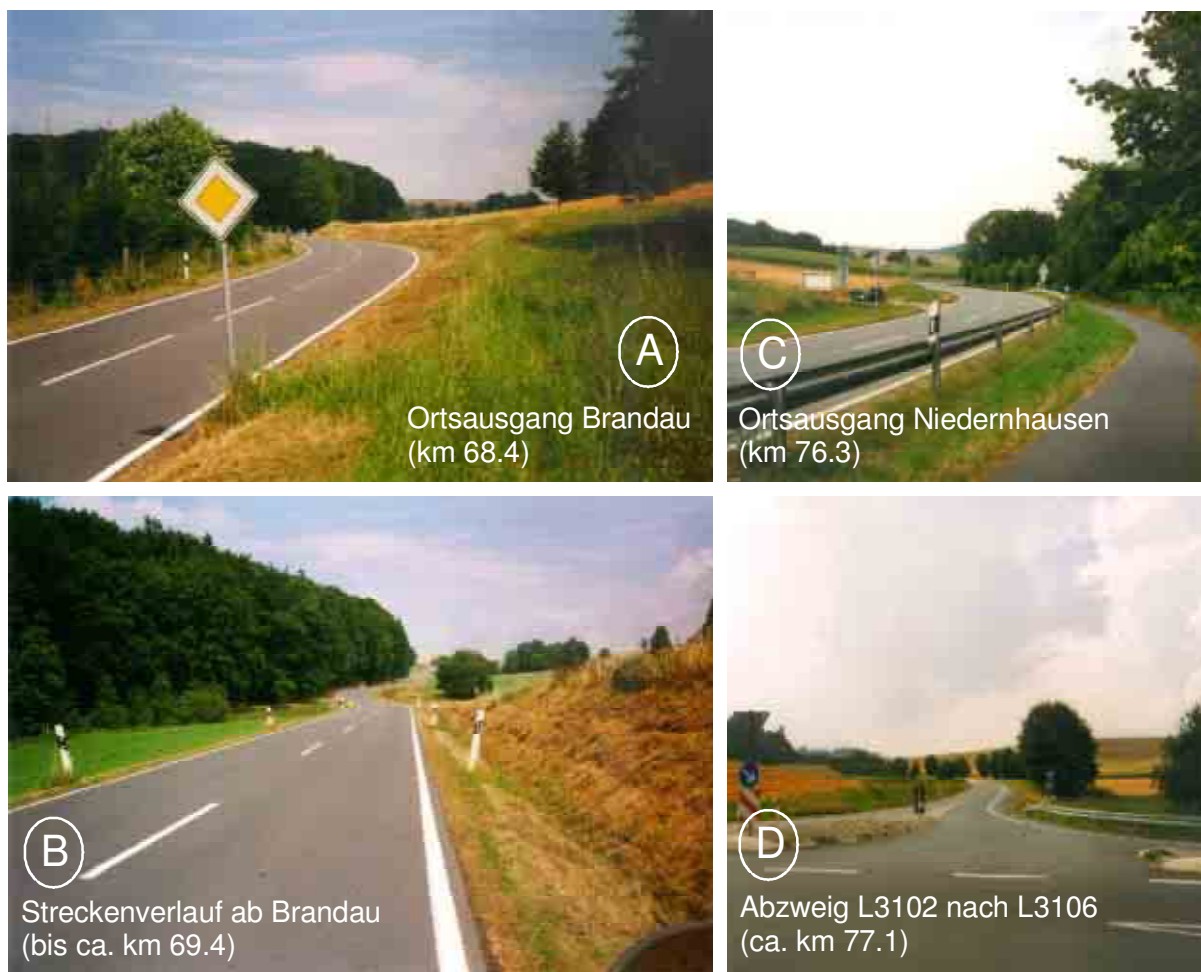
Langfristig würde dieses Vorgehen unter dem Aspekt der realen Umweltauswirkungen zu besseren Ergebnissen führen als weitergehende Grenzwertverschärfungen im heutigen Prüfablauf, die von den Herstellern technische Maßnahmen erfordern, deren Wirksamkeit für die tägliche Fahrpraxis in der Fahrzeughomologation nicht überprüft wird.

## 5.2 Fahrgeräuschmessung

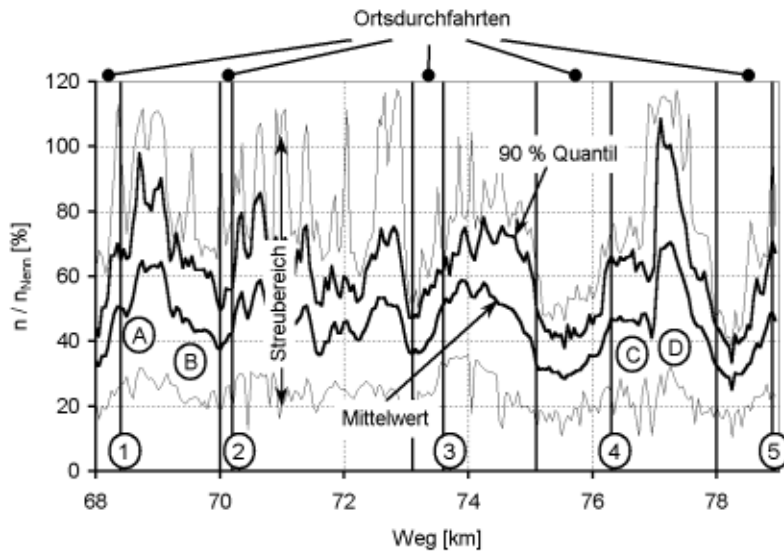
Grundsätzliche Anforderungen an einen Vorschlag für ein geändertes Meßverfahren zur Fahrgeräuschmessung waren die Beibehaltung des Meßaufbaus nach ISO R 362, die A-Bewertung des gemessenen Geräuschpegels sowie eine möglichst einfache, praxistaugliche Meßdurchführung, die keinen großen zusätzlichen Aufwand an Meßtechnik nach sich zieht. Einer Fahrmessung wurde aufgrund des deutlichen Lasteinflusses auf die Geräuschemissionen trotz des geringen Anteils des Rollgeräuschs gegenüber einer Messung im Stand der Vorrang eingeräumt. Hierbei spielten auch Überlegungen zur Praxisnähe und Anschaulichkeit des Vorschlags eine Rolle.

Zur besseren Berücksichtigung der praktischen Motorbetriebspunkte wurde das Fahrerverhalten an ausgewählten Orten der Versuchsstrecke, **Bild 5.6**, herangezogen, um hieraus den zu prüfenden Betriebszustand zu definieren.

Der gezeigte, ca. 11 km lange und fahrerisch reizvolle Abschnitt der Versuchsstrecke führt durch mehrere kleine Ortschaften. Aufgrund des Motorkonzepts sind die Absolutdrehzahlen bei den Fahrten mit Motorrad 2 im Vergleich der untersuchten Fahrzeuge am höchsten, obwohl die relative Nutzung des verfügbaren Drehzahlbandes am ge-



**Bild 5.6:** Für die Beurteilung des geräuschrelevanten Fahrerhaltens betrachtete Abschnitte der Versuchsstrecke



**Bild 5.7:** Relative Motordrehzahlen auf ausgewähltem Streckenabschnitt, Normalkollektiv (30 Fahrer), Motorrad 2

Nach **Bild 5.7** liegen häufig gefahrene Drehzahlen mit dem Sportmotorrad 2 zwischen 60 % und 80 % der Nennleistungsdrehzahl, die bei diesem Motorrad  $11.800 \text{ min}^{-1}$  beträgt.

Eine genauere Betrachtung des Fahrerhaltens im Bereich der Ortsausgänge auf dem untersuchten Streckenabschnitt liefert die relativen Motordrehzahlen in **Tabelle 5.1**. Hierbei wird jeweils der kurzzeitige Maximalwert der Motordrehzahl für jede Fahrt in einem Streckenbereich von 500 m um das Ortsende (Ortsausgang +/- 250 m) ausgewertet und über alle Versuchsfahrten gemittelt. Der Drehzahlmittelwert der Maximaldrehzahlen aller Fahrer liegt nach dieser Berechnung bei 60 % der Nenndrehzahl, das 90%-Quantil bei 87 %.

Für die weniger hochdrehenden Motoren der beiden anderen untersuchten Motorräder liegen die relativen Ausnutzungen des jeweils verfügbaren Drehzahlbands tendenziell höher. Für ein praxisnahe Geräuschmeßverfahren ist daher eine zu berücksichtigende Motordrehzahl von 80 % der Nenndrehzahl als Minimalanforderung zu betrachten, was

ringsten ausfällt, vgl. **Bild 4.12** auf Seite 56. Die Meßdaten von Motorrad 2 sind daher für die Definition einer Anforderung an den zu prüfenden Drehzahlbereich besonders geeignet.

Da für die Lärmempfindung auch vergleichsweise selten auftretende Spitzenwerte von Bedeutung sind, sollten sich statistische Aussagen weniger am Mittelwert, sondern besser an 90%-Quantilen der beobachteten Größen orientieren.

gegenüber dem aktuellen Verfahren je nach untersuchtem Fahrzeug immerhin eine Erhöhung um bis zu 30 Prozentpunkte bedeutet.

**Tabelle 5.1:** Mittelwerte und 90%-Quantile der Maximaldrehzahlen im Bereich von Ortsausgängen, Normalkollektiv (30 Fahrer), Motorrad 2

Ortsausgang (Streckenkilometer)	Mittelwert der relativen Maximaldrehzahl ( $n/n_{\text{Nenn}}$ ) in %	90% Quantil der relativen Maximaldrehzahl ( $n/n_{\text{Nenn}}$ ) in %
1	66	102
2	62	94
3	62	78
4	54	72
5	57	87
<b>Mittelwerte 1-5</b>	<b>60</b>	<b>87</b>

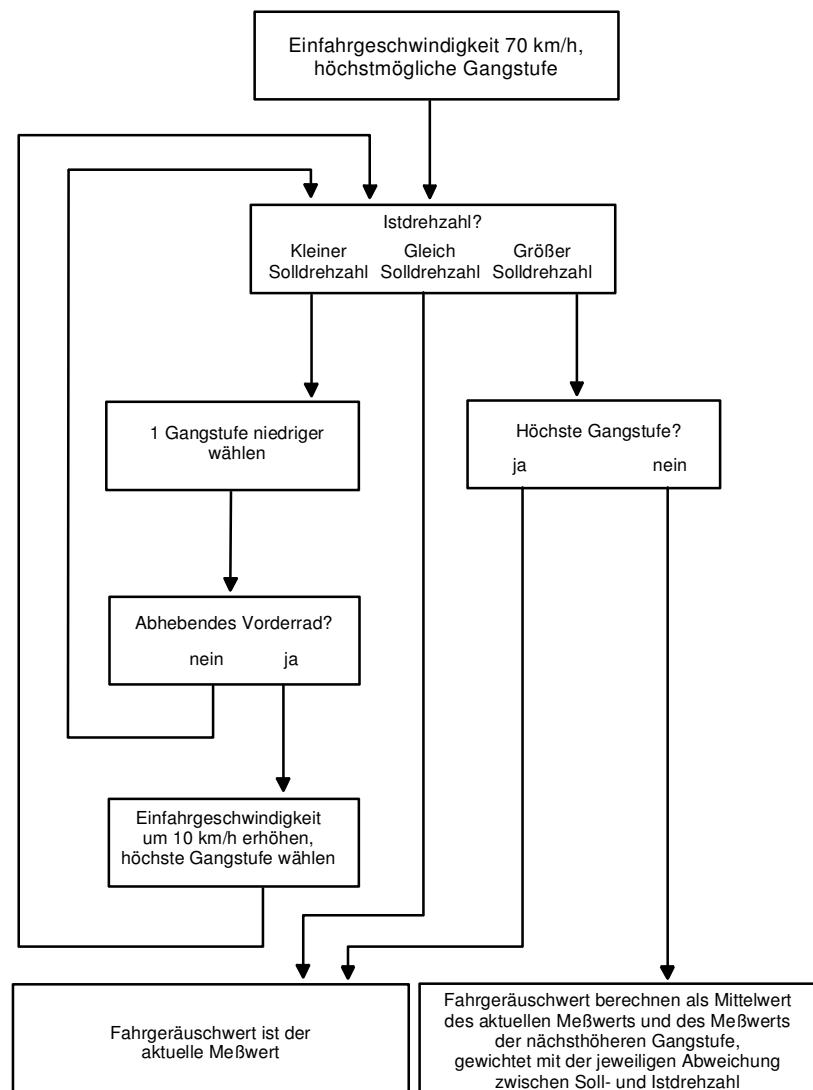
Im Vergleich zu den Ortsausgängen stellt sich auf dem Streckenabschnitt zwischen km 76,5 und 77,5 (Abzweigung von der L3102 auf die L3106) heraus, daß bei einer breiten

geraden Straßenführung durch in näherer Umgebung unbewohntes Gebiet das mittlere Drehzahlniveau der Fahrer stark ansteigt. Im Durchschnitt aller Fahrer werden dort Maximaldrehzahlen von 88 % der Nennleistungsdrehzahl gefahren, das 90%-Quantil liegt bei ca. 110 % dieser Drehzahl.

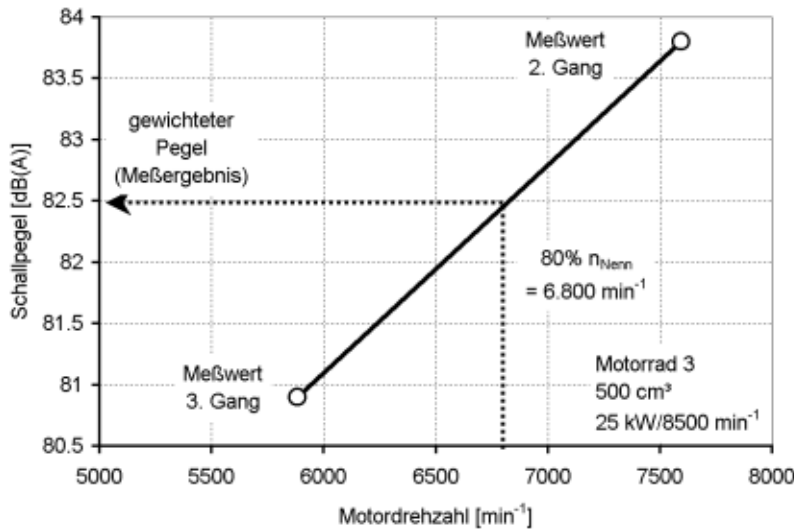
Extrem hohe Geräuschemissionen, wie sie beim Betrieb mit diesen sehr hohen Drehzahlen entstehen, sind allerdings nahezu immer begleitet von Überschreitungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten, wie auch schon in [83] festgestellt wurde. Zur Vermeidung dieser Fahrzustände erscheint daher eine Kontrolle der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten effektiver als eine Einbeziehung dieser seltenen Betriebszustände in die Typprüfung der Fahrzeuge.

Zusammenfassend wird als Drehzahlvorgabe während der Fahrgeräuschprüfung daher ein Zahlenwert von ca. 80 % der Nenndrehzahl als sinnvoll vorgeschlagen. Hierin berücksichtigt sind nicht die auftretenden Extremwerte, die zuweilen und in den meisten Fällen in Geschwindigkeitsbereichen oberhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auftreten. Vielmehr werden diese Drehzahlen an ausgewählten Orten im Bereich der zulässigen Fahrgeschwindigkeiten erreicht. Diese Drehzahl sollte daher die Grundlage eines geänderten Geräuschmeßverfahrens bilden und in der Mitte der Meßstrecke, d.h. im kürzesten Abstand zu den Mikrofonen, erreicht werden. Zu Sicherstellung der Reproduzierbarkeit des Lastzustands sollte die Meßstrecke wie im bisherigen Verfahren mit Vollast durchfahren werden.

Alternativ zu weiteren Schritten zur Absenkung des Geräuschgrenzwerts, die wie oben erläutert im realen Verkehrsgeschehen kaum als Verbesserung wahrgenommen würde, könnte eine stufenweise Erhöhung der zu fahrenden Drehzahl vorgesehen werden, wobei der Zielwert von 80 % Nenndrehzahl mit



**Bild 5.8:** Ablaufplan für eine Fahrgeräuschmessung mit Vorgabe der Soll-drehzahl



**Bild 5.9:** Bestimmung des Meßergebnisses der Fahrgeräuschemessung als gewichteter Mittelwert

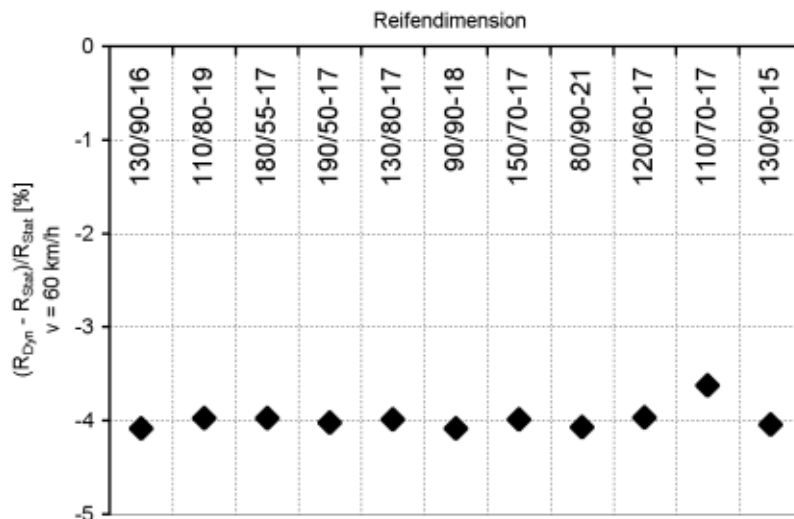
zwei Zwischenschritten angestrebt werden sollte.

Ein Vorschlag für einen gemäß den obigen Ausführungen veränderten Meßablauf kann **Bild 5.8** entnommen werden. Wie die unten dargestellten experimentellen Erprobungen belegen, werden bei einer Einfahrgeschwindigkeit von 70 km/h mit vielen heute üblichen Motorrädern die geforderten Drehzahlwerte erreicht.

Sofern bei besonders leistungsstarken Fahrzeugen

dieser Fahrzustand nicht stabil gefahren werden kann (abhebendes Vorderrad), ist die Einfahrgeschwindigkeit in die Meßstrecke zu erhöhen. Hieraus resultiert zwar eine grundsätzliche Benachteiligung sehr hoch motorisierter Zweiräder. Diese ist unter Abwägung des hohen Drehzahl- im Vergleich zum geringeren Geschwindigkeitseinfluß allerdings geringer als eine eventuelle Bevorzugung solcher Fahrzeuge, wenn diese bei konstanter Einfahrgeschwindigkeit und entsprechend geringeren Motordrehzahlen geprüft würden. Somit erscheint die aus dem gezeigten Vorschlag entstehende Benachteiligung akzeptabel, zumal bei fester Vorgabe der Drehzahl das Ergebnis der Geräuschemessung nicht durch praxisfremd lange Gangübersetzungen der relevanten Getriebegänge beeinflusst werden kann.

Der Betriebszustand kann mit hinreichender Genauigkeit aus einer Messung der Durchfahrzeit durch die Meßstrecke mittels zweier Lichtschranken bestimmt werden. Der Geschwindigkeitsverlauf wird dann unter der Annahme einer linearen Beschleunigung über der Meßstrecke berechnet. Unter Berücksichtigung der Übersetzungsstufen



**Bild 5.10:** Vergleich von statischem (aus der Reifendimension errechnetem) Reifenradius mit dem Abrollumfang bei 60 km/h für verschiedene Motorrad-Hinterreifen (Angaben aus [67])

sowie des wirksamen Reifenradius werden aus diesem Geschwindigkeitsverlauf die Motordrehzahlen während der Meßstreckendurchfahrt errechnet.

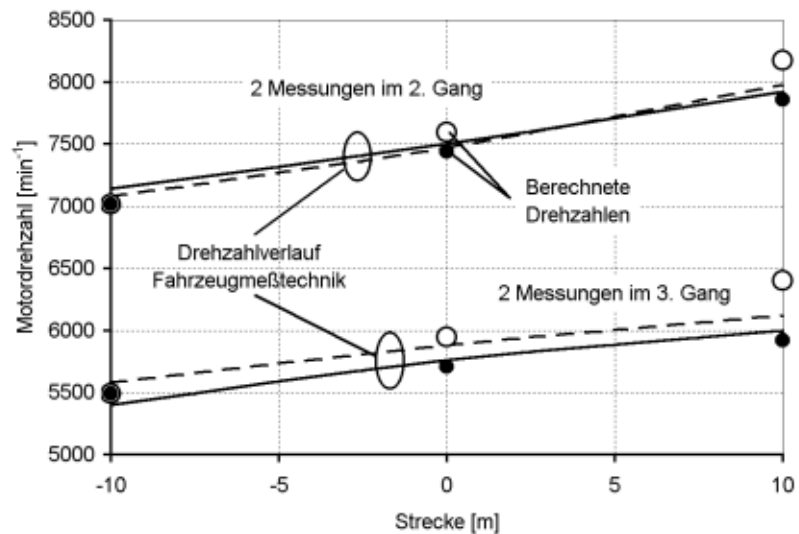
Wird die erforderliche Drehzahl in keinem der Getriebegänge erreicht, so wird das Meßergebnis, wie in [87] vorgeschlagen, als gewichteter Mittelwert der beiden benachbarten Gänge bestimmt, **Bild 5.9**.

Zur Ermittlung des wirksamen Reifenradius wird vom statischen, näherungsweise aus der Reifendimension abgeleiteten

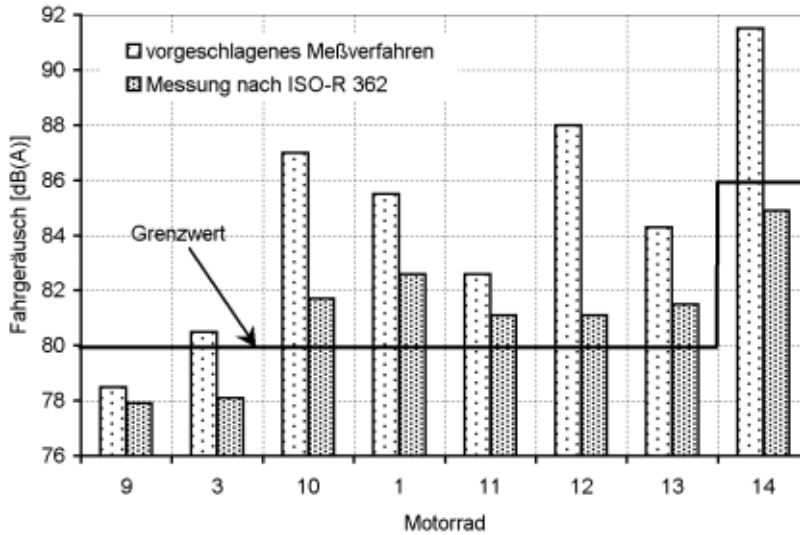
Umfang ausgegangen. Aufgrund verschiedener Effekte (Abplattung unter Radlast, fliehkraftabhängige Vergrößerung des Radius mit steigender Fahrgeschwindigkeit) wird dieser um den empirisch für verschiedene Reifentypen ermittelten Wert von 4 % reduziert, **Bild 5.10**. Der so errechnete Wert gilt in exakter Form allerdings nur für die zugrunde liegende Radlast-/Reifeninnendruckkombination sowie für den freierollenden Fahrzeugzustand ohne nennenswerten Schlupf. Wie Experimente zeigten, bei denen die rechnerisch ermittelte mit der mittels Fahrzeugmeßtechnik gemessenen Motordrehzahl verglichen wurde, konnte mit diesen Annahmen an einem mittleren Motorrad die tatsächliche Motordrehzahl auf Höhe der Mikrofonlinie mit einer maximalen Abweichung von  $\pm 3\%$  bestimmt werden, **Bild 5.11**.

Grenzen dieses Rechenverfahrens werden allerdings bei hohem Antriebsschlupf erreicht. In diesem Fall ist die berechnete Drehzahl um den Schlupf geringer als der tatsächliche Wert. Dies kann zum einen bei sehr leistungsstarken Motorrädern mit normaler Straßenbereifung auftreten, deren Schlupfwerte beim Betrieb in der Nähe des Kraftschlußmaximums bis ca. 10 % betragen können. Zum anderen liegt der Reifenschlupf bei Fahrzeugen mit Geländebereifung aufgrund der nachgiebigen Profilgestaltung deutlich höher und erreicht sein Maximum erst zwischen ca. 15 und 20 % Längsschlupf [76].

Alternativ zur geschilderten näherungsweise Drehzahlbestimmung aus der Durchfahrtszeit könnte ein Geräuschmeßsystem ähnlich dem oben bereits erwähnten Amsterdamer Schallpegelmessers eine zuverlässige Ermittlung der Motordrehzahl ermöglichen. Dazu müßte neben den auftretenden Pegeln auch die Frequenzzusammensetzung des Geräuschs erfaßt und unter Berücksichtigung der Motorbauform des zu prüfenden Motorrads ausgewertet werden, was automatisiert erfolgen könnte. Wie z.B. in **Bild 4.33** auf Seite 86 dargestellt, sind je nach Motorbauform unterschiedliche ganzzahlige Ordnungen der Motordrehzahl im abgestrahlten Geräusch zu identifizieren, so



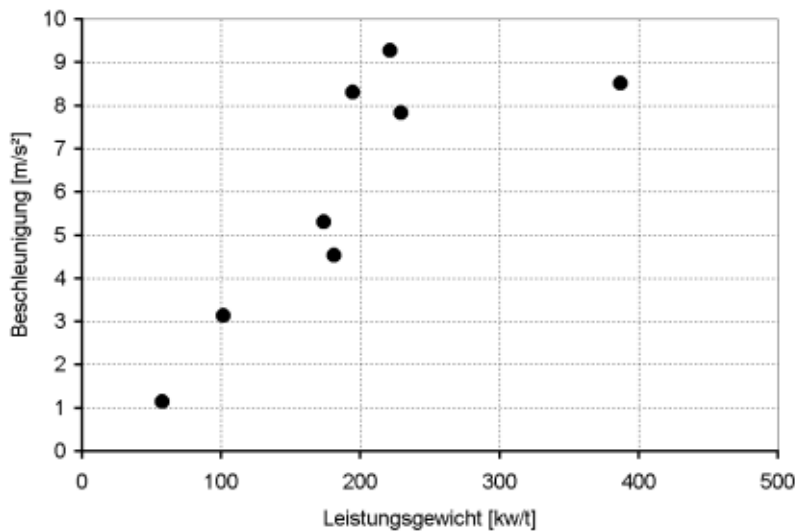
**Bild 5.11:** Messung des Drehzahlverlaufs während der Meßstreckendurchfahrt, Vergleich zum rechnerisch ermittelten Verlauf, Motorrad 3



**Bild 5.12:** Einfluß des veränderten Meßverfahrens auf die Geräuschemissionen, Vergleich zur ISO R 362-Messung

nach Tabelle A.1, Seite 107 ist in **Bild 5.12** zu sehen. Besonders hochdrehende Fahrzeuge sowie Fahrzeuge ohne Verkleidung geräuschrelevanter Bauteile werden vergleichsweise stark zu Verbesserungen gezwungen, da hier der Einfluß der Veränderung des Meßverfahrens besonders zum Tragen kommt.

Wie aus **Bild 5.13** hervorgeht, liegen die mittleren Beschleunigungen der untersuchten



**Bild 5.13:** Mittlere Beschleunigungen der Motorräder während der Meßstreckendurchfahrt bei Geräuschprüfung mit ca. 80 % der Nenndrehzahl

daß umgekehrt aus diesen Frequenzen auch die jeweilige Motordrehzahl bestimmt werden kann. Bei Verwendung eines solchen Meßsystems könnte die Messung der Durchfahrtszeit durch die Meßstrecke entfallen, so daß sich der Meß- und Auswerteaufwand des geänderten Meßablaufs im Vergleich zum heutigen Meßverfahren nicht erhöhen würde.

Der Einfluß des geänderten Meßverfahrens für die untersuchten Motorräder

deutlich oberhalb der für Pkw als Beschleunigungsgrenzwert empfohlenen Größen, vgl. **Bild 3.6** auf Seite 35. Ab einer Leistung von ca. 200 kW/t hängt die Beschleunigung darüber hinaus nicht mehr vom Leistungsgewicht ab, sondern wird vom Reifenkraftschluß bzw. der Fahrzeuggeometrie (abhebendes Vorderrad) begrenzt. Die Definition einer maximalen Sollbeschleunigung für Motorräder erscheint daher nicht erstrebenswert, sondern sollte durch die beschriebene Vorgabe eines zu erreichenden Drehzahlwerts ersetzt werden.

Die Definition einer maximalen Sollbeschleunigung für Motorräder erscheint daher nicht erstrebenswert, sondern sollte durch die beschriebene Vorgabe eines zu erreichenden Drehzahlwerts ersetzt werden.

### 5.3 Fazit aus Kapitel 5

Aufgrund des gezeigten Einflusses der Dynamik des Fahrzeugbetriebs auf die Abgasemissionen erscheint die Definition eines auf den Betrieb von Motorrädern angepaßten Fahrzyklus von hoher Bedeutung, um die Praxiswirksamkeit von Systemen zur Abgasnachbehandlung sicherzustellen.

Derzeit bestehende Zyklen verlangen den Motorrädern zu geringe streckenspezifische Antriebsarbeiten ab und sind daher zur Fahrzeugabstimmung weitgehend ungeeignet. Auf der Grundlage der in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen im realen Straßenverkehr wurde daher ein Fahrzyklus vorgeschlagen, der die typische Dynamik des Motorradbetriebs abbildet.

Wie die durchgeführten Schadstoffmessungen auf dem Abgasprüfstand zeigen, steigen aufgrund höherer Motorlasten und damit Motortemperaturen vor allem die NO<sub>x</sub>-Emissionen an, so daß die meisten Fahrzeuge in diesem geänderten Zyklus die heute bereits geltenden Grenzwerte überschreiten. Vor weiteren Grenzwertverschärfungen sollte daher eine Veränderung der Meßprozedur angestrebt werden, um den Handlungsspielraum hierzu nicht durch die Emissionsanforderungen vorab einzuschränken.

Aufgrund der absolut gesehen geringen Emissionen des Motorradverkehrs und der daher unter gesamtwirtschaftlichen Kosten betrachtet relativ geringen Effizienz von eingesetzten Entwicklungskapazitäten erscheinen etwas geringere Anforderungen an das Abgasemissionsverhalten von Motorrädern im Vergleich zu Pkw auch langfristig akzeptabel. Die Grenzwertvorgaben für Motorräder sollten sich daher sinnvollerweise nicht an den jeweiligen Zahlenwerten der Pkw-Gesetzgebung orientieren, zumal sich bei gleichzeitiger Anwendung eines schärferen Fahrzyklus härtere Anforderungen für die Motorräder ergeben würden. Vielmehr sollten auf der Basis eines geeigneten Fahrzyklus Untersuchungen zum aktuellen Stand der Motorrademissionen durchgeführt und aus diesen sinnvolle Grenzwerte abgeleitet werden. Diese sollten dann wie üblich einer zeitlichen verschärfenden Fortschreibung unterliegen.

Die Untersuchung des Fahrerhaltens und der häufig verwendeten Maximaldrehzahlen an ausgewählten Orten der Versuchsstrecken verdeutlicht die Notwendigkeit einer realitätsnäheren Gestaltung der Fahrgeräuschprüfung für Motorräder. Um die heute bestehende Bevorzugung hochdrehender und in den für die Geräuschmessung relevanten Getriebegängen lang übersetzter Motorräder zuverlässig auszuschließen, sollte sich eine geänderte Prozedur dabei an einer Vorgabe der zu prüfenden Motordrehzahl in Relation zur jeweiligen Nenndrehzahl orientieren.

Ein konkreter Vorschlag für einen geänderten Meßablauf der Fahrgeräuschmessung wurde weiter oben entwickelt und hinsichtlich seiner praktischen Durchführbarkeit erprobt. Die durch die vorgeschlagene Verfahrensänderung hervorgerufenen Geräusch erhöhungen, die je nach Fahrzeuggestaltung bei heutigen serienmäßigen Motorrädern bis zu ca. 6 dB(A) betragen können, legen eine schrittweise Einführung eines geänderten Meßverfahrens nahe, bei der die zu prüfende Motordrehzahl als Anteil an der jeweiligen Nenndrehzahl in mehreren Stufen bis auf den empfohlenen Wert von 80 % zu erhöhen wäre.

## 6 Ausblick: Verringerung der Umweltbelastung durch motorisierte Zweiräder

### 6.1 Technische Maßnahmen am Fahrzeugtyp „Leistungsstarkes Motorrad“

Unbestreitbar besitzt das heute etablierte Motorrad mit hohen Fahrleistungen, gutem Fahrkomfort und daraus resultierend hohem Fahrspaß und Freizeitwert seine Daseinsberechtigung. Dennoch sollten mit Hilfe technischer Maßnahmen im Rahmen eines vertretbaren Verhältnisses von Aufwand und Nutzen Verringerungen der Umweltbelastungen angestrebt werden.

Verbesserungen lassen sich bereits durch eine realitätsbezogene Abstimmung von Motor und Getriebe erzielen, indem entweder die motorischen Bestpunkte hinsichtlich Verbrauch und Abgas in Bereiche verschoben werden, die im realen Verkehr besonders häufig verwendet werden, oder indem durch geeignete Getriebeabstufungen und Schaltstrategien die realen Fahrzustände in den jeweils besten Motorbetriebspunkt verschoben werden. Für letztere Strategie bietet sich der Einsatz automatisiert schaltender Getriebe an, was im Motorrad allerdings hinsichtlich der Kundenakzeptanz von Automatgetrieben auf Schwierigkeiten stoßen dürfte. Eine akzeptable Lösung könnte, wie für einige Pkw zwischenzeitlich verfügbar, ein automatisiertes Getriebe mit manueller Eingriffsfunktion sein, so daß auf fahrdynamisch interessanten Streckenabschnitten der Fahrer unter Verzicht auf verbrauchs- und abgasoptimale Schaltpunkte selbst die Gangwechsel auslöst. Im (zeitlich vermutlich überwiegenden) Fahrtanteil auf weniger interessanten Tourabschnitten kämen dann durch automatisierte Gangwechsel die Vorteile dieser Schaltstrategie zum Zug.

Gerade für hochmotorisierte Zweiräder mit häufigem Teillastbetrieb erscheinen Motorabstimmungen in Richtung Magermotor unter Verbrauchsaspekten wünschenswert. Durch die überstöchiometrische Gemischzusammensetzung sind bei Werten von  $\lambda$  ca. 1,4, z.B. durch den Einsatz einer Benzindirekteinspritzung, Verbrauchsabsenkungen um ca. 10 % erreichbar [36]. Im Hinblick auf die Rohemissionen des Motors (HC und  $\text{NO}_x$ ) verursacht diese Abstimmung allerdings einen Zielkonflikt zwischen Verbrauch und Abgas. Daher erfordert dieses Konzept eine Abgasnachbehandlung mit Wirkungsgraden ähnlich dem geregelten Dreiwege-Katalysator. Die hierfür erforderliche Technologie befindet sich auch für Pkw derzeit noch in Entwicklung und erfordert zudem Veränderungen des Kraftstoffs durch Reduzierung des Schwefelgehalts, da dieser noch zu Schwefelvergiftungen des Katalysators führt.

Aufgrund der Teillastproblematik erscheint eine Änderung des Verbrennungsverfahrens hin zum Dieselprinzip wirkungsvoll. Ein Diesel-Motorrad könnte als Erprobungsträger mit heute verfügbaren Motorrad- (vorzugsweise großer Sporttourer/Tourer) und modernen Pkw-Komponenten, z.B. 3-Zylinder TDI oder SDI-Motor, leicht dargestellt werden und würde im Marktsegment für Tourenfahrer vermutlich auf Interesse stoßen, zumal beim Betrieb in industriell weniger entwickelten Ländern die Anforderungen an den Kraftstoff sinken würden. Technische Probleme hinsichtlich des Schwingungsverhaltens und der Akustik sollten mit Hilfe teilentkoppelter Motorlagerungen lösbar sein, wie sie in Motorrädern teilweise bereits heute eingesetzt werden.

Häufig können Verbrauchsabsenkungen durch Liefergraderhöhungen, d.h. Erhöhungen des Verhältnisses der tatsächlich vom Motor angesaugten Luftmasse zur theoretisch bei konstanter Temperatur und Dichte angesaugten Luftmasse, mit Hilfe von Aufladungen erzielt werden. Motorräder mit Abgasturboladern waren in der Vergangenheit bereits serienmäßig erhältlich und können derzeit über Nachrüstanbieter realisiert werden. Das Ziel dieser Aufladung bestand und besteht allerdings ausschließlich in einer Steigerung der Spitzenleistung, wobei die typischen Probleme des verzögerten Ansprechverhaltens aufgrund der Fahrdynamik des Motorrads besonders zum Tragen kommen. Für moderne Systeme mit geringen Ladedrücken und regelbarem Ansprechverhalten könnten hingegen auch im Bereich der Zweiradmotoren Potentiale bestehen, zumal sich Abgasturbolader aufgrund der Dämpfungswirkung im Abgasstrang günstig auf das Geräuschverhalten auswirken. Bei geringem Hubvolumen steht allerdings nur ein geringer Massenstrom zum Antreiben eines Turboladers zur Verfügung, wobei kleinere Turbinen zusätzlich prinzipiell schlechtere Wirkungsgrade aufweisen. Daher wurden an kleinen Pkw mit Ottomotoren technische Motorkonzepte mit Druckwellenladern erprobt. Diese weisen sowohl bezüglich des Ansprechverhaltens als auch hinsichtlich ihrer Auslegung für kleine Massenströme ein günstiges Verhalten auf [42, 104].

Die Auswahl und der Einsatz des geeigneten Abgasnachbehandlungssystems sind stark von den zu erfüllenden gesetzlichen Anforderungen abhängig. Solange das Abgasverhalten von Motorrädern in Meßzyklen mit geringsten Motorlasten bestimmt wird und die Abstimmung der Motoren im überwiegend fetten Gemischbereich beibehalten wird, erscheinen die Schadstoffkomponenten HC und CO als diejenigen Größen, die mit Hilfe von nachgeschalteten Abgasreinigungssystemen verringert werden müssen. Hierzu erweist sich, wie von Herstellerseite vielfach betont (vergleichbar zur vormaligen Diskussion um die Katalysator-Einführung an kleinen Pkw), ein unregelmäßiger Oxidationskatalysator als ausreichendes Mittel, sofern dessen Standfestigkeit gewährleistet ist, d.h. es nicht zu einer thermischen Schädigung aufgrund zu hoher Verbrennungstemperaturen kommt.

Erwartungsgemäß und anhand der Messungen in einem schärferen Fahrzyklus nachgewiesen, steigen die  $\text{NO}_x$ -Ausstöße mit zunehmender Motorlast, d.h. steigender Motortemperatur, deutlich an, so daß die Vernachlässigung dieser Schadstoffkomponente im Hinblick auf den realen Betrieb nicht unbedingt gerechtfertigt erscheint. Aus diesem Grund ist auch für Motorräder aus heutiger Sicht die Verwendung eines 3-Wege-Katalysators mit Gemischregelung anzustreben. Um eine realitätsangepaßte Abstimmung dieses Systems und damit den für die Umwelt besten Nutzen sicherzustellen, sind dafür aus Sicht der Gesetzgebung dringende Veränderungen des bestehenden Prüfablaufs erforderlich.

Um unter ungünstigen Bedingungen (Kaltstart, Fahren mit geringen Lasten) eine hohe Wirksamkeit des Katalysators zu gewährleisten, wird bei Pkw ein Verschleppen von Verbrennungen ins Auspuffsystem, d.h. Nicht-zünden von einzelnen Zylinderfüllungen und Verbrennen des Kraftstoffs im Abgassystem zur Katalysatorerwärmung vorgenommen. Die übrigen Zylinder arbeiten in diesem Betrieb mit höherer Last und daher besserem Wirkungsgrad [97].

Unter Kosten-/Nutzen-Abschätzungen erscheint eine im Vergleich zum Pkw mit etwas geringerer Wirksamkeit ausgestattete Abgasnachbehandlung bei Motorrädern akzeptable

bel, wobei besonders die Abstimmung auf den Kaltstart des Motors weniger dringend geboten ist. Darüber hinaus sollte die an Motorrädern eingesetzte Technik möglichst einfach und überschaubar gehalten werden, da das Motorrad als Hobby vielfach auch für Freizeitbastler einen hohen Stellenwert besitzt, woraus sich lange Lebensdauern und überwiegend hohe Recycling-Quoten ergeben.

Der Kraftstoffverbrauch eines leistungsstarken Zweirads sollte, unter Betrachtung der aktuellen Situation und Entwicklung bei anderen Fahrzeugkategorien, langfristig auf maximal 3 bis 4 l/100 km verringert werden, was sinnvollerweise durch eine Selbstverpflichtung der Hersteller, evtl. formuliert als Anforderung an den Flottenverbrauch, sichergestellt werden sollte. Als erste Stufe würde eine Reduzierung um 10 - 30 % besonders bei leistungsstarken Motorrädern den mittleren Wirkungsgrad verbessern und in den Bereich heute verbreiteter Pkw verlagern.

Zylinderabschaltungen, wie sie bei Pkw der Luxusklasse mit vielzylindrigen Motoren mit dem Ziel der Kraftstoffersparnis eingesetzt werden, sind bei heutigen Motorradmotoren mit 1 bis 4 Zylindern vermutlich kaum zu realisieren. Zu berücksichtigen ist hierbei auch der große Einfluß des gewählten Motorkonzepts auf Design und Charakter des Motorrads, der einen großen Teil der Attraktivität einzelner Modelle ausmacht.

Motorabschaltungen im Stillstand wirken sich, wie Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen anhand eines Pkw mit geregelter Katalysator belegen, auf den Verbrauch und die NO<sub>x</sub>-Emissionen bereits ab 10 Sekunden Standzeit positiv aus [19]. CO und HC-Verbesserungen ergeben sich hingegen erst ab ca. 5 Minuten. Aufgrund des vergleichsweise geringen Standanteils bei typischen Motorradfahrten und der hohen Bedeutung gerade der letztgenannten Komponenten würde diese Maßnahme bei Motorrädern daher kaum zu nennenswerten Verbesserungen führen.

Weitere Konzepte [24], wie sie für Pkw derzeit in Entwicklung sind, z.B. vollvariabler Ventiltrieb, der Einsatz alternativer Kraftstoffe (Erdgas, Wasserstoff, ...) oder alternativer Energiequellen (Brennstoffzelle) stehen bei einer Anwendung für Motorräder stärker als beim Pkw vor Problemen einer akzeptablen Gestaltung hinsichtlich des Gewichts und des Bauraums. Nicht zuletzt entsteht angesichts der erheblich geringeren Stückzahlen und Marktvolumina für solche Entwicklungen ein kaum zu bewältigender Kostendruck. Daher sollten in diesen Bereichen die Pkw-Entwicklung beobachtet und zu gegebener Zeit übernommen werden, eigene Entwicklungen der Motorradhersteller erscheinen hier derzeit wenig zielführend.

## **6.2 Neuartiger Fahrzeugtyp Gebrauchsmotorrad**

Abgesehen von den in dieser Arbeit überwiegend diskutierten Problemfeldern Abgas, Lärm und Kraftstoffverbrauch existiert, wie eingangs bereits erwähnt, eine Vielzahl von Gründen, die das motorisierte Zweirad unter Umweltaspekten als zukunftsweisende Alternative des Individualverkehrs erscheinen lassen. Genannt seien an dieser Stelle nur der Ressourcenbedarf für Produktion und Betrieb, der Flächenbedarf im ruhenden und langsam fließenden Verkehr sowie, aus der Sicht des Fahrzeughalters, die Anschaffungs- und Unterhaltskosten.

Erste Ideen zur Gestaltung eines zukünftigen Motorradtyps mit hohem Gebrauchswert und ohne die heute übliche Konzentration auf sportlichen Freizeitwert wurden in [102] dargestellt. Danach gehörten neben hohen Anforderungen an die Sicherheit auch die Umweltaspekte hinsichtlich Ressourcenverbrauch sowie Schadstoffausstoß und Kraftstoffverbrauch zu den Kriterien des Lastenheftes. Der damals als akzeptabel vorgeschlagene Verbrauch von maximal 4 l/100 km wird mit heutiger Technologie bereits mit kleinen Pkw erreicht und müßte daher aus aktueller Sicht für ein solches Fahrzeugkonzept in etwa halbiert werden.

Eine bereits erhältliche Variante eines Gebrauchsmotorrads ist der BMW C1 [31], der als fortschrittliche Integration der Aspekte Sicherheit, Umweltverhalten und Platzbedarf gelten kann. Laut Werksangaben sollen mit diesem Fahrzeug Verbrauchswerte in der Größenordnung von 3 l/100 km erreicht werden. Fahrzeuge dieser Kategorie stellen allerdings keine Alternative zum heutigen Motorrad und dessen Nutzung dar, sondern dienen eher als Fortbewegungsmittel in Innenstädten, d.h. als zusätzliches Fahrzeug mit speziellem Einsatzbereich.

Da für die Fahrten mit solchen Fahrzeugen im besonderen Problembereich der Ballungszentren ein hoher Anteil der Substitution anderer Verkehrsmittel unterstellt werden kann, könnte deren Attraktivität durch flankierende verkehrspolitische Maßnahmen weiter erhöht werden, wobei sich Möglichkeiten bieten durch:

- Die Freigabe der Nutzung von Busspuren,
- die Erlaubnis zum Vorbeifahren an stehenden Kolonnen,
- die Einrichtung von vorverlegten Haltelinien vor Lichtzeichenanlagen,
- die Reservierung von Parkflächen.

### **6.3 Definition eines umweltverträglichen Motorrads**

Ähnlich zum Umweltengel für Mofas könnte auch für Motorräder eine Beschreibung eines umweltverträglicheren Fahrzeugs geschaffen werden, so daß unabhängig von langwierigen Maßnahmen des Gesetzgebers ein Marktvorteil solcher Modelle zumindest bei entsprechend eingestellten Käufern entstehen würde. Dabei sollten Anforderungen an das Abgasverhalten, den Kraftstoffverbrauch, die Geräuschemissionen sowie die Manipulationssicherheit gestellt werden.

Die Quantifizierung von akzeptablen Grenzwerten hängt dabei, wie die vorangehenden Kapitel dieser Arbeit gezeigt haben, stark vom eingesetzten Prüfablauf ab. Solange keine Erhöhung der Realitätsnähe des Verfahrens in Kraft gesetzt wird, kann allein das Einhalten der aktuell gültigen Abgasgrenzen allerdings nicht als ausreichend angesehen werden.

Der Kraftstoffverbrauch eines solchermaßen als umweltverträglich bezeichneten Motorrads darf angesichts der jeweiligen Fahrwiderstände keinesfalls oberhalb der Werte der aktuell verbrauchsgünstigsten Pkw liegen, so daß die Obergrenze von 3 l/100 km auch bei der Verwendung von Otto-Kraftstoff nicht überschritten werden darf.

Aufgrund des gravierenden Fahrereinflusses auf die Geräuschemissionen fällt die Definition einer Anforderung für eine Anerkennung als umweltfreundliches Motorrad beson-

ders schwer. Aus heutiger Sicht scheint überwiegend eine Reduzierung der Nenn- und Maximaldrehzahlen auch unter Betrachtung der möglichen worst-case Fahrzustände erforderlich, wobei auch eine wirkungsvolle Manipulationsverhinderung anzustreben ist.

Da die aktuelle Prüfprozedur bezogen auf das verfügbare Drehzahlband nur einen kleinen Teilbereich der möglichen Betriebszustände abdeckt, ist die alleinige Forderung nach einer Pegelreduzierung im etablierten Meßverfahren nicht ausreichend. Als Möglichkeiten bieten sich daher zum einen Veränderungen des Prüfablaufs an mit dem Ziel, ähnlich wie bei Nutzfahrzeugen den lautesten Fahrzustand zu prüfen und zu beschränken. Alternativ dazu könnte für geräuscharme Motorräder ein Meßverfahren, wie es im Rahmen dieser Arbeit zur Ermittlung der Geräuschkennfelder verwendet wurde, benutzt werden, um die möglichen Geräuschemissionen zu bestimmen. Für eine Anerkennung als lärmarm sollte dann die Einhaltung eines vorgegebenen Wertes, z.B. 78 dB(A), in weiten Kennfeldbereichen gefordert werden, z.B. in 90 % aller möglichen Betriebszustände.

Die Attraktivität für ein solches Konzept könnte vom Gesetzgeber dadurch erhöht werden, daß für besonders umweltverträgliche Motorräder Erleichterungen wie Steuerbegünstigungen oder –zuschüsse sowie eventuell Ausnahmen von bestehenden Verkehrsverboten und Streckensperrungen erteilt werden.

## Anhang

### Technische Daten der Versuchsfahrzeuge

Tabelle A.1: Versuchsfahrzeuge

Fahrzeug	Hersteller Typ	Fahrversuche im öffentlichen Straßenverkehr	Abgasmessungen Rollenprüfstand	Bestimmung der Geräuschkennfelder	Eprobung neues Geräuschemessverfahren	Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	Masse versuchsfertig, ohne Fahrer [kg]	max. Leistung [kW] bei Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]	max. Drehmoment [Nm] bei Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]	Rollwiderstandsindex $f_{roll}$	Luftwiderstand $c_w \times A$	Modelljahr	km-Stand bei Versuchsbeginn
Motorrad 1	BMW R 1100 GS	X	X	X	X	1100	249	57 / 6500	97 / 5250	0,015	0,56	1997	1000 (12200 bei Abgasmessungen)
Motorrad 2	Suzuki GSX-R 600	X		X		600	204	72 / 11800	63 / 9500	0,020	0,46	1998	1100
Motorrad 3	Honda CB 500	X			X	500	195	25 / 8500 (unge-drosselt 43 / 9500)	38 / 4500 (unge-drosselt 47 / 8000)	0,018	0,59	1993	3000
Motorrad 4	Kawasaki ZZR 1100		X			1100	269	74 / 9500				1995	14300
Motorrad 5	Kawasaki ZX-6R		X			600	206	74 / 12500				1996	18600
Motorrad 6	Kawasaki VN 15 Classic		X			1500	310	47 / 4700				1996	12100
Motorrad 7	Honda Shadow 600		X			600	212	28 / 6500				1999	200
Motorrad 8	Honda CG 125		X			125	116	8 / 8500				1999	1300
Motorrad 9	Honda CB 250				X	250	130	12 / 8000				1996	3600
Motorrad 10	Honda VFR 750 F				X	750	249	74 / 10000				1990	58000
Motorrad 11	Honda ST 1100				X	1100	305	72 / 7500				1992	24600
Motorrad 12	BMW R 1100 S				X	1100	246	72 / 7500				1999	14000
Motorrad 13	BMW K 1200 RS				X	1200	285	72 / 7000				1997	6000
Motorrad 14	Suzuki GSX-R 1100				X	1100	279	103 / 10000				1987	46000
Pkw 1	Opel Astra 1.6i	X				1600	1110	55 / 5200	125 / 2800			1991	37000
Pkw 2	Mitsubishi Carisma GDI	X				1800	1260	92 / 5500	174 / 3750			1997	7000

## Fragebogen und Antworten zum Fahrerverhalten von Motorradfahrern

### Wie fahren Sie Motorrad?

Umfragezeitraum Sommer 1998,  
Mittelwerte der Antworten

#### 1 Zur Person

n=273

Alter		Ø 32,5 Jahre
männlich		90 %
weiblich		10 %
Führerschein:	Klasse 1b	19 %
	Klasse 1a	41 %
	Klasse 1	89 %
	Klasse 3	86 %

Lesen Sie regelmäßig Fachzeitschriften zum Thema		
Motorrad?	ja	67 %
	nein	33 %

Besuchen Sie regelmäßig Veranstaltungen zum Thema		
Motorrad?	Ausstellungen/Messen	47 %
	Rennen	10 %

Sind Sie Mitglied in einem Motorrad oder Automobil-Club?		
	Automobil-Club	51 %
	Motorrad-Club	24 %

#### 2 Zum Motorrad

n=270

Hersteller		16 Marken
Seitenwagen-Gespann		1 %
Zylinderanzahl	1-Zyl.	19 %
	2-Zyl.	43 %
	3-Zyl.	3 %
	4-Zyl.	35 %

Hubraum	Ø ccm	762
---------	-------	-----

Max. Leistung	Ø PS	68
---------------	------	----

Höchstdrehzahl	Ø min <sup>-1</sup>	8605
----------------	---------------------	------

Leergewicht	Ø kg	218
-------------	------	-----

Baujahr	Ø	1990
---------	---	------

aktueller km-Stand	Ø ca. km	40.000
--------------------	----------	--------

Technische Angaben zum Motor (bitte zutreffendes ankreuzen)	4-Takt	96 %
	2-Takt	4 %
	serienmäßig	72 %
	gedrosselt	16 %
	entdrosselt	21 %
	leistungsgesteigert	4 %
	Benzineinspritzung	14 %
	geregelter Katalysator	7 %
ungeregelter Katalysator	4 %	

Wie führen Sie Wartungsarbeiten durch?		
	selbst	67 %
	mit Bekannten	11 %
	freie Werkstatt / Tankstelle	4 %
	Fachwerkstatt	49 %

### 3 Zum Fahrverhalten

n=273

Wieviele km fahren Sie Ø pro Jahr mit einem Auto?	Ø ca. km 17.000
---	-----------------

Wieviele km fahren Sie Ø pro Jahr mit einem Motorrad?	Ø ca. km 9.700
---	----------------

Welcher Anteil Ihrer Motorradfahrten ersetzt Fahrten mit anderen Verkehrsmitteln?	Ø ca. 42 %
---	------------

Welche Fahrerfahrung haben Sie auf Motorrädern?	Ø ca. km 92.000
---	-----------------

Wie charakterisieren Sie Ihren Fahrstil?		
	Sportfahrer	4 %
	Sport-Tourenfahrer	34 %
	Tourenfahrer	43 %
	Reise-Enduro-Fahrer	14 %
	Enduro-/Geländefahrer	5 %

Wie oft benutzen Sie Ihr Motorrad im Jahr?	Ø ca. 162 mal
--	---------------

Unter welchen Bedingungen fahren Sie Motorrad?		
	ganzjährig	62 %
	nur im Sommerhalbjahr	32 %
	nur bei trockenem Wetter	18 %

Wie oft fahren Sie allein bzw. in Gruppen?		
(Anteile in % der jährlichen Fahrstrecke)	allein	ca. 68 %
	in Gruppen	ca. 32 %

Wie ist der Beladungszustand Ihrer Maschine?		
(Anteile in % der jährlichen Fahrstrecke)	nur Fahrer	83 %
	Fahrer + Beifahrer	17 %
	mit Gepäck (Ø ca. 25 kg)	25 %

Was ist überwiegend der Zweck Ihrer Motorradfahrten?		
(Anteile in % der jährlichen Fahrstrecke)	Zielgerichtete Fahrt (z.B. Arbeit, Einkaufen, Besuch, ...)	ca. 47 %
	Urlaubsreise / mehrtägige Tour	ca. 22 %
	Freizeitspaß	ca. 41 %

Wie wählen Sie während Ihrer Freizeitfahrten zumeist die Fahrstrecke aus?		
	zielorientiert	24 %
	fahrerisch reizvolle Strecke	63 %
	landschaftlich reizvolle Strecke	59 %
	zufällig	18 %

Wie lang ist die Fahrstrecke pro Tag, an dem Sie das Motorrad benutzen?		
	minimal ca. km	34
	maximal ca. km	451
	Ø ca. km	113

Wie lang ist auf längeren Touren Ihre Ø Fahrstrecke zwischen zwei längeren Stops? (Stop von mehr als 1 h)		
	ca. km	264

Welche Anteile von Straßen werden von Ihnen benutzt, wie hoch ist dabei der Verbrauch?

	Anteil ca.	Verbrauch ca.	Ø Geschw. bei freier Fahrt ca.
Autobahn	22 %	6.6 l/100km	143 km/h
Landstraßen	58 %	5.7 l/100km	99 km/h
Stadtverkehr	20 %	6.2 l/100km	

Wie hoch ist insgesamt Ihr Ø Kraftstoffverbrauch?  
ca. l/100 km 6.0

Wie wichtig ist der Kraftstoffverbrauch ihres Motorrads für Sie?  
(Bitte nur eine Antwort ankreuzen)

sehr wichtig	12 %
wichtig	44 %
weniger wichtig	33 %
egal	11 %

Wie beschreiben Sie Ihre überwiegende Fahrweise?  
(Bitte nur eine Antwort ankreuzen)

sparsam	5 %
angepaßt	40 %
zügig	52 %
scharf	2 %

Welche Fahrweise bevorzugen Sie?

viel Gas bei geringer Drehzahl	29 %
wenig Gas bei höherer Drehzahl	11 %
keine besondere Vorliebe	60 %

Mit welchen Motordrehzahlen fahren Sie überwiegend?

Ø minimal ca. min<sup>-1</sup> 2800

Ø maximal ca. min<sup>-1</sup> 6400

Bei welcher Drehzahl schalten Sie zumeist in einen höheren Gang (z.B. 3. ⇒ 4.)? Ø ca. min<sup>-1</sup> 4800

Bei welcher Drehzahl schalten Sie zumeist in einen niedrigeren Gang (z.B. 4. ⇒ 3.)? Ø ca. min<sup>-1</sup> 2900

Gibt es Drehzahlbereiche, die Sie z.B. wegen starker Schwingungen vermeiden?

ja 26 %

nein 74 %

Mit welcher Maximaldrehzahl fahren Sie kurzzeitig, z.B. beim Überholen? Ø ca. min<sup>-1</sup> 7700

Ich bin bereit, an den geplanten Fahrversuchen der TU Darmstadt teilzunehmen:

maximal 1 mal	19
maximal 2 mal	39
maximal 3 mal	37
maximal 4 mal	7
öfter	28
Summe	130

## Verwendete Meßtechnik

### Datenerfassung

Zur Erfassung der Meßdaten am Motorrad diente ein Datenlogger der Fa. 2D Debus & Diebold, Karlsruhe. Dieser bietet sowohl Analog- als auch Digitaleingänge und variable Abtastraten, die über die zugehörige Steuerungssoftware Race eingestellt werden. Während der Versuche im öffentlichen Straßenverkehr betrug die Abtastrate 6,25 Hz.

In den Pkw erfolgte die Meßdatenaufzeichnung mit handelsüblichen PC und A/D-Wandlern (Microstar DAP 2500) sowie der Meßdatenerfassungssoftware Digis. Die Versuchsfahrten mit den Pkw wurden mit einer Abtastrate von 5 Hz aufgezeichnet.

Alle Versuchsfahrten wurden mit kaltem Motor und einer Fahrzeugkonditionierung im Bereich der fzd-Fahrzeughalle (Temperatur zwischen 19 und 27 °C) gestartet.

### Software zur Datenauswertung

Der überwiegende Teil der Auswertung erfolgte unter MatLab Version 5.2 sowie Microsoft Excel 97. Für die statistischen Berechnungen wird außerdem SPSS 9.0 für Windows benutzt. Für die Geräuschemessungen, -auswertungen und Frequenzanalysen wurde ein Miras-Roadrunner-System der Fa. LMS eingesetzt.

### Messung von Fahrgeschwindigkeit und Fahrstrecke

Die Messung der Fahrgeschwindigkeit erfolgte bei den Motorrädern über eine berührungslose Abtastung der Vorderraddrehzahl. Vernachlässigt wurden dabei der Rad-

schlupf durch die Rollwiderstandskraft am Vorderrad und durch kurzzeitigen Bremschlupf sowie die geschwindigkeitsabhängige Veränderung des dynamischen Reifenhaltmessers mit der Fahrgeschwindigkeit.

Bei Pkw 1 wurde die Raddrehzahl als Mittelwert der nicht angetriebenen Hinterräder bestimmt. Pkw 2 wurde mit einem optisch arbeitenden Geschwindigkeitssensor der Fa. Datron ausgerüstet.

Aus den Geschwindigkeitssignalen wurde durch numerische Integration der zurückgelegte Weg berechnet. Hierbei werden die Fehler im Geschwindigkeitssignal ebenfalls integriert, so daß die errechnete Streckenlänge der gesamten Fahrt als gute Abschätzung des entstehenden Gesamtfehlers herangezogen werden kann. Zusätzlich wird der zurückgelegte Weg beeinflusst von der Wahl der Fahrlinie auf der Fahrbahn, was besonders auf kurvenreichen Streckenabschnitten zu unterschiedlichen Beträgen in der Berechnung des Weges führt. Die beobachtete Abweichung der gefahrenen Gesamtfahrstrecke vom Mittelwert der Fahrten betrug maximal ca. +/- 1,5 %, sofern die vorgegebene Strecke nach Aussage des Fahrers eingehalten wurde.

#### *Messung der Motordrehzahl*

Die Motordrehzahl wurde bei allen Fahrzeugen erfaßt, indem die vom Kurbelwellengeber gesendeten Signale, i.a. zwei Impulse pro Kurbelwellendrehung, direkt bzw. nach Durchlaufen eines linearen Frequenzteilers zur Reduzierung der Impulszahl auf einen Zählengang des Loggers geschaltet wurden.

#### *Messung der Drosselklappenbetätigung*

Die Drosselklappenbetätigung wurde mittels Drehpotentiometer an der Drosselklappenwelle gemessen und analog aufgezeichnet. Das Meßsignal wurde unabhängig von der Zuordnung zwischen Gasgriffstellung und Drosselklappenwinkel linear zwischen dem Null- und Vollastanschlag auf 0 bis 100 % skaliert.

#### *Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs*

Der integrale Kraftstoffverbrauch für jede Meßfahrt wird durch gravimetrische Bestimmung der benötigten Kraftstoffmenge ermittelt. Hierzu wird, soweit die Tankgeometrie dies zuläßt, das Fahrzeug horizontal ausgerichtet und im kalten Zustand bis zu einer definierten Füllhöhe mit Kraftstoff befüllt. Die Differenzmenge wird durch Wiegen des Vorratsbehälters vor und nach dem Tankvorgang bestimmt. Experimentell wurde der mögliche Fehler durch Dichteänderungen des Kraftstoffs bei einer Temperaturvariation um 10 °C zu maximal 3 % bestimmt. Die maximale gemessene Temperaturdifferenz während der Tankvorgänge betrug 6 °C, was einem Fehler von weniger als 2 % entsprach.

Bei Motorrad 1 wurde, da die Tankgeometrie ein definiertes Befüllen nicht zuließ, der Kraftstofftank komplett demontiert und die Gewichts-differenz des Tanks vor und nach der Fahrt bestimmt.

Für die Verbrauchsmessungen mit Pkw 1 wurde ein Durchflußmengenmesser PLU 106 der Fa. Pierburg verwendet, der eine volumetrische Bestimmung der durchgeflossenen Kraftstoffmenge erlaubt. Zusätzlich wurde die Kraftstofftemperatur in der Nähe des Durchflußmessers gemessen, so daß eine rechnerische Dichtekorrektur vorgenommen werden konnte und der Massenfehler auf weniger als 2 % begrenzt wurde.

Bei Pkw 2 wurde das Verbrauchssignal des Bordcomputers zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs verwendet. Dieser nimmt die Bestimmung der Kraftstoffmenge über die Öffnungszeiten der Einspritzventile vor, was bei konstantem Kraftstoffdruck mit hinreichender Genauigkeit das durchgeflossene Volumen beschreibt.

#### *Ermittlung des eingelegten Getriebegangs*

Der eingelegte Getriebegang wurde aus Motordrehzahl und Vorderraddrehzahl rechnerisch bestimmt. Hierbei wurde zur Berücksichtigung des Vorderradschlupfs je nach Getriebestufung des Fahrzeugs eine Bandbreite von ca. +/- 5 % vom theoretischen Drehzahlverhältnis eines Getriebegangs akzeptiert. Außerdem wurde eine gleitende Mittelung der Größen in einem Zeitfenster von 1,6 Sekunden vorgenommen, um kurzzeitige Störungen zu eliminieren, wie sie beim Fahren auf unebenen Straßen entstehen.

#### *Navigation*

Die Führung des Fahrerkollektivs entlang der vorgegebenen Versuchsstrecke erfolgte mittels einer Garmin GPS III-Empfänger, der im Armaturenbereich der Fahrzeuge positioniert wurde. Durch einmaliges Befahren der Strecke vor Beginn der Versuche wurden die Streckendaten eingelesen, so daß während der anschließenden Versuche den Versuchspersonen stets die eigene Position in Relation zur zu fahrenden Strecke angezeigt werden konnte. Die Genauigkeit der Angabe lag dabei zumeist in einem Bereich von 50 bis 100 m.

**Zeitverlauf des vorgeschlagenen Fahrzyklus DDC**

Zeit [s]	v [km/h]	Zeit [s]	v [km/h]	Zeit [s]	v [km/h]	Zeit [s]	v [km/h]	Zeit [s]	v [km/h]
1	0	55	7.8	109	37.9	163	1.8	217	106.6
2	0	56	12	110	34.3	164	4.4	218	101.2
3	0	57	16.9	111	30.7	165	7.8	219	94
4	0	58	22.7	112	27.1	166	12	220	86.8
5	0	59	29.2	113	23.5	167	16.9	221	82.5
6	0	60	36.6	114	19.9	168	22.7	222	80.5
7	0	61	43.8	115	16.3	169	29.2	223	80.5
8	0	62	44.5	116	12.7	170	36.6	224	80.5
9	0	63	44.5	117	9.1	171	44.7	225	80.5
10	0	64	44.5	118	5.5	172	53.7	226	80.5
11	1.8	65	44.5	119	1.9	173	62.7	227	80.5
12	4.4	66	42.7	120	0	174	71	228	86.1
13	8	67	38.4	121	0	175	78.6	229	90.8
14	12	68	34.1	122	0	176	85.4	230	94.8
15	17	69	29.7	123	0	177	91.5	231	98
16	22.7	70	25.4	124	1.8	178	96.9	232	99.8
17	29.5	71	21.1	125	4.4	179	101.6	233	99.8
18	36.6	72	16.8	126	7.8	180	105.6	234	98
19	44.7	73	12.5	127	12	181	108.8	235	93.7
20	53.7	74	8.1	128	16.9	182	111.3	236	86.5
21	61.3	75	3.8	129	22.7	183	113.1	237	79.3
22	64.9	76	0.6	130	29.2	184	114.2	238	72.1
23	66.3	77	0	131	36.6	185	114.6	239	64.9
24	66.3	78	0	132	44.7	186	114.6	240	57.7
25	66.3	79	0	133	53.7	187	114.6	241	50.5
26	66.3	80	0	134	61.8	188	114.6	242	46.2
27	66.3	81	0	135	68.4	189	114.6	243	44
28	66.3	82	0	136	73.4	190	114.6	244	42.9
29	65.2	83	1.8	137	76	191	114.6	245	42.9
30	63.1	84	4.4	138	77	192	114.6	246	44
31	59.5	85	7.8	139	77	193	114.6	247	46.2
32	55.9	86	12	140	77	194	114.6	248	50.8
33	52.3	87	16.9	141	77	195	114.6	249	58
34	48.7	88	22.7	142	76	196	114.6	250	66
35	45.1	89	29.2	143	73.8	197	114.6	251	73.2
36	41.5	90	36.6	144	70.2	198	114.6	252	80
37	37.9	91	44.7	145	65.9	199	114.6	253	85.8
38	34.3	92	53.7	146	60.5	200	114.6	254	89.7
39	30.7	93	61.3	147	54	201	114.6	255	93
40	27.1	94	64.9	148	46.8	202	114.6	256	95.8
41	23.5	95	66.3	149	39.6	203	114.6	257	98
42	19.9	96	66.3	150	32.4	204	114.6	258	99.8
43	16.3	97	66.3	151	25.2	205	114.6	259	99.8
44	12.7	98	66.3	152	18	206	114.6	260	98
45	9.1	99	66.3	153	10.8	207	114.6	261	93.7
46	5.5	100	66.3	154	5.4	208	114.6	262	86.5
47	1.9	101	65.2	155	2.2	209	114.6	263	79.3
48	0	102	63.1	156	0	210	114.6	264	72.1
49	0	103	59.5	157	0	211	114.6	265	64.9
50	0	104	55.9	158	0	212	114.6	266	57.7
51	0	105	52.3	159	0	213	114.6	267	50.5
52	0	106	48.7	160	0	214	114.6	268	46.2
53	1.8	107	45.1	161	0	215	114.6	269	44
54	4.4	108	41.5	162	0	216	111	270	42.9

Zeit [s]	v [km/h]	Zeit [s]	v [km/h]	Zeit [s]	v [km/h]	Zeit [s]	v [km/h]	Zeit [s]	v [km/h]
271	42.9	325	8.7	379	22.7	433	50.8	486	3.3
272	44	326	5.5	380	29.2	434	58	487	0
273	46.2	327	3.3	381	36.6	435	66	488	0
274	50.8	328	0	382	44.7	436	73.2	489	0
275	58	329	0	383	53.7	437	80	490	0
276	66	330	0	384	62.7	438	85.8		
277	73.2	331	0	385	71	439	89.7		
278	80	332	0	386	78.6	440	93		
279	85.8	333	0	387	85.4	441	95.8		
280	89.7	334	0	388	90.1	442	98		
281	93	335	1.8	389	94	443	99.8		
282	95.8	336	4.4	390	97.3	444	99.8		
283	98	337	7.8	391	99.8	445	98		
284	99.8	338	12	392	99.8	446	93.7		
285	99.8	339	16.9	393	98	447	86.5		
286	98	340	22.7	394	93.7	448	79.3		
287	93.7	341	29.2	395	86.5	449	72.1		
288	86.5	342	36.6	396	79.3	450	64.9		
289	79.3	343	44.7	397	72.1	451	57.7		
290	72.1	344	53.7	398	64.9	452	50.5		
291	64.9	345	61.8	399	57.7	453	46.2		
292	57.7	346	68.4	400	50.5	454	44		
293	50.5	347	73.4	401	46.2	455	42.9		
294	46.2	348	76	402	44	456	42.9		
295	44	349	77	403	42.9	457	44		
296	42.9	350	77	404	42.9	458	46.2		
297	42.9	351	77	405	44	459	50.8		
298	44	352	77	406	46.2	460	58		
299	46.2	353	76	407	50.8	461	66		
300	50.8	354	73.8	408	58	462	73.2		
301	58	355	70.2	409	66	463	80		
302	66	356	65.9	410	73.2	464	85.8		
303	73.2	357	60.5	411	80	465	89.7		
304	80	358	54	412	85.8	466	93		
305	85.8	359	46.8	413	89.7	467	95.8		
306	89.7	360	39.6	414	93	468	98		
307	93	361	32.4	415	95.8	469	99.8		
308	95.8	362	25.2	416	98	470	99.8		
309	98	363	18	417	99.8	471	98		
310	99.8	364	10.8	418	99.8	472	93.7		
311	99.8	365	5.4	419	98	473	86.5		
312	98	366	2.2	420	93.7	474	79.3		
313	93.7	367	0	421	86.5	475	72.1		
314	86.5	368	0	422	79.3	476	64.9		
315	79.3	369	0	423	72.1	477	57.7		
316	72.1	370	0	424	64.9	478	50.5		
317	64.9	371	0	425	57.7	479	43.3		
318	57.7	372	0	426	50.5	480	36.1		
319	50.5	373	0	427	46.2	481	28.9		
320	43.3	374	1.8	428	44	482	21.7		
321	36.1	375	4.4	429	42.9	483	14.5		
322	28.9	376	7.8	430	42.9	484	8.7		
323	21.7	377	12	431	44	485	5.5		
324	14.5	378	16.9	432	46.2	486	3.3		

## Literatur

- [1] ARAL AG (Hrsg.): Verkehrstaschenbuch, Ausgabe 1998/99, Bochum, 1999
- [2] Bach, C.; Heeb, N.; Mattrel, P.; Mohr, M.: Wirkungsorientierte Bewertung von Automobilabgasen, MTZ Motortechnische Zeitschrift 59 (1998), Nr. 11, 1998
- [3] Backhaus, R.: Titelthema 3-Liter-Lupo, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 101 (1999), Nr. 3, 1999
- [4] Bamberg, G.; Baur, F.: Statistik, Oldenbourg-Verlag, 6. Aufl., München, 1989
- [5] Bäumel, R.: Das Duell – Auto gegen Motorrad, in: Zeitschrift Motorrad, Heft 9, 1995
- [6] Bayer, B.: Das Pendeln und Flattern von Krafträdern, Dissertation TH Darmstadt, herausgegeben vom Institut für Zweiradsicherheit, Bochum, 1986
- [7] Berg, W.: Die neue Abgas-Gesetzgebung der USA, In: Lenz, H.P. (Hrsg.): 12. Wiener Motorensyposium 1991, VDI-Fortschrittberichte Reihe 12, Nr. 150, Bd. 2, Düsseldorf, 1991
- [8] Berg, W.: Die Pkw-Abgasgesetzgebung in den USA, in der Europäischen Union und Asien. Status-Weiterentwicklung-Harmonisierungschancen. In: Lenz, H.P. (Hrsg.): 17. Wiener Motorensyposium 1996, VDI-Fortschrittberichte Reihe 12, Nr. 267, Bd. 2, Düsseldorf, 1996
- [9] Betzler, J.: Untersuchungen zur Beschreibung des Verkehrs-, Fahrzeug- und Fahrereinflusses auf den Streckenkraftstoffverbrauch von Pkw im Stadtverkehr, VDI-Berichte 553, Düsseldorf, 1985
- [10] Bielaczek, Ch.: Untersuchungen zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr, Dissertation TU Darmstadt, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 357, Düsseldorf, 1998
- [11] Bleymüller, Gehlert, Gülicher: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler, 10. Aufl., München, 1996
- [12] BMW Motorrad Trainingszentrum (Hrsg.): Die neue BMW K 1200 LT – Technik im Detail, München, 1998
- [13] Bosch (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 23. Aufl., VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999
- [14] Breuer, B.: Sicherheit und Umweltschutz am Beispiel Auto der Zukunft, Sonderdruck anlässlich des Jahresempfangs 1996 der TÜ Hessen/TÜH, Darmstadt, 1996
- [15] Breuer, B.: Skriptum zur Vorlesung Fahrzeugtechnik I – III, Technische Universität Darmstadt, 1998
- [16] Breuer, B.: Skriptum zur Vorlesung Motorräder, Technische Universität Darmstadt, 1998
- [17] Breuer, J.: Ergonomische Beurteilung und Gestaltung der Sicherheit des Arbeitssystems Kraftfahrzeugführen, Dissertation TH Darmstadt, Darmstadt, 1995

- [18] Bruner, G.: Die Schadstoffemissionen der einspurigen Kraftfahrzeuge, XVIII. Internationaler FISITA Congress, Hamburg, 1980
- [19] Bundesanstalt für Straßenwesen: Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch bei kurzzeitiger Motorabschaltung, Berichte der BASt Heft F 22, Bergisch-Gladbach, 1997
- [20] Bundesumweltministerium (Hrsg.): Nachhaltige Entwicklung – Umsetzung der Agenda 21 in Deutschland, Bonn, 1992
- [21] Bundesumweltministerium (Hrsg.): Dokumentation Motorrad und Umwelt, Abschlußbericht der BMU-Projektgruppe „Motorrad und Umwelt“, Bonn, 1999
- [22] Bundesverband der Motorradfahrer: Aktuelle Streckensperrungen, Internet <http://www.bvdm.de>, Stand 03/2000
- [23] Bundesverkehrsministerium (Hrsg.): Verkehr in Zahlen 1997, FGSV Verlag GmbH, Köln, 1997
- [24] Carpetis, C.; Nitsch, J.: Neue Antriebskonzepte im Vergleich, MTZ Motortechnische Zeitschrift 60 (1999), Heft 2, 1999
- [25] China-SAE: China Automotive Industry Yearbook 1993, Beijing/China, 1994
- [26] Cogotti, A: Evolution of experimental wind tunnel techniques for two-wheel vehicles, ATA paper 98A7018, International Power Two Wheels Conference, Pisa, 1998
- [27] Degobert, P.: Automobiles and Pollution, SAE (Hrsg.), ISBN 1-56091-563-3, Warrendale/USA, 1995
- [28] Demel, H.: Der Pkw mit 3 l Verbrauch pro 100 km – Traum oder Wirklichkeit, in: Lenz, H.P. (Hrsg.): 16. Internationales Wiener Motorensymposium 1995, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 239, Bd. 2, Düsseldorf, 1995
- [29] Deutsche Shell AG (Hrsg.): Mehr Autos – weniger Emissionen, Szenarien des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahr 2020, Hamburg, 1999
- [30] Dietz, M.; Nester, U.; Lambert, L.; Brüggemann, H.: Der neue Common-Rail-Dieselmotor mit Direkteinspritzung für den smart – Teil 2: Verbrennung und Motormanagement, MTZ Motortechnische Zeitschrift 60 (1999), Nr. 12, 1999
- [31] Dürheimer, W.; Bäuml, R.: The BMW C1 – A Synthesis of a Motorcycle and a Car, FISITA Paper F98S114, 1998 FISITA Conferences, Paris, 1998
- [32] Erdmann, G.; Wiesenberger, R.: Emissionsgesetzgebung und alternative Automobilantriebe in Kalifornien, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1998), Nr. 5, 1998
- [33] European Commission: European Commission Green Paper – Future Noise Policy, Brüssel, 1996
- [34] Evans, L.: Driver behaviour effects on fuel consumption in urban driving, in: Human Factors Heft 21(4), Virginia/USA, 1979
- [35] Fastenmeier, W.; Gstalter, H.: Freizeitmobilität – Motive und Formen, Tagung „Der Mensch im Verkehr“ München 1997, VDI-Berichte 1317, Düsseldorf, 1997

- [36] Fischer, M.: Die Zukunft des Ottomotors als Pkw-Antrieb – Entwicklungschancen unter Verbrauchsaspekten, Schriftenreihe B – Fahrzeugtechnik – des Instituts für Straßen- und Schienenverkehr der TU Berlin, Berlin, 1998
- [37] Gamariello, R.; Long, J.: Development of Unified Correction Cycles, 6<sup>th</sup> CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop, San Diego/California, USA, 1996
- [38] Garmin: GPS III Owners Manual and Reference, Olathe, Kansas, USA, 1997
- [39] Gaßmann, S.: Untersuchungen zum Einfluß von Fahrzeug, Fahrer und Verkehr auf Betriebsweise und Kraftstoffverbrauch eines Pkw im realen Stadtverkehr, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12 Nr. 155, Düsseldorf, 1991
- [40] Goblirsch, R.: Abgas, Verbrauch, Lärm, in: ADAC Motorradwelt 10/92, München, 1992
- [41] Greening, B.: European Commission, in AVL-Tagung Motor und Umwelt 4./5.09.97, Graz, 1997
- [42] Guzella, L.; Martin, R.: Das SAVE-Motorkonzept, MTZ Motortechnische Zeitschrift 59 (1998), Heft 10, 1998
- [43] Hartung, L.; Kalis, P.; Appel, H.: Abgasemissionsergebnisse von motorisierten Zweirädern, 3. VDI-Fachtagung Motorrad Darmstadt 1989, VDI-Berichte 779, Düsseldorf, 1989
- [44] Hasenclever, H.-C.: Der NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator am DI-Ottomotor – Eine Untersuchung des Gesamtsystems, Dissertation TU Darmstadt, Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen, Darmstadt, 1999
- [45] Hautzinger, H.; Heidemann, D.; Krämer, B.; Tassaux-Becker: Fahrleistung und Unfallrisiko von Kraftfahrzeugen – Schlußbericht zur Fahrleistungserhebung 1990, BASt Heft M 30, Bergisch-Gladbach, 1994
- [46] Heaton, D.M.; Rijkeboer, R.C.; van Sloten, P.: Analysis of emission results from 1000 in-use passenger cars tested over regulation cycles and non-regulation cycles, Mitteilung des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Wien, Heft 64, 1992
- [47] Heyl, G.; Lindener, N.; Stadler, M.: Akustische/aeroakustische Eigenschaften von Motorradhelmen, 5. VDI-Fachtagung Motorrad Berlin 1993, VDI Berichte 1025, Düsseldorf, 1993
- [48] Herrmann, R.; Gregotsch, K.; Groß, G.: Entwicklung eines lärmarmen Motorrades, Forschungsbericht zum UBA-Projekt 105 05 113/06, Berlin, 1984
- [49] Honda R&D Europe: Future Innovations, Offenbach, 1998
- [50] Hohenberg, G.: Skriptum zur Vorlesung Verbrennungskraftmaschinen I und II, Technische Universität Darmstadt, 1994
- [51] Hohenberg, G.; Hasenclever, H.C.: Der Zielkonflikt zwischen sauberem Abgas und minimalem Kraftstoffverbrauch beim DI-Ottomotor, TAE-Symposium Esslingen, 1998
- [52] Industrieverband Motorrad (IVM) (Hrsg.): Jahresbericht 1997, Essen, 1998
- [53] Industrieverband Motorrad (IVM) (Hrsg.): Jahresbericht 1998, Essen, 1999
- [54] Industrieverband Motorrad (IVM): Motorrad direkt, September 1998

- [55] Industrieverband Motorrad (IVM): Motorrad direkt, Juni 1999
- [56] ISO 226: Akustik, Normalkurven gleicher Lautstärke, Ausgabe 1987-05, 1987
- [57] Liebl, J.: Entwicklungstendenzen der Abgasnachbehandlung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Motorkonzepte, Tagung Zukünftige Abgasgesetzgebung in Europa und USA, Haus der Technik, Essen, November, 1998
- [58] Kiefer, W. et.al.: BMW 750i mit elektrisch beheiztem Katalysator, MTZ Motor-technische Zeitschrift 59 (1998), Nr. 11, 1998
- [59] Koch, W.: Technik Bimota 500 Vdue, in: Zeitschrift Motorrad, Heft 26, 1996
- [60] Kollmann, K. et.al.: Das 3-Zylinder-Motorenkonzept für den Smart – Eine kompetente Lösung für eine außergewöhnliche Aufgabenstellung, in: Lenz, H.P. (Hrsg.): 19. Int. Wiener Motorensymposium, VDI-Fortschrittberichte Reihe 12, Nr. 348, Bd. 1, Düsseldorf, 1998
- [61] Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.): Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes, Reihe 1, Heft 7/97, Flensburg, 1997
- [62] Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.): Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes, Reihe 2, Sonderheft 1/98, Flensburg, 1998
- [63] Lenzen, B.; Gröf, S.; Kern, W.: Fahrereinfluß auf die Emissionen und den Verbrauch, Fahrzeug- und Motortechnisches Seminar an der TU Darmstadt, Darmstadt, 1994
- [64] Lenzen, B.; Gröf, S.: Analyse der Fahrstrategien von Rollenfahrern für die Abbildung des menschlichen Verhaltens auf den dynamischen Motorenprüfstand, Seminar im Haus der Technik, Essen, 1997
- [65] Lindermayer, R.; Vitale, F.: Motorräder – Die Umweltaspekte, 2. Internationale Motorradkonferenz, München, 1998
- [66] Metz, N.: Die Luftqualität in Europa bis zum Jahre 2010 mit und ohne Euro IV Grenzwerte, in: Lenz, H.P. (Hrsg.): 19. Wiener Motorensymposium, VDI Fortschrittberichte Reihe 12, Nr. 348, Bd. 1, Düsseldorf, 1998
- [67] Metzeler (Hrsg.): Reifenhandbuch Motorradreifen, München, 1999
- [68] Mußmann, L., et.al.: Development and Application of a Computer Model for Hydrocarbon Adsorber Catalysts, Tagung Zukünftige Abgasgesetzgebung in Europa und USA, Haus der Technik, Essen, November, 1998
- [69] Nierhauve, B.: Neue Herausforderungen an die heutige und zukünftige Kraftstoffversorgung des Straßenverkehrs, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 101 (1999), Heft 3, 1999
- [70] Otto, E.: Die Abgasnachbehandlungskonzepte der neuen BMW Otto-Motoren, Tagung Zukünftige Abgasgesetzgebung in Europa und USA, Haus der Technik, Essen, 1998
- [71] Präckel, J.: Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft F 18, Bergisch Gladbach, 1996

- [72] Präckel, J.: Die Motorradbremsung im System Mensch/Maschine/Umgebung, Dissertation TU Darmstadt, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 384, Düsseldorf, 1999
- [73] Rijkeboer, R.C.: The motorcycle emission situation – A report to the European Commission, TNO Road-Vehicles Research Institute Report Nr. 99.OR.VM.035.1/RR, Delft/Niederlande, 1999
- [74] Schindler, K.P.: Status of World Wide Exhaust Gas Legislation, Tagung Zukünftige Abgasgesetzgebung in Europa und USA, Haus der Technik, Essen, November, 1998
- [75] Schmidt, S.; Schäfer, F.: Entwicklung eines Zweirad-Katalysators, 5. VDI-Fachtagung Motorrad Berlin 1993, VDI-Berichte 1025, Düsseldorf, 1993
- [76] Schmieder, M.; Bley, D.; Spiekermann, M.; von Zettelmann, V.: Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft F 9, Bergisch Gladbach, 1994
- [77] Schmieder, M.: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung der Hochgeschwindigkeitsstabilität von Motorrädern, Forschungsbericht zum Projekt 1.8802 des Bundesministers für Verkehr, herausgegeben von der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1991
- [78] Schulz, U.: Anreize des Motorradfahrens – Einschätzung durch Motorradfahrer, 3. VDI-Fachtagung Motorrad Darmstadt 1989, VDI-Berichte 779, Düsseldorf, 1989
- [79] Schulz, U.; Hagstotz, W.: Motorradfahrerinnen, 5. Fachtagung Motorrad Berlin 1993, VDI-Berichte 1025, Düsseldorf, 1993
- [80] Schulz, U.; Schabel, S.; Ostendorf, F.: Persönlichkeit, Selbstkonzept und Freizeitmotivation von Motorradfahrern, 2. Internationale Motorradkonferenz, München, 1998
- [81] Speckens, F.-W.; Hermsen, F.-G.; Buck, J.: Konstruktive Wege zum reibungsarmen Ventiltrieb, MTZ Motortechnische Zeitschrift 59 (1998), Heft 3, 1998
- [82] Stenschke, R.: Lärm- und Schadstoffemissionen von motorisierten Zweirädern – Stand der Technik und Maßnahmen zur Verminderung, 3. VDI-Fachtagung Motorrad Darmstadt 1989, VDI-Berichte 779, Düsseldorf, 1989
- [83] Stenschke, R.: Maßnahmen zur Minderung der Geräuschemission von motorisierten Zweirädern, 5. VDI-Fachtagung Motorrad Berlin 1993, VDI-Berichte 1025, Düsseldorf, 1993
- [84] Stenschke, R.: Auswirkung von Maßnahmen zur Geräuscheminderung an motorisierten Zweirädern auf die Geräuschemissionen im realen Verkehr, 6. Fachtagung Motorrad, VDI-Berichte Nr. 1159, Düsseldorf, 1994
- [85] Stenschke, R.; Schulz, U.: Lärmverursachung durch Fahrverhalten und Konzepte zur Minderung der Geräuschemissionen von Motorrädern, 2. Internationale Motorradkonferenz, München, 1998
- [86] Steven, H.: Ermittlung der Geräuschemissionswerte von Motorrädern auf der Basis praxisnaher Fahrkollektive, Forschungsbericht 105 05 115/02 im Auftrag des

- Umweltbundesamts, Forschungsinstitut Geräusche und Erschütterungen, Aachen, 1984
- [87] Steven, H.: Advanced test cycle for total vehicle noise as basis for international legislation, EuroNoise 98, München, 1998
- [88] Stoffregen, J.; Biermeier, F.X.: Die Katalysatorkonzepte für die BMW-Motorräder der K-Baureihe, MTZ Motortechnische Zeitschrift 53 (1992), Heft 6, 1992
- [89] Stoffregen, J.: Motorradtechnik, 3. Auflage, Vieweg-Verlag, München, 1998
- [90] Thiemann, W.; Finkbeiner, H.; Brüggemann, H.: Der neue Common-Rail-Dieselmotor mit Direkteinspritzung für den smart – Teil 1: Motorkonstruktion und mechanischer Aufbau, MTZ Motortechnische Zeitschrift 60 (1999), Nr. 11, 1999
- [91] Umino, H.: Legislation in Japan – Connected with Vehicle Emission and Fuel Economy Regulations, in: Lenz, H.P. (Hrsg.): 12. Internationales Wiener Motoren-symposium 1991, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 150, Bd. 2, Düsseldorf, 1991
- [92] Umweltbundesamt: Minderung der Lärmemission von motorisierten Zweirädern, FKZ 105 05 141/01, Berlin, 1992
- [93] Umweltbundesamt: Ermittlung der Emissionen für Motorräder in der Bundesrepublik Deutschland, FKZ 105 06 017, Berlin, 1993
- [94] Umweltbundesamt und Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Umweltdaten Deutschland 1998, Berlin/Wiesbaden, 1998
- [95] Umweltbundesamt Österreich: Luftschadstoffe aus dem Straßenverkehr - Aktualisierung der Luftschadstoffemissionen aus dem Straßenverkehr und Emissionsfaktoren von Fahrzeugen in Österreich zwischen 1980 und 1995, Wien, 1997
- [96] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: Highway Statistics Annual Series, 1998
- [97] van Basshuysen, R.: Zylinderabschaltung und Ausblenden einzelner Arbeitszyklen zur Kraftstoffersparnis und Schadstoffminderung, MTZ Motortechnische Zeitschrift 54 (1993), Heft 5, 1993
- [98] Verband der Automobilindustrie: VDA-Mitteilungen, Nr. 13/98 v. 24.11.1998, S. 52 ff., Frankfurt, 1998
- [99] Verband der Automobilindustrie: VDA-Mitteilungen, Nr. 7/99 v. 15.06.1999, S. 31, Frankfurt, 1999
- [100] Weber, H.; Richter, A.: Erprobung eines Prüfverfahrens für die Abgasemission von Krafträdern, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1981
- [101] Weidele, A.; Seibert, W.: Kriterien für Fahrverhalten und Bauteilsicherheit von Leichtmofas mit Radnabenmotor, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 107, Düsseldorf, 1988
- [102] Weidele, A.: Das Gebrauchsmotorrad der Zukunft – ein Denkansatz, 4. VDI-Fachtagung Motorrad, München 1991, VDI-Berichte 875, Düsseldorf, 1991
- [103] Weidele, A.: Untersuchungen zum Bremsverhalten von Motorrädern unter besonderer Berücksichtigung der ABS-geregelten Kurvenbremsung, Dissertation TH Darmstadt, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 210, Düsseldorf, 1994

- [104] Winterhagen, J.: Greenpeace setzt auf Druckwellenaufladung, MTZ Motortechnische Zeitschrift 59 (1998), Heft 1, 1998
- [105] Yamamoto, H.: How Can Small Motorcycles Survive in the Era of Fuel Cell Technology?, ATA Power Two Wheels International Conference, Pisa/Italy, 1998

### **Eigene Veröffentlichungen zum Thema**

- [106] Präckel, J.; Schröder, F.: Bremsverhalten von Motorradfahrern im realen Straßenverkehr, 6. EVU-Jahrestagung, Bratislava/Slowakei, 1997
- [107] Schröder, F.; Breuer, B.; Schmid, R.: Betriebsweise und Kraftstoffverbrauch von Motorrädern im realen Verkehr, 2. Internationale Motorradkonferenz, München, 1998
- [108] Schröder, F.; Breuer, B.: Driving Performance and Fuel Economy of Motorcycles in Real Traffic, ATA Power Two Wheels International Conference, Pisa/Italy, 1998
- [109] Schröder, F.; Funke, J.; Breuer, B.: Motorcycle Noise Emissions in Real Traffic Situations, EAEC Automotive Congress, Barcelona/Spain, 1999
- [110] Schröder, F.; Breuer, B.; Preiß, H.; Weidhaas, G.: Motorcycle Noise and Exhaust Emissions – Statutory Testing Methods versus Real Traffic Situations, SAE Small Engine Technology Conference & Exposition, Madison/Wisconsin (USA), 1999

### **Unveröffentlichte Forschungsberichte zum Thema**

- [111] ACEM: ACEM Pollution Research Programme on Motorcycles, Brüssel, 1998
- [112] Präckel, J.: Untersuchungen zu Geräuschemissionen von Krafträdern, fzd-Bericht Nr. 166/93, Darmstadt, 1993
- [113] Schröder, F.: Untersuchungen zu Fahrerverhalten und Kraftstoffverbrauch von Motorrädern im realen Straßenverkehr, fzd-Bericht Nr. 248/98, Darmstadt, 1998
- [114] Steven, H.: Proposal for New Driving Cycles for Exhaust Emission Measurements of Motorcycles, UBA-Forschungsprojekt 298 45 164/02, Herzogenrath, 1999

### **Studien- und Diplomarbeiten zum Thema (in chronologischer Reihenfolge)**

- [115] Fliegl, Oliver: Ausrüstung eines Versuchsmotorrades zur meßtechnischen Erfassung des verbrauchsrelevanten Fahrerverhaltens, fzd-Studienarbeit Nr. 717/97, Darmstadt, 1997
- [116] Hoffmann, Robert: Durchführung und Auswertung von Fahrversuchen zur Erfassung des verbrauchsrelevanten Fahrerverhaltens von Motorradfahrern, fzd-Studienarbeit Nr. 721/97, Darmstadt, 1997
- [117] Vogt, Carsten: Experimenteller Vergleich des verbrauchsrelevanten Fahrerverhaltens von Motorrad- und Pkw-Fahrern, fzd-Studienarbeit Nr. 722/97, Darmstadt, 1997

- [118] Palzer, Martin: Kraftstoffverbrauch und Emissionen von Motorrädern - Recherche zur Thematik und Erstellung von Unterrichtsmaterialien, fzd-Projektarbeit Nr. 728/97, Darmstadt, 1997
- [119] Neuhäuser, André: Einfluß von Streckenführung und Verkehrsumfeld auf Fahrerverhalten und Kraftstoffverbrauch bei Motorrädern, fzd-Studienarbeit Nr. 736/98, Darmstadt, 1998
- [120] Funke, Joachim: Ermittlung eines Kennfelds der Geräuschemissionen von Motorrädern in Abhängigkeit vom Fahrzustand, Diplomarbeit am Fachgebiet Aerodynamik und Meßtechnik der TU Darmstadt, durchgeführt und betreut am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt, 1998
- [121] Fehl, Gerhard: Experimentelle Bestimmung des Einflusses des Fahrzustandes eines motorisierten Zweirades auf die Geräuschemissionen, fzd-Diplomarbeit Nr. 305/98, Darmstadt, 1998
- [122] Müller, Harald: Fahrversuche zur Beurteilung des verbrauchsrelevanten Fahrerhaltens von Motorradfahrern, fzd-Studienarbeit Nr. 742/98, Darmstadt, 1998
- [123] Sell, André: Experimentelle Bestimmung der Geräuschemissionen von Motorrädern im realen Verkehr, Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen, durchgeführt und betreut am fzd der TU Darmstadt, Darmstadt/Aachen, 1999
- [124] Hettwer, Elke: Experimentelle Untersuchungen zum verbrauchsrelevanten Fahrerhalten von Motorradfahrern, fzd-Studienarbeit Nr. 760/99, Darmstadt, 1999
- [125] Heinen, Peter: Beurteilung der Praxisnähe aktueller Vorschläge zur Geräuschemessung an Motorrädern, fzd-Studienarbeit Nr. 761/99, Darmstadt, 1999

### **Weitere Veröffentlichungen und Vorträge des Autors**

- [126] Engel, H.G.; Schröder, F. ; Hassiotis, V.; Tiemann, R.: Systemansatz zur Untersuchung von Bremsenrubbeln unter Berücksichtigung der Fahrerwahrnehmung, 7. Internationaler VDI-Kongreß „Meß- und Versuchstechnik im Automobilbau“, Böblingen, 1995
- [127] Schröder, F.; Engel, H.G.; Schönfeld, H.: Einfluß der konstruktiven Gestaltung der Kurbelwelle auf die Laufruhe von Verbrennungsmotoren, VDI-Schwingungstagung 1995, Veitshöchheim, 1995
- [128] Schröder, F.; Zhang, T.: Objective and Subjective Evaluation of Suspension Harshness, 6th International EAEC-Congress, Cernobbio/Italy, 1997
- [129] Schröder, F.; Schönfeld, H.; Wiese, D.: Experimental Investigation of Smoothness of a V-type Engine, 4th International ATA Conference, Bologna/Italy, 1997

## **Lebenslauf**

Frank Schröder	Kinzigstr. 22 63741 Aschaffenburg
Geburtsdatum	6. Februar 1968
Geburtsort	Biedenkopf an der Lahn
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	ledig

### **Ausbildung und berufliche Tätigkeit**

Mai 1987	Abitur an der Lahntalschule in Biedenkopf
Juli 1987 - Sept. 1988	Grundwehrdienst im Stab der Panzerbrigade 14, Neustadt/Hessen, Personalabteilung
1988 - 1994	Studium Wirtschaftsingenieurwesen, technische Fachrichtung Maschinenbau an der Technischen Hochschule Darmstadt, Abschluß: Diplom
1994 - 1999	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
seit Oktober 1999	Versuchingenieur bei Fa. LINDE AG, Aschaffenburg, Entwicklung / Versuch Flurförderzeuge