

# **Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Fahrzeugtechnik Heft F 46**



**bast**

# **Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit**

Joachim Funke  
Hermann Winner

Technische Universität Darmstadt  
Fahrzeugtechnik  
Fachbereich 16 (Maschinenbau)

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 46

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M- Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, daß die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BASt-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

#### **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt 82.120/1997**  
Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremsysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit

#### **Projektbetreuung**

Jost Gail

#### **Herausgeber**

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

#### **Redaktion**

Referat Öffentlichkeitsarbeit

#### **Druck und Verlag**

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: <http://www.nw-verlag.de>

ISSN 0943-99307

ISBN 3-86509-094-X

Bergisch Gladbach, Februar 2004

## Kurzfassung – Abstract

### Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit

Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat das Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt (fzd) damit beauftragt, die Bremsung des Motorradfahrers mit verschiedenen Kraftradbremssystemen zu untersuchen.

Die Bremsung ist eines der am schwierigsten zu beherrschenden Motorradfahrmanöver. Dem Fahrer als Regler zweier unabhängig voneinander bedienbarer Bremskreise wird die Regelaufgabe zusätzlich erschwert durch die latente Sturzgefahr eines kreiselstabilisierten Einspurfahrzeugs. Hinzu kommen das ungünstige, die Gefahr eines Bremsüberschlags begünstigende Verhältnis von Schwerpunktöhe zu Radstand und die meist hohen Bremskräfte bereits bei niedrigen Bedienkräften. Weitere fahrwerkabhängige Parameter wie die Lage des Nickpols beeinflussen den zeitlichen Ablauf der Radlastverschiebung während der für die Erzielung eines geringen Bremswegs besonders wichtigen Anfangsphase der Bremsung.

Trotz dieser für den Fahrer als Regler ungünstigen Voraussetzungen hat sich am Grundkonzept der im größten Teil der Motorradpopulation verbauten Standardbremse mit getrennter Bedienung von Vorderrad- und Hinterradbremse seit Beginn des letzten Jahrhunderts nichts geändert. Aufgabe der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, Anforderungen an Bremssysteme, mit denen der Motorradfahrer sichere Bremsungen mit kurzen Bremswegen reproduzierbar erreichen kann, zu formulieren. Dazu wurden Testpersonen Bremsaufgaben mit den fünf verschiedenen Bremssystemen Standard- und Kombibremse jeweils mit und ohne ABS sowie blockiergeschützter Kombibremse mit Einhebel-Bedienung gestellt und die erzielten Bremswege sowie Belastungs- und Beanspruchungsgrößen des Fahrers aufgezeichnet.

Die Versuche zeigen folgende Ergebnisse: Die erzielten Bremswege sind mit ABS kürzer als ohne, was vor allem auf die Unterschiede in der Anfangsphase einer Bremsung zurückgeführt werden kann. Die während dieser Anfangsphase verstreichende Zeit steigt bei Bremsungen ohne ABS überproportional mit der Ausgangsgeschwindigkeit. Dies gilt

auch und vor allem für die Kurvenbremsung. Ein signifikanter Unterschied zwischen Standard- und Kombibremse konnte nicht festgestellt werden. Die Bedienung einer blockiergeschützten Kombinationsbremse mit nur einem Bremshebel zeigt keinerlei Nachteil gegenüber einer konventionellen Zweihebel-Bedienung.

Bei Bremsungen ohne ABS stieg die als Beanspruchungsgröße herangezogene Herzschlagfrequenz deutlich stärker an als bei Bremsungen mit ABS. Auch der Muskeltonus des Flexor Digitorum Superficialis, eine Belastungsgröße, liegt wie auch andere Belastungsgrößen aufgrund der mit einer höheren mentalen Beanspruchung einhergehenden Muskelanspannung bei Bremsungen ohne ABS deutlich höher als bei Bremsungen mit ABS. Die während des Versuchsbetriebs aufgetretenen Stürze fanden erwartungsgemäß nur bei Bremsungen ohne ABS statt.

Es können folgende Empfehlungen für zukünftige Kraftradbremssysteme abgeleitet werden: ABS sollte bei Einspurfahrzeugen möglichst flächendeckend Verwendung finden; dabei kann es abschaltbar gestaltet werden. Beim Vorhandensein einer blockiergeschützten Kombibremse ist ein Bedienelement ausreichend; dies sollte der Handbremshebel sein. Eine Überschlagregelung blockiergeschützter Bremsen ist notwendig, bestehende Überschlagregelungen müssen verbessert werden.

Der Originalbericht enthält als Anhang den Test zur Ermittlung der Fahrerfahrung. Auf die Wiedergabe dieses Anhangs wurde in der vorliegenden Veröffentlichung verzichtet. Der Test liegt bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und ist dort einsehbar. Verweise auf den Anhang im Berichtstext wurden beibehalten.

### Requirements applicable to future motorcycle brake systems for enhancing riding safety

The Federal Highway Research Institute has commissioned the Automotive Engineering Faculty of Darmstadt Technical University (fzd) to investigate braking by the motorcyclist with various motorcycle brake systems.

Braking is one of the most difficult-to-control motorcycle manoeuvres. The rider's task of controlling two independently operable brake circuits is made more difficult by the latent risk of crashing a gyro-stabilised, two-wheeled vehicle. Other aggravating factors are the unfavourable ratio of height of centre of gravity to wheelbase which favours the risk of overturning when braking and the generally high brake forces even when applying only slight forces to the operating controls. Other chassis-dependent parameters such as the position of the pitching point influence the time sequence of wheel load shift during the initial phase of braking, a phase which is particularly important as regards achieving a short stopping distance.

The concept of the standard brake fitted on the majority of motorcycles, with separate operation of front-wheel brake and rear-wheel brake, has not changed since the start of the last century despite these unfavourable preconditions for the rider as the controlling factor. The task of this research project is to formulate requirements applicable to brake systems with which the motorcyclist can reproducibly achieve safe braking operations with short stopping distances. For this purpose, test persons were assigned braking tasks with the five different brake systems of standard and combined brake system with and without ABS in each case and ABS combined brake with single-lever operation, and the stopping distances achieved and loading and stress variables for the rider were recorded.

The tests indicate the following results: the stopping distances achieved are shorter with ABS than they are without ABS, which can be attributed primarily to the differences in the initial phase of a braking operation. The time taken during this initial phase increases disproportionately in the case of braking operations without ABS as a function of initial velocity. This also and primarily applies to braking when cornering. It was not possible to establish any significant difference between standard brake and combined brake. Operation of a combined brake with ABS and with only one brake lever shows no disadvantage by comparison with a conventional two-lever brake control system.

In the case of braking operations without ABS, the pulse rate which was used as the stress variable increased to a far greater extent than was the case

with braking operations with ABS. The muscle tone of the Flexor Digitorum Superficialis tendon, a stress variable, is far higher owing to the muscular tension associated with a higher mental stress in the case of braking operations without ABS than it is in the case of braking operations with ABS, as are other stress variables. The crashes which occurred during the tests occurred only in the case of braking operations without ABS, as was anticipated.

We can derive the following recommendations for future motorcycle brake systems: ABS should be used on all two-wheeled vehicles wherever possible. The ABS system may be designed as a defeatable system. One operating control suffices if an ABS combined brake system is fitted. This should be the handbrake control. An anti-overturning control for ABS brakes is required. Existing anti-overturning controls must be improved.

The original report includes the test for determining riding experience as an annex. We have dispensed with including this annex in this present publication. Details of the test are available and can be inspected at the Federal Highway Research Institute. We have retained references to the annex in the wording of the report.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	7
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Motorrad- bremsung</b> .....	7
2.1	Konstruktiv mögliche Verzögerung .....	7
2.1.1	Geradeausbremsung .....	7
2.1.2	Kurvenbremsung .....	8
2.2	Dynamische Radlastverteilung .....	9
2.2.1	Vollbremsphase .....	9
2.2.2	Initialphase der Bremsung .....	10
<b>3</b>	<b>Belastung und Beanspruchung</b> .....	11
<b>4</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	11
4.1	Begriffsbestimmung .....	11
4.2	Historie .....	12
4.2.1	Kombinationsbremssysteme .....	12
4.2.2	ABS-Systeme .....	13
4.3	Gesetzgebung .....	13
<b>5</b>	<b>Versuche</b> .....	13
5.1	Hypothesen .....	13
5.2	Versuchsaufbau .....	14
5.3	Messtechnik .....	16
5.3.1	Versuchsfahrzeug .....	16
5.3.2	Ermittlung der Belastung und Beanspruchung .....	19
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	20
6.1	Bremsleistungen .....	20
6.1.1	Phasen einer Bremsung .....	20
6.1.2	Gesamtbetrachtung der Bremsung .....	20
6.1.3	Vollbremsphase der Bremsung .....	21
6.1.4	Initialphase der Bremsung .....	21
6.1.5	Bedienkonzept .....	22
6.2	Belastung und Beanspruchung .....	23
6.3	Übertragbarkeit der Ergebnisse .....	24
6.4	Anforderungen an zukünftige Krafradbremssysteme .....	25
6.4.1	Blockierschutz .....	25
6.4.2	Bremskraftverteilung .....	26
6.4.3	Bedienkonzept .....	27
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	28
<b>8</b>	<b>Danksagungen</b> .....	28
<b>9</b>	<b>Literatur</b> .....	29

## Verwendete Abkürzungen

$\mu_0$	Reibbeiwert	$l_v$	Horizontaler Abstand des Fahrzeugschwerpunkts vom vorderen Radaufstandspunkt
$\mu_{\text{gleit}}$	Gleitreibbeiwert	$L_v$	Längspol der Vorderradföhrung
$\mu_l$	Reibbeiwert in Längsrichtung	$m$	Masse, Lenkrollhalbmesser
$\mu_q$	Reibbeiwert in Querrichtung	$\text{mad}$	Mean absolute deviation (mittlere absolute Abweichung)
$\lambda_{\text{ges}}$	Tatsächlicher Winkel der Fahrzeugmittebene zum Globalsystem	$\text{max}$	Maximum
$\lambda_{\text{th}}$	Theoretischer (physikalisch notwendiger) Rollwinkel	$\text{min}$	Minimum
$\lambda'$	Reifenbreitenbedingter Zusatzrollwinkel	$r$	Radius
25p	25. Perzentil; 1. Quartil	$\text{Res}$	Resultierende Kraft
75p	75. Perzentil; 3. Quartil	$S$	Schwerpunkt
$a$	Abbremsung	$\text{SGT}$	Durchschnittliche volkswirtschaftliche Kosten eines im Straßenverkehr getöteten Motorradfahrers
ABS	Antiblockiersystem	$\text{SSV}$	Durchschnittliche volkswirtschaftliche Kosten eines im Straßenverkehr schwer verletzten Motorradfahrers
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen	$\text{SV}$	Anzahl der jährlich im Straßenverkehr schwer verletzten Motorradfahrer
CBS	Combined Braking System – Kombinationsbremssystem	$t$	Zeit
$D$	Nickpol	$t_a$	Ansprechzeit der Bremse
EKG	Elektrokardiografie	$t_s$	Schwellzeit der Bremse
EMG	Elektromyografie	$t_v$	Vollbremszeit
$F_B$	Bremskraft	$v_{hi}$	Hinterradgeschwindigkeit
$F_{B,h}$	Bremskraft hinten	$\text{VR}$	Vorderrad
$F_{B,v}$	Bremskraft vorne	$v_{vo}$	Vorderradgeschwindigkeit
$F_R$	Reibkraft	$\ddot{x}$	Beschleunigung in Fahrzeug-x-Richtung
FTE	Fahrzeugtechnik Ebern Automotive GmbH		
$F_S$	Seitenkraft		
fzd	Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt		
$g$	Erdbeschleunigung		
$G$	Gewichtskraft		
$G_h$	Radlast hinten		
GPS	Global Positioning System		
GT	Anzahl der jährlich im Straßenverkehr getöteten Motorradfahrer		
$G_v$	Radlast vorne		
HR	Hinterrad		
$h_S$	Höhe des Fahrzeugschwerpunkts über dem Boden		
$H_{SF}$	Herzschlagfrequenz		
$l$	Radstand		
$l_h$	Horizontaler Abstand des Fahrzeugschwerpunkts vom hinteren Radaufstandspunkt		
$L_h$	Längspol der Hinterradföhrung		

## 1 Einleitung

Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat das Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt (fzd) damit beauftragt, die Bremsung des Motorradfahrers mit verschiedenen Kraftradbremssystemen zu untersuchen.

Die Bremsung ist eines der am schwierigsten zu beherrschenden Motorradfahrmanöver. Dem Fahrer als Regler zweier unabhängig voneinander bedienbarer Bremskreise wird die Regelaufgabe zusätzlich erschwert durch die latente Sturzgefahr eines kreiselstabilisierten Einspurfahrzeugs, das ungünstige, die Gefahr eines Bremsüberschlags begünstigende Verhältnis von Schwerpunkthöhe zu Radstand und nicht zuletzt die hohen Bremskräfte bereits bei niedrigen Bedienkräften. Weitere fahrwerkabhängige Parameter wie die Lage des Nickpols beeinflussen den zeitlichen Ablauf der Radlastverschiebung während der für die Erzielung eines geringen Bremswegs besonders wichtigen Anfangsphase der Bremsung.

Trotz dieser für den Fahrer als Regler ungünstigen Voraussetzungen hat sich am Grundkonzept der im größten Teil der Motorradpopulation verbauten Standardbremse mit getrennter Bedienung von Vorderrad- und Hinterradbremse seit Beginn des letzten Jahrhunderts nichts geändert. Aufgabe der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, Anforderungen an Bremssysteme, mit denen der Motorradfahrer sichere Bremsungen mit kurzen Bremswegen reproduzierbar erreichen kann, zu formulieren.

## 2 Grundlagen der Motorradbremsung

### 2.1 Konstruktiv mögliche Verzögerung

#### 2.1.1 Geradeausbremsung

Die Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Fahrbahn zur Übertragung auch der längsdynamisch relevanten Kräfte stellt der Reifen dar. Frühere Untersuchungen von fzd im Auftrag der BASt ergaben, dass moderne Motorradreifen in Abhängigkeit von der Fahrbahnoberfläche Reibbeiwerte bis 1,5 aufbauen können [SCHMIEDER 1994]. Weiterhin ist der Reifeninnendruck über einen sehr weiten Bereich für den Aufbau von Längskräften irrelevant. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Reibbeiwerte während der vorliegenden Untersuchung zwischen 0,6 und 0,8 lagen, je nach Fahr-

bahntemperatur. Über einen Versuchsdurchlauf kann die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche als konstant angenommen werden.

Die Fahrstabilität des motorisierten Zweirads in seiner Eigenschaft als Einspurfahrzeug hängt maßgeblich ab von der Kreiselwirkung des gelenkten Vorderrads. Es gilt unter der Voraussetzung gleicher Drehleistung, dass die kreiselstabilisierenden Wirkungen von Vorderrad zu Hinterrad sich umgekehrt proportional zum Verhältnis der Nachläufe von Vorder- und Hinterrad verhalten.

Die kreiselstabilisierenden Kräfte der sich drehenden Teile des Antriebsstrangs heben sich durch entgegengesetzte Drehrichtungen teilweise gegenseitig auf und haben einen nur sehr kleinen Anteil an der Kreiselstabilisierung. Für Motorräder gilt somit, dass der Anteil des Vorderrads an den stabilisierenden Kreiselkräften zwischen ca. 85 % und über 90 % liegt. Bei einer Vorderradblockade, wie sie durch ein zu großes, vom Fahrer eingesteuertes Bremsmoment vorliegen kann, fallen außer der beschriebenen stabilisierenden Wirkung auch die Seitenführungskräfte am blockierten Rad weg. Ein Sturz kann nur schwerlich vermieden werden [BREUER 2001].

Die konstruktiv vorgegebene und von der Fahrer-masse, der Sitzposition des Fahrers und der Beladung des Fahrzeugs beeinflusste Lage des Gesamtschwerpunkts trägt entscheidend zur theoretisch möglichen Abbremsung des Motorrads bei, s. Bild 1. Die Berechnung der konstruktiv vorgegebenen maximalen Verzögerung errechnet sich zu:

$$a_{abheb} \approx g \cdot \frac{l_v}{h_s} \quad (1)$$

Durch einen weit vorne oben liegenden Schwerpunkt wird der Bremsüberschlagpunkt hin zu niedrigeren Verzögerungen verschoben. Für die meisten modernen Motorräder ist dies die ausschlaggebende physikalische Grenze bei der Erzielung hoher Abbremsungen auf griffiger, trockener Fahrbahn. Diese Grenze liegt bei der Versuchskonstellation ohne Berücksichtigung des Nickvorgangs bei ca. 12,6 m/s<sup>2</sup>.

Der Nickvorgang beim Bremsen resultiert vornehmlich aus der Abstützung eines Teils der Massenträgheit des abgebremsten Fahrzeugs über Feder- und Dämpferelemente sowie der aufgebrachten Bremsmomente. Dabei ist aufgrund des ungleich höheren Anteils der Bremsmomente die Betrachtung der Vorderradföhrung relevant. Bei

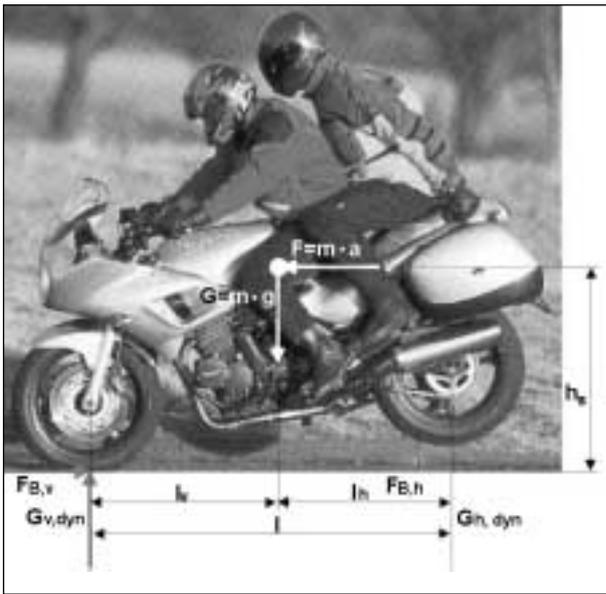


Bild 1: Konstruktiv mögliche Verzögerung [Foto: ZS MO]

Standard-Fahrwerkskonfigurationen mit Telegabel als Vorderradföhrung und gezogener Schwinge hinten spielt das vordere Bremsmoment praktisch keine Rolle, da dies kinematisch abgestützt wird. Die Abstützung der trägen Massen hingegen erfolgt durch den in der Regel negativen kinematischen Bremsnickausgleich konventioneller Fahrwerke überproportional über die Feder-/Dämpfer-Elemente. Das verwendete Versuchsfahrzeug BMW R1150RT besitzt eine mittels Längslenker abgestützte Linearföhrung als Vorderradföhrung (BMW Telelever), mit der je nach konstruktiver Auslegung und aktueller Schwerpunktlage ein vollständiger Bremsnickausgleich realisiert werden kann. Beim Versuchsmotorrad wird diese Möglichkeit zur Vermeidung überkompensierender Effekte, das bedeutet eines Bremsnickausgleichs größer 1, nicht voll ausgeschöpft. Die Abstützung des vorderen Bremsmoments erfolgt über einen großen Hebelarm, so dass dessen Einflüsse auf das Nicken gering sind. Einen Vergleich der Vorderradföhrungssysteme zeigt Bild 2.

Bei einer Bremsung an der Grenze zum Bremsüberschlag kann der Bremsweg verkürzt werden durch eine Umsetzung der kinetischen Energie in Lageenergie. Setzt man diese Energiearten gleich, so ergäbe sich bei üblichen  $l_v$  von ca. 750 mm und  $h_s$  von ca. 700 mm sowie den dann gültigen Grenzverzögerungen in der Größenordnung von  $12 \text{ m/s}^2$  eine Bremswegverkürzung von ca. 80 cm – gemessen an den Bremswegverkürzungsmöglichkeiten am Anfang einer Bremsung ein eher marginaler Wert, der in der Praxis nicht annähernd erreicht

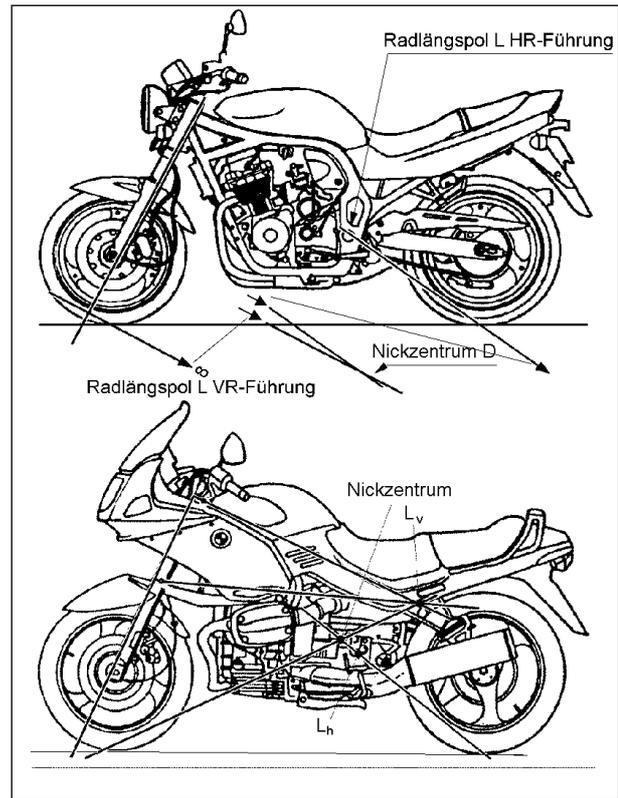


Bild 2: Vergleich der Nickpollagen zwischen Standardfahrwerk mit Telegabel (oben) und Telelever (unten), eingezeichnete Konstruktionslinien zur Momentanpolbestimmung der Radföhrungen

werden dürfte. Ein ABS mit Überschlagerkennung erlaubt diese zusätzliche kleine Bremswegverkürzung nicht.

### 2.1.2 Kurvenbremsung

Die für die Geradeausbremsung gemachten Aussagen gelten prinzipiell auch für die Kurvenbremsung, jedoch meist in verschärfter Form. So hat das Bremsnicken Einfluss auf die konstruktiv vorgegebene Schräglagenfreiheit. [PRÄCKEL 1996] berichtet von Motorradfahrern, die zur Erhöhung der Schräglagenfreiheit mit sowohl abgebremstem als auch mit Antriebsmoment beaufschlagtem Motorrad die kinematischen Effekte nutzend die Schräglagenfreiheit erhöhen.

Zudem wird mit durch den Bremsvorgang ausgelösten Radlastverschiebungen in gleichem Maße auch das Querkraftangebot an den Rädern und somit das Eigenlenkverhalten (unter-/übersteuern) beeinflusst. Durch die im Vergleich zum Pkw großen Radlastverschiebungen während des Bremsvorgangs und den geringen Radstand eines Motorrads wiegt dieser Effekt fahrdynamisch schwerer als bspw. beim Pkw.

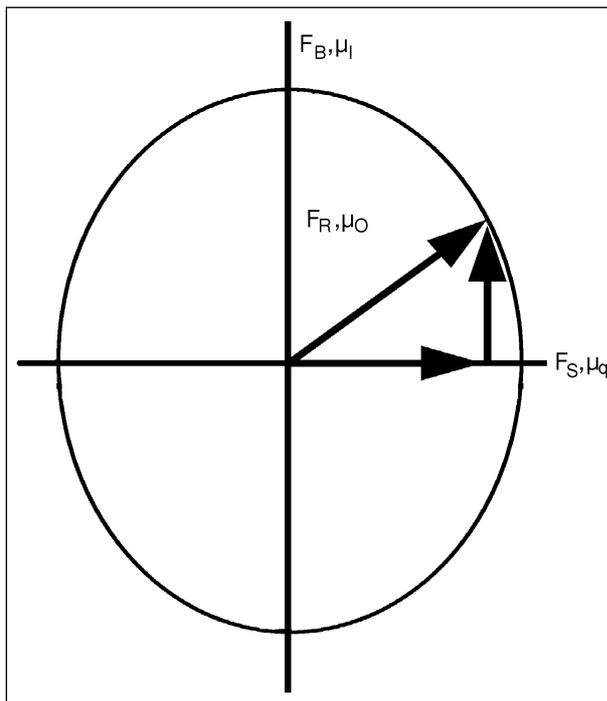


Bild 3: Kammscher Kreis

Der Kammsche Kreis, s. Bild 3, beschreibt idealisiert die vektorielle Aufteilung zwischen Längs- und Querkräften im Reifenlatsch. Über die Bremsung hinweg wird also unter der Annahme eines konstanten Kurvenradius die Geschwindigkeit und damit die benötigte Querkraft abgebaut, der einzustellende Rollwinkel verringert sich, und die Bremskraft kann erhöht werden, wodurch sich die dynamischen Radlasten verändern usw., bis die Kurvenbremsung sich gegen Ende des Vorgangs der Geradeausbremsung annähert, s. Bild 4.

Durch den bei Kurvenfahrt zum Aufbau der Seitenkräfte notwendigen Rollwinkel kommt es an den Reifen zu einer Auswanderung des Reifenaufstandspunkts, s. Bild 5. Der Kraftschwerpunkt im Reifenlatsch besitzt somit einen bei Geradeausfahrt nicht vorhandenen Hebelarm zur Lenkachse, der zusammen mit den Bremskräften an Vorder- und Hinterrad ein so genanntes Bremslenkmoment erzeugt. Kompensiert der Fahrer dieses Zusatzlenkmoment nicht von Beginn der Bremsung an ideal, so wird das Motorrad durch den vom Bremslenkmoment induzierten, den Lenker eindrehenden Differenzlenkwinkel aufgerichtet, wodurch der vorgesehene Kurvenradius verlassen wird hin zu größeren Kurvenradien. Umgekehrt kann beim so genannten „Hineinbremsen“ in die Kurve, welches den Aufbau eines Rollwinkels zur Einleitung einer Kurvenfahrt mit anliegendem Bremsmoment bezeichnet, der plötzliche Abfall des Bremsmoments

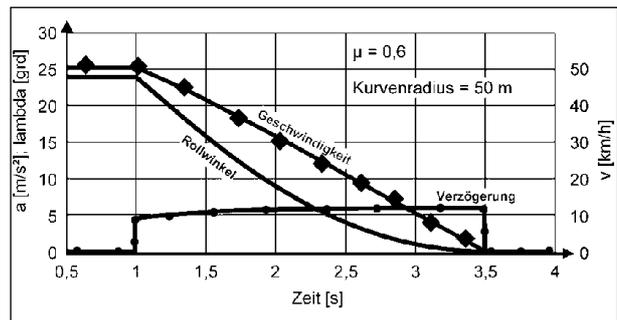


Bild 4: Beispiel einer idealisierten Kurvenbremsung

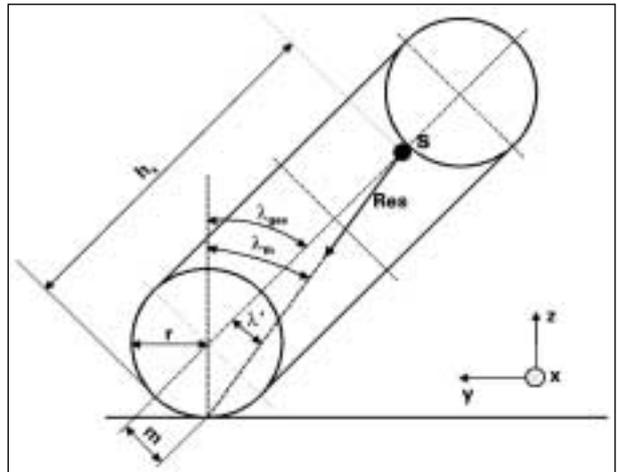


Bild 5: Auswanderung des Reifenaufstandspunkts bei Kurvenfahrt [WEIDELE 1994]

am Vorderrad ohne gleichzeitige Lenkmomentkompensation durch den Fahrer aufgrund des dann induzierten zusätzlichen Rollwinkels zur Erschöpfung der konstruktiv vorgesehenen Schräglagenfreiheit und damit meist zum Sturz führen.

## 2.2 Dynamische Radlastverteilung

### 2.2.1 Vollbremsphase

In der Phase eingeschwungener dynamischer Radlasten, des Weiteren als Vollbremsphase bezeichnet, gelten einfache Zusammenhänge aus der technischen Mechanik, s. Bild 1. Die Aufstellung des Momentengleichgewichts um den Aufstandspunkt des Vorderrads ergibt:

$$G_h = m \cdot \frac{l_v \cdot g - h_s \cdot \ddot{x}}{l} \quad (2)$$

Die Betrachtung des Kräftegleichgewichts in Fahrzeug-z-Richtung

$$m \cdot g = G_h + G_v \quad (3)$$

ergibt dem entsprechend:

$$G_h = m \cdot \frac{l_v \cdot g - h_s \cdot \ddot{x}}{l} \quad (2)$$

### 2.2.2 Initialphase der Bremsung

Zu Beginn der Bremsung muss die statische Radlastverteilung in die oben beschriebene quasistatische Radlastverteilung in der Vollbremsphase überführt werden. Hier hat die Kinematik der Vorderradföhrung über die mit der aus ihr resultierenden Festlegung der Lage des Nickpols einen entscheidenden Einfluss auf die Zeitspanne des Aufbaus der dynamischen Radlasten. Kräfte, die nicht durch die Kinematik abgestützt werden, müssen von den Feder-/Dämpfer-Systemen aufgenommen werden. Deshalb können sich ein Nickwinkel und damit die dynamischen Radlasten nur allmählich über der Zeit aufbauen [WEIDEL 1994].

Mit dieser dynamischen Veränderung müsste unter der Zielsetzung eines möglichst kurzen Bremswegs die Verteilung der Bremsmomente nachgeführt werden. Diese dynamische Variation der Bremsmomente ist von der Lage des Nickpols und des Schwerpunkts eines Fahrzeugs abhängig, deren Lage im fahrzeugfesten Bezugssystem sich meist in Abhängigkeit vom Nickwinkel und den Einfederungen von Vorder- und Hinterrad und somit von den Radlasten ändert. So ergibt sich für jeden Zeitpunkt der Bremsung eine ideale Bremskraftverteilung, die abhängig von den fahrzeugfesten Koordinaten von Schwerpunkt und Nickpol ist. Unter der Annahme, dass die Summe der Radlasten jederzeit konstant sei (was sie auch auf ideal ebener Fahrbahn nicht ist), gilt die Konstanz der Abbremsung. Die zeitliche Verteilung des theoretischen Bestpunkts im Bremskraftverteilungsdiagramm unter der Voraussetzung der konstanten Abbremsung ist vorrangig abhängig vom Verhältnis der Lagen des Nickpols und des Schwerpunkts zueinander, dem kinematischen Bremsnickausgleich. Für den Fall eines kinematischen Bremsnickausgleichs von Null ist die ideale Bremskraftverteilungskurve im ersten Moment einer Bremsung gleich der Geraden, die die statische Radlastverteilung beschreibt. In Bild 6 ist dieser Fall zusammen mit den sich aus einem Standardfahrwerk und in Bild 7 zusammen mit dem Fahrwerk des Versuchsmotorrads ergebenden Anfangsbremskraftverteilungskurven qualitativ dargestellt. Es geht hervor, dass wie in [WEIDEL 1994] beschrieben die Radlast des Vorderrads bei einem Motorrad mit Stan-

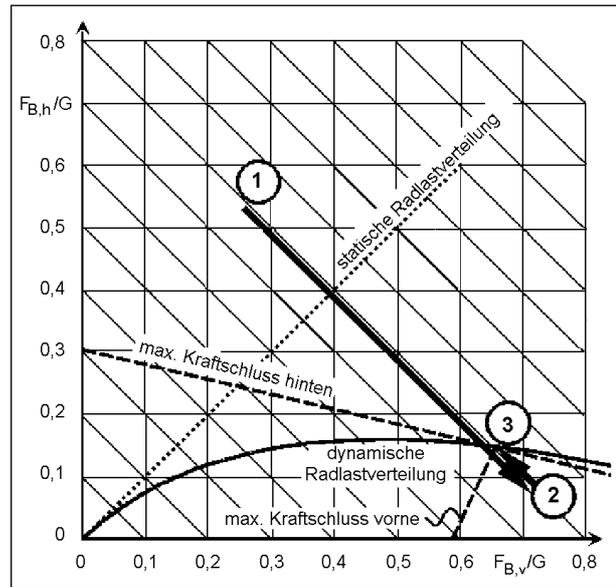


Bild 6: Ideale Bremskraftverteilung in der Initialphase einer Bremsung, Standardfahrwerk

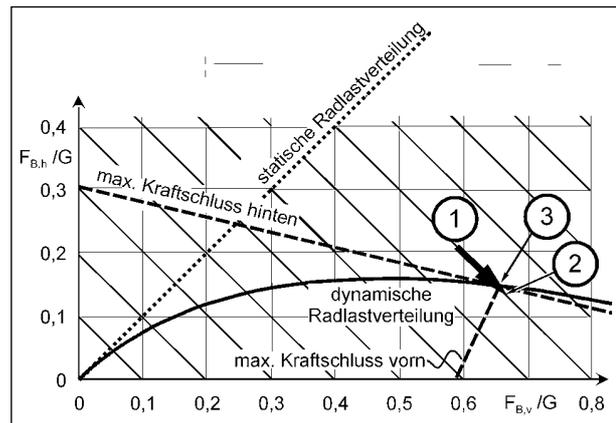
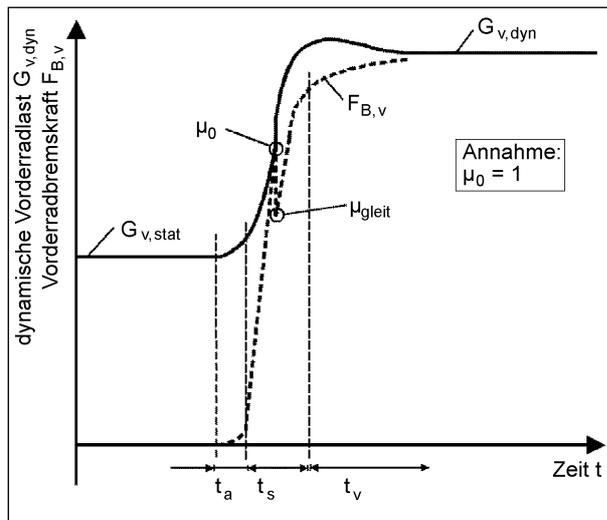


Bild 7: Ideale Bremskraftverteilung in der Initialphase einer Bremsung, Fahrwerk des Versuchsmotorrads (BMW Telelever)

dardfahrwerk bei Bremsbeginn zunächst abnimmt (1). Weiterhin wird deutlich, dass das Überschwingen der Radlasten (2) beim Standardfahrwerk ausgeprägter ist und somit eine ABS-Regelung gegenüber einem Fahrwerk mit kinematischer Bremsmomentenabstützung erschwert wird. Punkt (3) kennzeichnet den eingeschwungenen Zustand.

Der Aufbau der nachzuföhrnden Bremsmomente kann selbst von dem relativ langsam agierenden Steller Mensch schneller realisiert werden als der Aufbau der dynamischen Radlasten vonstatten geht; die daraus folgende Radblockade ist als dynamische Vorderradüberbremsung bekannt [WEIDEL 1994], s. Bild 8: nach Ablauf der Ansprechzeit  $t_a$  der Bremse geschieht der Bremskraftaufbau während der Schwellzeit  $t_s$  mit einem deutlich



**Bild 8:** Prinzip der dynamischen Vorderradüberbremsung [WEI-DELE 1994]

höheren Gradienten als der Anstieg der Vorderradlast, der durch die endlichen Geschwindigkeiten des Aufbaus von Nickgeschwindigkeit und Nickbeschleunigung begrenzt wird. Am Punkt der Überschreitung des Kraftschlusses zwischen Reifen und Straße – die Vorderradlast ist noch unterhalb des Wertes, den sie im eingeschwungenen Zustand einnimmt – läuft das Rad in die Blockade, der Reibwert sinkt somit auf den Gleitreibwert ab. Durch die Nickträgheit baut sich weiterhin Radlast am Vorderrad auf, so dass, eine konstante Bremskräfteingabe durch den Fahrer vorausgesetzt, das Rad wieder zu rollen beginnt. In der Praxis wird die letzte Bedingung meist nicht erfüllt, so dass ein Sturz unausweichlich ist.

Verschärft wird die dargestellte Problematik durch Fahrsituationen, in denen das Vorderrad entlastet ist; dies geschieht bspw. bei hohen Geschwindigkeiten durch die in endlicher Höhe angreifenden Luftwiderstandskräfte oder während der Beschleunigung durch die Massenträgheiten jeweils im Zusammenspiel mit dem anliegenden Nabenmoment.

### 3 Belastung und Beanspruchung

Die physische Belastung des Motorradfahrers während des Bremsvorgangs resultiert vor allem aus den beschleunigten Massen des Fahrers und der sich an ihm abstützenden Massen wie bspw. Kleidung, ein Rucksack oder auch ein Sozius. Der Fahrer stützt diese Massenkräfte an den Ankopplungspunkten zum Motorrad ab. Hier sind die Fläche zwischen Sitz und Gesäß des Fahrers zu

nennen und die zwischen Knien und Tank sowie die Ankopplungspunkte der Füße auf den Fußrasten und der Hände am Lenker. Obwohl betragsmäßig nicht die größten, so sind doch die von den Händen des Fahrers auf den Lenker ausgeübten Kräfte von besonderer Bedeutung bezüglich der Beanspruchung des Fahrers. Aus arbeitswissenschaftlicher Sicht ist der Belastungstyp für den Fahrer während einer Verzögerung des Motorrads an den Grenzen der Physik schwere Haltearbeit [LANDAU 1992]. Die physische Belastung ist zunächst unabhängig vom Bremssystem intraindividuell als gleich anzunehmen und interindividuell durch Körpermasse und -maße sowie bevorzugte Sitzhaltung bestimmt. Durch unterschiedliche mentale Beanspruchung kann es jedoch intra- und interindividuell unterschiedlich zu muskulären Anspannungen des Körpers kommen [SPIEGEL 1998], die somit eine zusätzliche Belastung induzieren können. Die körperliche Beanspruchung des Fahrers ist eine Funktion der Konstitution und somit um Größenordnungen langfristigeren Veränderungen unterworfen, als die Versuchsdauer umfasst. Sie äußert sich zum Beispiel im EMG.

Die mentale Belastung des Fahrers wird bestimmt von dem scheinbaren, vom Fahrer wahrgenommenen und somit antizipierten Reibbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn im Zusammenspiel mit dem Wissen des Fahrers um die Eigenschaften des Bremssystems hinsichtlich zumindest seiner Blockierneigung. Dies spielt bereits in die mentale Beanspruchung des Fahrers ein, da dieser ein Bild von der Funktion des ihm in der Einstellung bekannten Bremssystems hat und dies ebenso wie der scheinbare Reibbeiwert interindividuell unterschiedlich bewertet werden könnte. Diese Bewertung hängt entscheidend von den gemachten Erfahrungen des Fahrers im umgangssprachlichen Sinne nach [ECHTERHOFF 1992] ab. Die mentale Beanspruchung des Fahrers wird nach den oben gemachten Feststellungen ausschlaggebend sein für messbare Körperreaktionen wie bspw. EKG.

## 4 Stand der Technik

### 4.1 Begriffsbestimmung

Der Begriff der Standardbremse ist definiert als zwei voneinander unabhängige Bremskreise, von denen der eine von der Hand bedient das Vorderrad, der andere vom Fuß bedient das Hinterrad abbremsst. Eine Variation ist bei Motorrollern mit Auto-

matgetriebe zu finden, bei der die eine, meist rechte mit der Hand zu betätigende Bedieneinrichtung auf das Vorderrad und die andere, ebenfalls zur Handbedienung ausgelegte Bedieneinrichtung auf das Hinterrad wirkt.

Als Kombinationsbremsanlage wird eine Bremsanlage bezeichnet, bei der mindestens eine der beiden Betätigungseinrichtungen auf beide Räder wirkt. Die Bremskraftverteilung ebenso wie die Art der Verknüpfung zwischen Bedieneinrichtungen und Bremsen kann dabei variieren.

## 4.2 Historie

Einen guten Überblick über die Entwicklungsgeschichte der Motorradbremse gibt [WEIDEL 1994]. Für die hier vorgestellte Arbeit relevante Daten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Hervorgehoben sei die Serieneinführung der Scheibenbremse durch Honda 1969, wodurch die Selbstverstärkung der Bremse unabhängig wurde vom Reibwert zwischen Bremsbelag und Scheibe [BREUER 2001]. Hinzugefügt sei die serienmäßige Einführung einer technisch einfachen Kombinationsbremsanlage 1975 durch Moto Guzzi [COLOMBO 1989, WALKER 1994], bei dem der Fußhebel auf die Bremsscheibe am Hinterrad sowie auf eine der beiden Bremsscheiben am Vorderrad wirkt, während der Handbremshebel auf die zweite Bremsscheibe am Vorderrad wirkt. Auch andere Hersteller haben dieses weit verbreitete Kombinationsbremssystem verwendet und verwenden es heute noch, so beispielsweise auch Honda unter der Bezeichnung Single-CBS.

Zu Beginn des Jahres 2003 haben neben BMW und Honda Ducati, Peugeot und Yamaha je mindestens ein Modell mit ABS im Angebot.

1969	Scheibenbremse serienmäßig (Honda CB 750)
1975	Kombinationsbremsanlage serienmäßig (Moto Guzzi 750 S3 und T3 California)
1988	ABS (BMW K 100 LT, ABS I)
1993	Längslenkergeführte Telegabel (BMW R 1100 RS, Telelever)
1995	ABS serienmäßig (BMW R 1100 RT)
1996	Kombinationsbremsanlage mit ABS (Honda ST 1100)
2000	Kombinationsbremsanlage mit ABS und Hilfsbremskraft (BMW K 1200 LT)
2001	Gesamte Modellpalette eines Herstellers mit ABS lieferbar (BMW)
2002	Kombinationsbremsanlage mit blockiergeschütztem Vorderrad (Peugeot Elystar)

Tab. 1: ABS und Kombibremse – historische Stationen

### 4.2.1 Kombinationsbremssysteme

Zu Beginn des Jahres 2003 sind mehrere Arten von Kombinationsbremssystemen gebräuchlich. Die oben bereits beschriebene Bedienung einer der beiden vorderen Scheibenbremsen mit dem Fußbremshebel ist mit geringem technischen Aufwand verbunden.

Ähnlich aufgebaut ist die mit einem blockiergeschützten Vorderrad ausgestattete Kombibremse, die von FTE unter dem Markennamen CORA vertrieben wird. Die Bremskraftverteilung ist jedoch stets so gewählt, dass das blockiergeschützte Vorderrad überbremst ist.

Beim so genannten Honda Dual-CBS wirken beide Bremshebel mit jeweils einer eigenen Bremskraftverteilung auf Vorder- und Hinterrad. Dabei wirkt die Betätigung des Handbremshebels auf das Vorderrad überbremsend, d. h., die Bremskraftverteilung liegt unterhalb der idealen Bremskraftverteilung. Umgekehrt wirkt die Betätigung des Fußbremshebels auf das Hinterrad überbremsend. Dabei sind verschiedene Beladungszustände berücksichtigt. Zur Funktionsweise: Der am Handbremshebel eingesteuerte Bremsdruck betätigt die äußeren der drei Kolben der vorderen Bremssättel. Das Bremsmoment eines der vorderen Bremssättel ist über einen dritten Geberzylinder abgestützt. Dieser steuert über ein so genanntes Proportionalventil die äußeren Kolben des hinteren Bremssattels an. Wird die Fußbremse betätigt, so werden die mittleren Kolben der drei Bremssättel mit Druck beaufschlagt. Wie oben beschrieben beaufschlagt der durch einen der vorderen Bremssättel betätigte Geberzylinder über das besagte Proportionalventil die äußeren Kolben des hinteren Bremssattels. So wird nicht nur eine durch das Proportionalventil sowie die geometrischen Eigenschaften der Bremsanlage und der Räder vorgegebene Bremskraftverteilung erreicht, sondern die Bremskraft wird zur Bremsdruckverstärkung genutzt.

Das von FTE unter dem Handelsnamen CORA BB vertriebene und zuerst bei BMW verbaute Kombinationsbremssystem verteilt die Bremskräfte auf elektronischem Wege. Die für die ABS-Regelung zuständigen Aktoren wirken gegen die von der Hand beziehungsweise dem Fuß aufgebrachten Bremsdrücke. Zum „Erlernen“ der jeweils gültigen Bremskraftverteilungskurve durch das System ist eine ABS-Regelung notwendig.

### 4.2.2 ABS-Systeme

Auf dem Markt befindliche Motorrad-ABS-Systeme lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien unterteilen:

- Funktionsweise,
- Rückmeldung an den Fahrer und
- Überschlagsicherung.

Bezüglich der Funktionsweise werden drei Arten von ABS im Motorrad verbaut:

- Druckregelung über Magnetventile,
- Druckregelung über Volumenvariation mittels Plunger und
- hilfskraftbetätigte ABS.

Aufgrund der Funktionsweise geben ABS-Systeme teilweise Rückmeldung über Bremshebel pulsationen an den Fahrer.

Ein für die Sicherheit entscheidender Punkt ist die Sicherung gegen einen Bremsüberschlag. Bei Motorrädern kann es wie im Kapitel 2.1 beschrieben aufgrund der Schwerpunkt lage und des hohen Kraftschlussangebots zwischen Reifen und Fahrbahn zu einem Bremsüberschlag kommen. Die meisten ABS-Systeme haben eine softwareseitige Überschlagsicherung, die im Fall eines abhebenden Hinterrads den Bremsdruck am Vorderrad senkt und so einen drohenden Überschlag verhindern soll. Bei derart gesicherten Standardbremsystemen kann durch Missbrauchshandlungen die Überschlagsicherung umgangen werden. Teilweise wird diese Überschlagsicherung ergänzt um eine Begrenzung der möglichen Verzögerung.

## 4.3 Gesetzgebung

Die aktuell gültige Gesetzgebung zum Thema Motorradbremsen ist in der Richtlinie 93/14/EWG festgelegt: Motorradbremsen müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- Zwei voneinander unabhängige Bedienelemente für zwei voneinander unabhängige Betriebsbremsanlagen, wobei mindestens die eine auf das Vorderrad und die andere auf das Hinterrad wirkt,
- Gewährleistung einer mittleren Vollverzögerung mit beiden Bremsen von mindestens  $5,8 \text{ m/s}^2$  im beladenen Zustand,

- Gewährleistung einer mittleren Vollverzögerung von mindestens  $4,4 \text{ m/s}^2$  bei Betätigung nur der Vorderradbremse bzw.  $2,9 \text{ m/s}^2$  mit der Hinterradbremse jeweils im beladenen Zustand,
- Gewährleistung einer konstruktiv möglichen Verzögerung von  $2,5 \text{ m/s}^2$  im unbeladenen Zustand,
- bei Vorhandensein einer Kombibremse muss mit einer Betätigungseinrichtung eine mittlere Vollverzögerung von  $5,1 \text{ m/s}^2$  erreichbar sein, mit der anderen Betätigungseinrichtung  $2,5 \text{ m/s}^2$  jeweils im unbeladenen und voll beladenen Zustand.

Den Ausfall einer Hilfs- oder Fremdkraft sieht diese Richtlinie nicht vor.

Die Anforderungen an eine eventuelle ABS-Sicherung der Bremsen sind ebenfalls in der 93/14/EWG in der Anlage 2 festgeschrieben. Danach gilt für eine blockiergeschützte Bremse, dass im Fall einer ABS-Regelung 70 % der vom Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn her möglichen Verzögerung erreicht werden muss. Bei Ausfall des ABS gilt in Anlehnung an Anlage 1 eine Mindestverzögerung von  $2,9 \text{ m/s}^2$ .

Weitere Vorschriften spielen in die Gestaltung der Bremsanlage hinein, wie beispielsweise die Richtlinie 97/24/EG Kap. 3 Anh. I 6.2, nach der das Ende eines Bremshebels einen Abrundungsradius von mindestens 7 mm aufweisen muss. Die mechanische Auslegung der Bedieneinrichtungen hinsichtlich der Festigkeit wird dem Hersteller überlassen in Anlehnung an die Pkw-Bremsenrichtlinie 71/320/EWG.

In der Diskussion befindet sich eine weltweit einheitliche Regelung. Der wichtigste, die vorliegende Arbeit betreffende Unterschied zu bestehenden Vorschriften ist das Fehlen einer expliziten Forderung nach zwei Bedienelementen. Weitere Unterschiede zur bestehenden ECE-Regelung 78 sind Vorschriften bezüglich Schlamm- und Wasserdurchfahrten sowie Kontrollanzeigen in Anlehnung an FMVSS 122.

## 5 Versuche

### 5.1 Hypothesen

Zur Vorbereitung der Versuchsaufbauten wurden aufbauend auf bisherigen Erkenntnissen Hypothesen aufgestellt zu Bremsleistungen sowie Belas-

tung und Beanspruchung der Fahrer unter Variation der Parameter Versuchsaufgabenstellung und Art des Bremssystems:

- Auf trockener Fahrbahn sind die Bremswege von erfahrenen Fahrern mit allen Bremssystemen gleich lang,
- auf nasser Fahrbahn sind auch bei erfahrenen Fahrern die mit blockiergeschützten Bremsen erzielten Bremswege kürzer als die mit nicht blockiergeschützten Bremssystemen erzielten,
- auch erfahrene Fahrer erbringen mit blockiergeschützten Bremssystemen konstantere Bremswege als mit nicht blockiergeschützten,
- bei der Kurvenbremsung liegen theoretisch erzielbare und von den Versuchspersonen erzielte Bremsverzögerungen bei allen Bremssystemen am deutlichsten auseinander,
- die physische Beanspruchung der Fahrer ist bei allen Bremssystemen gleich,
- die psychische Beanspruchung der Fahrer ist bei Bremsungen mit nicht blockiergeschützten Bremsen höher als bei Bremsungen mit blockiergeschützten Bremsen,
- bei einem blockiergeschützten Kombinationsbremssystem hat die Anzahl der Bedienelemente keinen Einfluss auf die Bremsleistungen erfahrener Fahrer.

## 5.2 Versuchsaufbau

Von den Hypothesen abgeleitet wurde der Versuchsaufbau. Um Einflüsse jenseits der gebildeten Hypothesen minimieren zu können, wurden eventuelle, weitere Einflussgrößen so konstant wie möglich gehalten. Der Einfluss des Versuchsmotorrads wurde klein gehalten, indem ein und dasselbe Fahrzeug bei allen Fahrversuchen Verwendung fand. Im Versuchsfahrzeug sind folgende Bremssysteme realisiert:

- Standardbremsanlage,
- Kombinationsbremsanlage,
- Standardbremsanlage mit ABS,
- Kombinationsbremsanlage mit ABS,
- Kombinationsbremsanlage mit ABS und nur einem Bedienelement (Handbremshebel).

Näheres beschreibt das Kapitel 5.3.1. Alter und Geschlecht wurden insofern konstant gehalten, als

dass die Fahrer aus der Gruppe der männlichen, jungen Fahrer gewählt wurden.

Versuche bezüglich der Wechselwirkungen zwischen der Art des Bremssystems und der Fahrweise und der Bremsleistungen von Motorradfahrern im öffentlichen Straßenverkehr durchzuführen ist aufgrund der Realitätsnähe Versuchen auf abgesperrtem Versuchsgelände vorzuziehen [PRÄCKEL 1999]. Allerdings ist eine statistisch relevante Anzahl an Bremsungen nur durch eine exzessive Fahrversuchsgesamtdauer erreichbar. [SCHELL 2002] erklärt Untersuchungen kritischer Situationen im Straßenverkehr als nicht praktikabel. So kommt es nur selten zu einer verkehrsinduzierten Vollbremsung. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen dem Willen und dem Können des Fahrers schwierig, wenn nicht gar unmöglich.

Aus diesen Überlegungen heraus und aus Sicherheitsgründen wurden Fahrversuche auf abgesperrtem Gelände durchgeführt. Zur Beurteilung der Bremsleistungen der Versuchsfahrer mit den verschiedenen Bremssystemen wurde die Vollbremsung in Geradeausfahrt als am geeignetsten befunden. Nach [ASSING 2002] findet die Überzahl der Motorradunfälle auf Landstraßen statt. Daher und zur Niedrighaltung der kinetischen Energien wurden die Ausgangsgeschwindigkeiten zu 60 km/h und 90 km/h gewählt.

Bezüglich der Kurvenbremsung wird diese als eine der größten Herausforderungen des Fahrers beim Motorradfahren beschrieben [WEIDELE 1994, PRÄCKEL 1999, TOYOFUKU 1994]. ABS kann dabei helfen; in der Literatur wird jedoch oft beschrieben, dass die Blockiersicherung bei größeren Rollwinkeln unter Umständen eine zum Sturz ausreichend lange Radblockade nicht verhindern kann bzw. es zu Lenkmomentschwankungen aufgrund der Bremsmomentschwankungen vor allem am Vorderrad kommt [WEIDELE 1994, PRÄCKEL 1999]. Daher wurde eine Kurvenbremsung mit in das Versuchsprogramm aufgenommen. Der durch die Ausgangsgeschwindigkeit und den Kurvenradius vorgegebene Rollwinkel beträgt dabei ca. 20°. Dies ist eine dem Menschen aus der Erfahrung von natürlichen Vorgängen her bekannte Grenze [SPIEGEL 1998]. Sie wurde gewählt, da auch unerfahrene oder ängstliche Versuchspersonen diese Übung zu absolvieren in der Lage sein sollten. Die Ausgangsgeschwindigkeit wurde aus dem Kompromiss aus möglichst niedrigen kinetischen Energien und einem gut fahrbaren Kurvenradius weit genug jen-

seits der Selbststabilisierungsgrenzgeschwindigkeit des Motorrads gebildet und beträgt 50 km/h.

Bild 9 zeigt die Lage der Versuchsstrecken auf dem Testgelände der TU Darmstadt.

Auf Vorversuche mit Zielbremsungen zur objektiven Beurteilung der Dosierbarkeit eines Bremssystems wurde mangels eines harten Beurteilungskriteriums verzichtet.

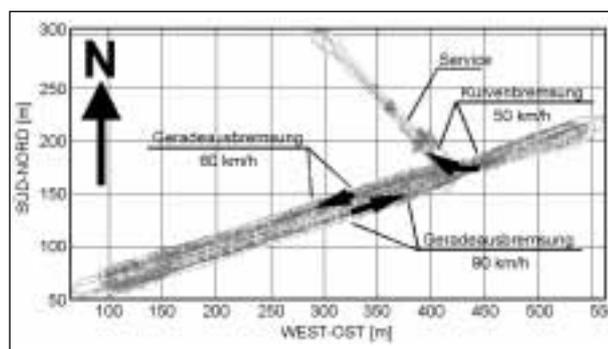
In Vorversuchen wurde bestimmt, dass die Versuchspersonen ihr Lernplateau nach sechs aufeinander folgenden Bremszyklen erreicht hatten. So konnte die Anzahl der Versuchsdurchführungen pro Bremssystem und Versuch auf sieben beschränkt werden.

Die Versuchsfolge wurde so festgelegt, dass der Fahrer nach dem Sichvertrautmachen mit dem Fahrzeug zunächst eine Vollbremsung aus 60 km/h bis zum Stillstand, dann eine aus 90 km/h bis zum Stillstand durchführte. Anschließend wurde die Kurvenbremsung unter den oben genannten Parametern durchgeführt. Dies wiederholte die Versuchsperson besagte sieben Mal.

Die Reihenfolge der Bremssysteme wurde zur Vermeidung von Artefakten, wie in Tabelle 2 beschrieben, durchpermutiert. Die Permutationen gewährleisten, dass sich weder die Position eines Bremssystems innerhalb der Versuchsabfolge noch eine Abfolge zweier Bremssysteme wiederholt.

Hinsichtlich der Fahrbahnoberfläche wurde eine nasse Betonasphaltfahrbahn gewählt. Der Reibwert von ca. 0,8 bedingt ein mit bremsendes Hinterrad zur Erzielung optimal kurzer Bremswege. Weiterhin gilt die Bremsung auf optisch nasser Fahrbahn als besondere fahrerische Herausforderung. Dabei wird die Annahme zugrunde gelegt, dass die tatsächliche Wasserstandshöhe wenig relevant ist gegenüber der Wahrnehmung einer nicht trockenen Fahrbahn durch den Fahrer. Es wird davon ausgegangen, dass Aquaplaning bei Motorrädern erst bei großen Wasserfilmhöhen und hohen Geschwindigkeiten auftritt. Auftreten von Aquaplaning kann daher ausgeschlossen werden. Ein praktischer Aspekt der nassen Fahrbahnoberfläche ist die weiter gehende Witterungsunabhängigkeit der Versuchsdurchführung.

Zur genaueren Ermittlung der Einstellung und des Verhaltens der Versuchsfahrer wurde ein nach psychologischen Aspekten erstellter Fragebogen zum



**Bild 9:** Versuchsaufbau: GPS-Spuren mit Lage der Bremsversuche

Permutation A	Permutation B	Permutation C
Standardbremse	Kombibremse mit ABS	Kombibremse
Kombibremse	Standardbremse mit ABS	Kombibremse mit ABS, nur 1 Bedienelement
Standardbremse mit ABS	Standardbremse	Kombibremse mit ABS
Kombibremse mit ABS	Kombibremse mit ABS, nur 1 Bedienelement	Standardbremse
Kombibremse mit ABS, nur 1 Bedienelement	Kombibremse	Standardbremse mit ABS

**Tab. 2:** Verwendete Permutationen zur Vermeidung von Artefakten

Fahrverhalten der Fahrer und ihrer Einstellung zu Motorrad-ABS (s. Anhang) im Vorfeld der Versuche von den Versuchsfahrern ausgefüllt. Dieser Fragebogen lehnt sich an entsprechende Fragebögen an, die bei Pkw-Fahrversuchen verwendet wurden. Weiterhin wurde die Befindlichkeit der Probanden vor und nach den Versuchen sowie während des Wechsels der Bremssysteme mittels einer vereinfachten Eigenzustandsskalierung nach [KERWIEN 1999] (s. Anhang) abgefragt, um einen Einfluss des Zustands der Probanden auf die Ergebnisse der Bremsversuche untersuchen zu können.

Zum Ablauf der Versuche: Zunächst wird der Versuchsfahrer mit physiologischer Messtechnik ausgestattet und deren Funktion überprüft. Danach gibt der Proband die Eigenskalierung direkt in eine Datei ein. Nach Stellung der Fahraufgabe („Versuchen Sie, möglichst kurze Bremswege zu erreichen“) folgen die Fahrversuche. Die während der Versuchsvorbereitung (Ruhephase) aufgezeichneten physiologischen Messdaten gelten als Basis für einen späteren interindividuellen Vergleich. Der Versuchsfahrer durchfährt den Bremszyklus, s. Bild 9, mit dem ersten Bremssystem seiner Permuta-

tion. Zunächst muss er die Vollbremsung aus 60 km/h absolvieren, dann wenden und die Vollbremsung aus 90 km/h durchführen. Nach einem weiteren Wendevorgang führt der Versuchsfahrer die Kurvenbremsung aus 50 km/h in einer Rechtskurve mit dem Radius  $r = 50$  m durch. Der Zyklus beginnt von neuem. Nach sieben Durchläufen wird der Fahrer aufgefordert, die Servicestelle anzufahren, damit er wiederum den Befindlichkeitsbogen ausfüllen kann und die Versuchsleiter das Bremssystem wechseln können. Zur Synchronisation der Fahrzeugdaten mit den physiologischen Daten werden zwischen den Versuchszyklen Marker gesetzt. Nach Durchfahren der fünf Versuchszyklen mit den verschiedenen Bremssystemen füllt der Versuchsfahrer zum letzten Mal den Befindlichkeitsfragebogen aus, und die physiologische Messtechnik wird abgerüstet.

Die 14 Versuchspersonen, deren Fahrversuche gewertet wurden und in diesen Bericht einfließen, sind männlich und zwischen 21 und 31 Jahre alt und besitzen eine Gesamtfahrerfahrung mit dem Motorrad zwischen 21.000 km und über 200.000 km. Die Altersstruktur zeigt Bild 10. Die Versuchspersonen können den eher erfahrenen Motorradfahrern zugerechnet werden. Die geplanten Versuche auch mit unerfahrenen Versuchspersonen wurden nach ersten Stürzen nicht mehr in Betracht gezogen.

Bis auf eine hatte keine der Versuchspersonen Erfahrungen mit blockiergeschützten Bremsen, und nur wenige Versuchspersonen hatten sehr geringe Erfahrungen mit Kombinationsbremssystemen. Die Einstellung zu ABS beim Motorrad war durchweg eher positiv, die Einstellung zu Kombinationsbremssystemen indifferent.

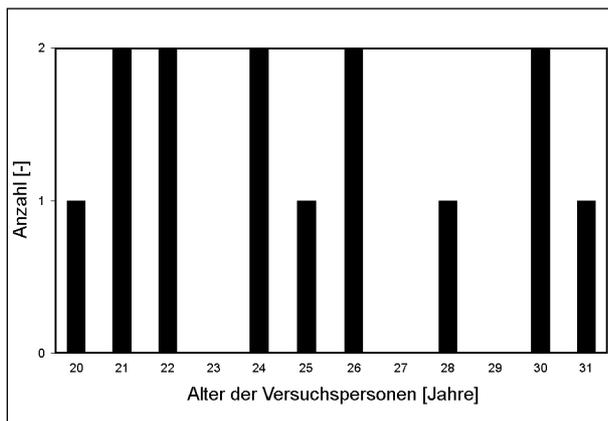


Bild 10: Altersstruktur der Versuchspersonen

## 5.3 Messtechnik

### 5.3.1 Versuchsfahrzeug

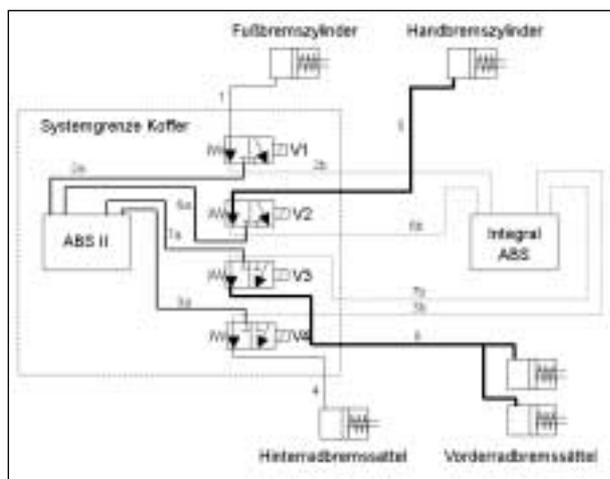
Bei der Auswahl eines Versuchsfahrzeugs stand die Möglichkeit, die verschiedenen Bremssysteme Standardbremse und Kombinationsbremse jeweils mit und ohne ABS-Sicherung realisieren zu können, im Vordergrund. Die Wahl fiel daher auf die BMW R1150RT, s. Bild 11, in der serienmäßig ein blockiergeschütztes Kombinationsbremssystem verbaut ist. Da in dem technisch weitgehend identischen Vorgänger BMW R1100RT ein blockiergeschütztes Standardbremssystem verbaut ist, konnte dieses System parallel zum bestehenden Kombinationsbremssystem im Versuchsfahrzeug Verwendung finden. Dazu mussten schaltbare hydraulische Verknüpfungen geschaffen werden, da die Geber- und Nehmerzylinder im Originalzustand belassen wurden. Weiterhin mussten die jeweiligen ABS-Systeme abschaltbar sein, ohne jedoch die Bremskraftverstärkung im Fall des Kombinationsbremssystems ebenfalls abzuschalten. Darüber hinaus musste diese Bremskraftverstärkung im Fall des aktiven Standardbremssystems deaktiviert werden, um die hydraulischen Schalteinheiten zu entlasten. All dies sowie die weitere Auswahl der Messtechnik stand unter der Prämisse geringen Energieverbrauchs. Bei Fahrversuchen mit häufigen, energieintensiven ABS-Regelungen kann ein solch großer Verbraucher wie Messtechnik die Fahrzeugelektrik überfordern.



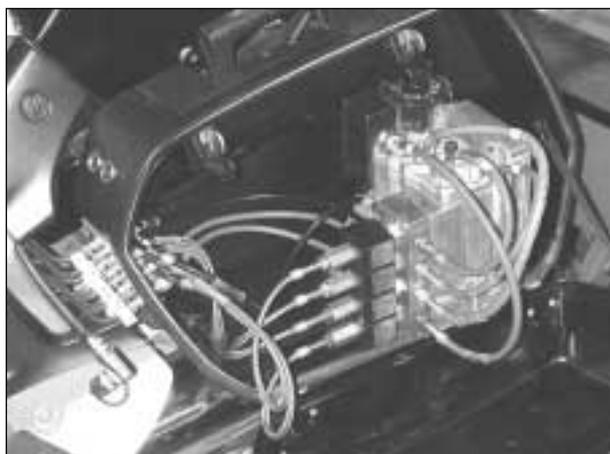
Bild 11: Versuchsfahrzeug BMW R 1150 RT mit integrierter und abgedeckter Messtechnik



**Bild 12:** Blick ins Cockpit des Versuchsmotorrads: Bremsystemumschaltung (1) und Informationsdisplay für den Versuchsfahrer (2)



**Bild 13:** Hydraulikschaltplan der Bremssysteme



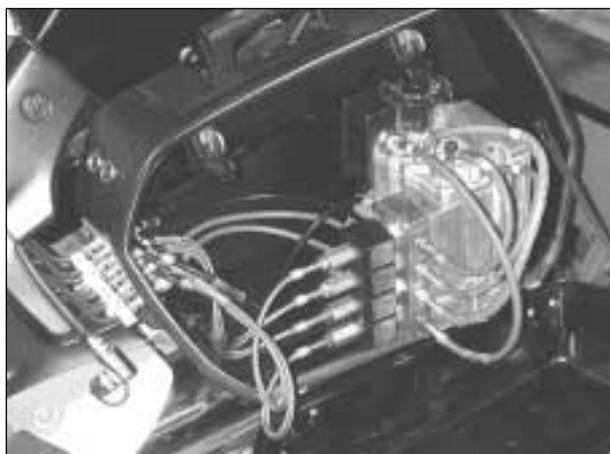
**Bild 14:** Hydraulische Schalteinheit und ABS II Modulator im linken Fahrzeugkoffer

Bild 12 gewährt einen Blick auf den Fahrerarbeitsplatz mit dem Umschalter für die verschiedenen Bremsysteme und dem frei programmierbaren Informationsdisplay für den Versuchsfahrer.

Die hydraulischen Schalteinheiten, einen Schaltplan zeigt Bild 13, wurden als vier elektrisch schaltbare 3/2-Wege-Ventile ausgewählt, die eine vergleichsweise geringe Leistungsaufnahme von 22 W pro Stück hatten, s. Bild 14. Die angegebene Resistenz gegenüber Bremsflüssigkeit konnte auch nach Nachbesserungen nicht als erfüllt betrachtet werden. Da aus ABS-Regelventilen entwickelte 2/2-Wege-Ventile eine zu große Leistungsaufnahme hatten, wurde auf handbetätigte Nadelventile der Firma ContiTeves umgerüstet, was erhöhte Anforderungen an die Versuchsbetreuer stellte.

Zur Messdatenaufnahme wurde ein CAN-Messbus aufgebaut. Dies hat den Vorteil, dass für Störeinflüsse anfälligere analoge Messketten kurz gehalten werden können, und bringt einen erheblich geringeren Verkabelungsaufwand mit sich. Den prinzipiellen Aufbau und die Lage der Komponenten verdeutlicht Bild 15.

Die für die vorliegende Untersuchung wichtigsten Sensoren werden nachfolgend erläutert: Zur Ermittlung der Raddrehzahlen wurden die Signale der originalen ABS-Sensoren mit Hilfe von Y-Adaptern der Firma Tellert angezapft. Parallel dazu wurde zur Abschätzung des Fehlers in der Geschwindigkeitsmessung über die Raddrehzahlen die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit in Vorversuchen mit einem Datron Correvit aufgenommen. Die Bremsmomente wurden über selbst konstruierte Bremsmomentmesseinrichtungen von Kraftmessdosen aufgenommen, s. Bild 16 und Bild 17. Ebenfalls selbst entwickelt und konstruiert sind die Sensoren



**Bild 15:** Position der Messtechnikkomponenten im Versuchsmotorrad

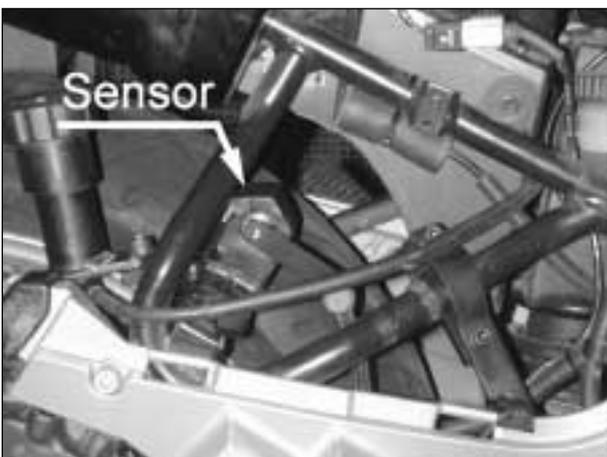
zur Messung der Betätigungswinkel von Handbrems- und Kupplungshebel, die auf dem Darmstädter Reifensensor [BREUER 2002] nach dem Hall-Prinzip basieren, s. Bild 19. Der Betätigungs-



**Bild 16:** Bremsmomentmesseinrichtung vorne mit Kraftmessdose (s. Pfeil)



**Bild 17:** Bremsmomentmesseinrichtung hinten mit Blattfedern und Kraftmessdose (s. Pfeil)



**Bild 18:** Hall-drehgeber, hier zur Ermittlung des Betätigungswinkels des Fußbremshebels

winkel des Fußbremshebels wird wie die Federwege vorne und hinten sowie der Lenkerdrehwinkel von einem auf dem Hall-Prinzip basierenden Winkelsensor der Firma AB Elektronik GmbH, wie er von der Automobilindustrie verwendet wird, ermittelt. Bild 18 zeigt dies am Beispiel des Fußbremshebels. Weiterhin wurde ein GPS-Empfänger verbaut, der die spätere Auswertung der Daten erheblich vereinfacht.

Beim Anbau der Messtechnik wurde auf die Möglichkeit witterungsunabhängiger Messungen Wert gelegt. Die Sensorik, die Messdatenverarbeitung und die Messdatenaufzeichnung sind vor Witterungseinflüssen geschützt untergebracht.

Das Versuchsfahrzeug wurde zum Schutz des Aufsassens und der Messtechnik mit einer Umsturzvorrichtung ausgestattet, s. Bild 20. Diese Um-



**Bild 19:** Sensor zur Ermittlung des Hebelbetätigungswinkels: links Einbauposition des Magneten, rechts Abdeckplatte mit Hall-Element



**Bild 20:** Versuchsfahrzeug mit Umsturzvorrichtung



## 6 Ergebnisse

### 6.1 Bremsleistungen

#### 6.1.1 Phasen einer Bremsung

Unter dem Begriff der Bremsleistung zusammengefasst werden erreichte Verzögerungen, Bremswege und -zeiten. Dabei wird die Bremsung in zwei Phasen eingeteilt: die Phase der Vollverzögerung und die Initialphase der Bremsung. Die Definitionen für Beginn und Ende sowie die Trennung zwischen den zwei Phasen werden nachfolgend erläutert.

Während die Festlegung des Endes eines Bremsvorgangs mit dem Stillstand beider Räder eindeutig und unstrittig ist, so ist der Beginn der Bremsung nicht so eindeutig festlegbar. In vorangegangenen Untersuchungen [PRÄCKEL 1999, WEIDELE 1994, ECKER 2000] galt das Auslösen eines Bremslichtschalters als Bremsbeginn. Im hier vorliegenden Fall wurden die Hebelwege als solches aufgenommen. Ein Bremsbeginn lag vor, wenn der Hebel zu mehr als 10 % des maximalen Hebelbetätigungswegs betätigt wurde. Diese Grenze stellt eine sichere Erkennung einer Betätigung sicher, ohne bereits das leichte Anlegen der Finger oder des Fußes an den Bremshebel („Bremsbereitschaft“) als Bremsung zu werten. Weiterhin ist dies ungefähr die Schwelle, ab der die jeweilige Rückflussbohrung in den Bremszylindern überfahren wird und somit Bremsdruck im System aufgebaut werden kann. Eine eventuell zu erwartende Systemabhängigkeit der Zeit zwischen Aufbau des Drucks an den Geberzylindern und Aufbau der Bremsmomente an den Rädern konnte nicht beobachtet werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese Zeitunterschiede sehr klein gegenüber inter- und intraindividuellen Unterschieden in der Bremsenbetätigung sind.

Die Einteilung der Bremsung in die Initial- und die Vollbremsphase ist theoretisch einfach und fahrzeugtechnisch sinnvoll vorzunehmen anhand der Radlasten, die in der Initialphase der Bremsung vom statischen auf den dynamischen quasistationären Zustand gebracht werden. Mit Erreichen dieser dynamischen Radlasten beginnt die Vollbremsphase. Praktisch ist diese Unterscheidung anhand von Messdaten nicht sicher zu treffen, da die Fahrbahn nicht ideal eben ist und der Fahrer auch während der Vollbremsphase keine konstante Verzögerung erbringt, ebenso wenig ein ABS-System in der Regelung. Eine zeitliche Unterteilung der Bremsphasen erscheint weniger sinnvoll, schließ-

lich ist es gerade die Einschwingzeit, die ermittelt werden soll. Es wurde die praktikable Trennung nach Geschwindigkeit als Kriterium herangezogen; die Reduktion der Geschwindigkeit um 10 % von der Ausgangsgeschwindigkeit ausgehend wird gewählt als Trennlinie zwischen Initialphase und Vollbremsphase.

#### 6.1.2 Gesamtbetrachtung der Bremsung

Zunächst wird die gesamte Bremsung von der Betätigungsschwelle bis zum Stillstand bewertet, unabhängig vom Bremssystem. Innerhalb der sieben Bremsmanöver erzielten die Versuchspersonen ihr bestes Ergebnis entgegen ersten Hypothesen bezüglich einer Lernkurve ausnahmslos innerhalb der ersten sechs Bremsungen, s. Bild 24. Allerdings wurde nicht untersucht, wie sich eine große Zahl an Bremsversuchen intraindividuell auf die erzielten Bremswege auswirkt. Ebenso kann vor allem dieses Ergebnis nicht auf sehr unerfahrene Versuchspersonen übertragen werden. Die Längen der von den Testpersonen erzielten Bremswege sind in Bild 25 nach Aufgabenstellungen getrennt dargestellt; je schwieriger die Aufgabenstellung, desto größer die

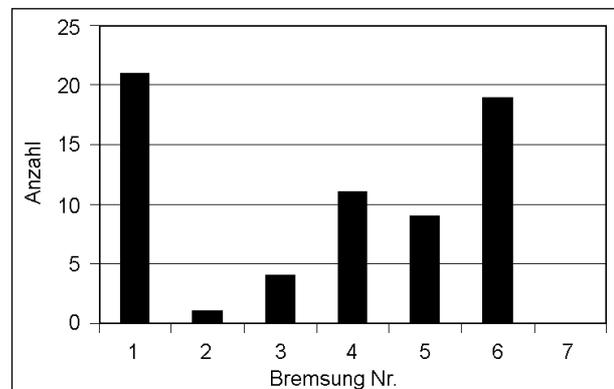


Bild 24: Anzahl der pro Testperson und Bremssystem jeweils höchsten Verzögerungen über die gesamte Bremsung

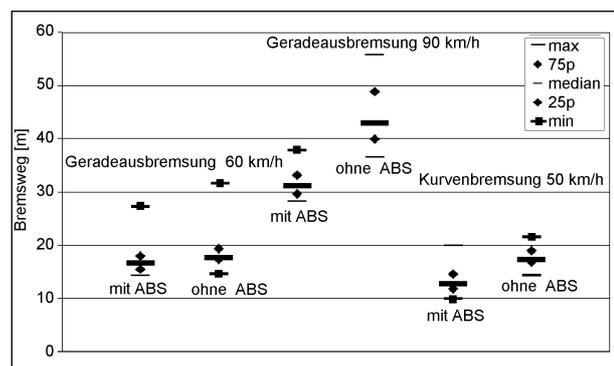


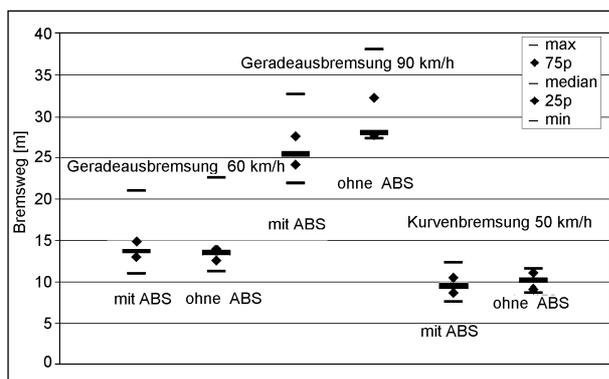
Bild 25: Erzielte Bremswege mit und ohne ABS, nach Bremsaufgaben getrennt

prozentualen Unterschiede der im Mittel mit und ohne ABS erzielten Bremswege. Zur Verdeutlichung sei beispielhaft die Differenz der erzielten Bremswege bei Bremsungen aus 90 km/h gewählt: Der Median der Bremswege ohne ABS-Regelung beträgt 11,80 m mehr als der mit blockiergeschützten Bremssystemen erzielten. Dies bedeutet, dass an dem Ort, an dem die mittlere Bremsung mit ABS beendet ist, unter den gegebenen Voraussetzungen ohne ABS im Mittel noch eine Geschwindigkeit von fast 50 km/h anliegt.

Die Hypothesen, wonach selbst erfahrene Fahrer ohne ABS längere Bremswege benötigen bzw. die Bremswege ohne ABS größere Streubreiten als mit ABS aufweisen, konnten somit bestätigt werden. Ebenso bestätigt werden konnte die Hypothese, nach der der Unterschied zwischen erzielbaren und erzielten Bremswegen bei der Kurvenbremsung am größten ist.

### 6.1.3 Vollbremsphase der Bremsung

Es kann erwartet werden, dass vor allem die in der Initialphase zurückgelegten Wege stark von der Art des Bremssystems abhängen, während die in der Vollbremsphase zurückgelegten Wege beim vorliegenden Fall erfahrener Testpersonen eher auf gleichem Niveau liegen. Betrachtet man – wie beispielsweise bei von der Presse durchgeführten so genannten Bremsvergleichstests üblich – die Ergebnisse für die Vollbremsphase zwischen ABS-geregelten und nicht ABS-geregelten Systemen bei den unterschiedlichen Aufgaben (s. Bild 26), so erkennt man, dass die zurückgelegten Wege sich bei den Versuchen mit niedrigen Sollgeschwindigkeiten in ähnlichen Größenordnungen bewegen mit leichten Vorteilen für die nicht ABS-geregelten bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 60 km/h und



**Bild 26:** Mit und ohne ABS erzielte Bremswege in der Vollbremsphase, nach Bremsaufgaben getrennt

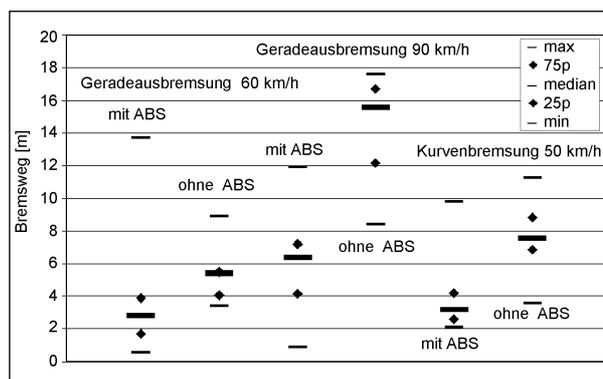
leichten Vorteilen für die ABS-geregelten bei der Kurvenbremsung.

### 6.1.4 Initialphase der Bremsung

Die Betrachtung der Initialphase der Bremsung ergibt erwartungsgemäß wesentlich größere Unterschiede in den Bremsleistungen zwischen den Bremssystemen. Analog zu Bild 25 sind in Bild 27 die während der Initialphase zurückgelegten Wege mit und ohne ABS abhängig von der Aufgabenstellung dargestellt. Einer der Vorteile von blockiergeschützten Bremssystemen offenbart sich dem Betrachter deutlich: Selbst die (erfahrenen) Testpersonen können unter den gesicherten Bedingungen einer abgesperrten Versuchsstrecke die Bremskraft deutlich schneller aufbauen und somit in der Initialphase schon bei Landstraßengeschwindigkeit erheblich Bremsweg einsparen.

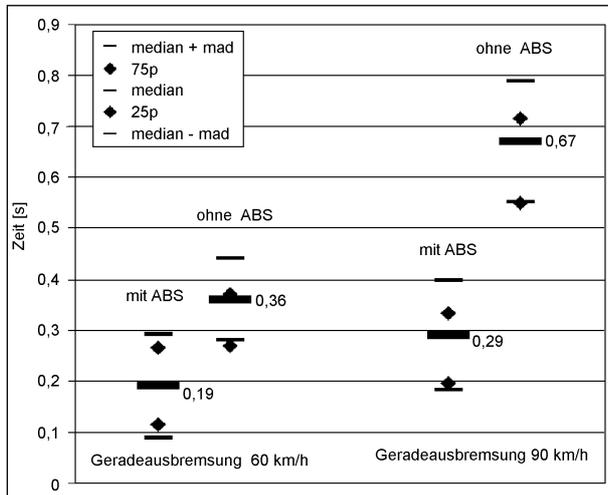
Die verstrichenen Zeiten zwischen Bremsbeginn und dem Erreichen von 90 % der Ausgangsgeschwindigkeit steigen bei nicht blockiergeschützten Bremsen dabei überproportional stark mit der Geschwindigkeit an, während dieselbe Größe bei blockiergeschützten Bremsen nicht nur deutlich geringer ist, s. Bild 28, sondern sich auch auf gleichem, physikalisch begründeten Niveau unabhängig von der Geschwindigkeit bewegt, s. Bild 29.

Hierbei ist wie bei den anderen Betrachtungen zur Bremsleistung der Versuchsfahrer festzuhalten, dass das Merkmal Kombi- gegenüber Standardbremse im Gegensatz zum Merkmal ABS-Sicherung keine signifikanten Unterschiede in den Bremsleistungen erkennen lässt. Es kann zusammengefasst werden, dass der Median der Bremswege mit Standardbremse tendenziell kleiner ist als derjenige der mit Kombibremse erzielten, jedoch die mittlere absolute Abweichung vom Median bei

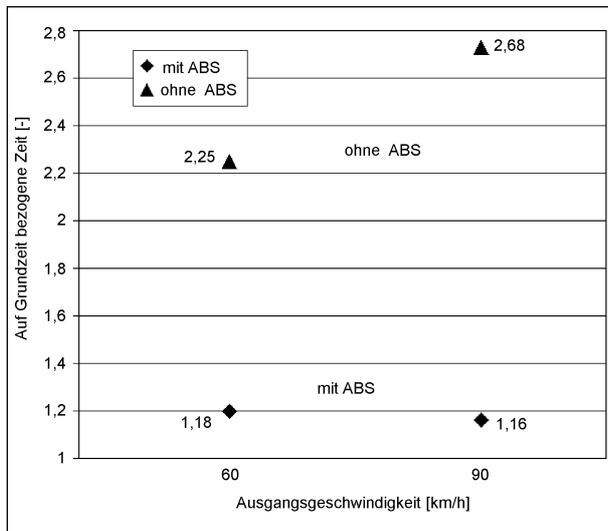


**Bild 27:** Mit und ohne ABS zurückgelegte Wege während der Initialphase

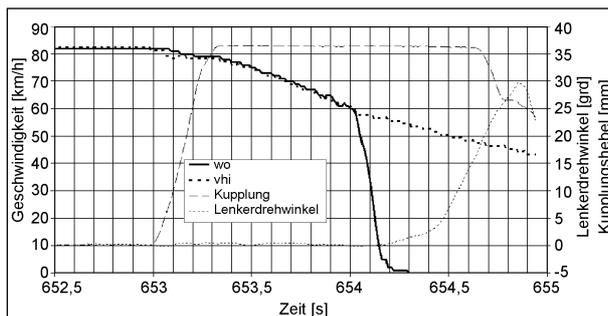
der Kombibremse geringer ist als bei der Standardbremse. Gesicherte Aussagen ließe möglicherweise eine Erhöhung der Grundgesamtheit der Testpersonen auf etwa dreißig zu.



**Bild 28:** In der Initialphase verstrichene Zeiten mit und ohne ABS



**Bild 29:** Mediane der auf die Ausgangsgeschwindigkeit bezogenen, in der Initialphase verstrichenen Zeiten



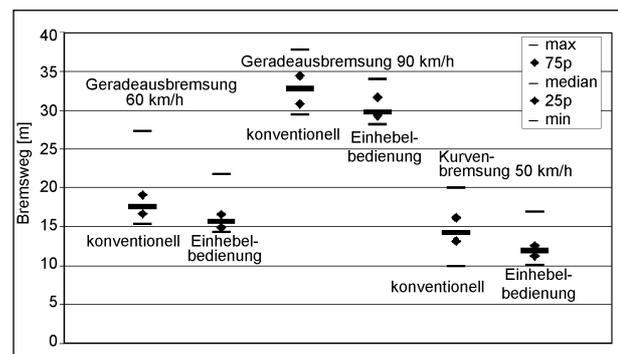
**Bild 30:** Zeitlicher Ablauf eines Sturzes aufgrund einer Vorderradüberbremsung

Während der Versuche kam es zu Stürzen durch Überbremsung des Vorderrads, die glücklicherweise alle für Mensch und Maschine glimpflich ausgingen. Trotz der Umsturzvorrichtung kam es in zwei Fällen sogar zur Trennung des Fahrers vom Versuchsmotorrad. Die zeitliche Abfolge eines solchen Sturzes zeigt Bild 30: Bei  $t = 654$  s beginnt das Vorderrad in die Blockade zu laufen. 0,2 s später ist das Vorderrad in der Blockade und das Motorrad bereits im Sturz befindlich. Die eingezeichnete Kupplungsbetätigung dient als Indikator, wann die Testperson vom Lenker losgerissen wurde. Direkt im Anschluss an diese Sequenz beginnt das Motorrad sich wieder aufzurichten und fährt noch ca. 150 m. Anhand der Versuchsdaten kann davon ausgegangen werden, dass das Versuchsmotorrad in weniger als einer halben Sekunde nach dem Beginn der Vorderradblockade zum Sturz gekommen ist. Ein Gegensteuern des Fahrers war selbst unter den gegebenen Idealbedingungen nicht mehr möglich.

### 6.1.5 Bedienkonzept

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurden Bremsungen von Fahrern mit einem blockiergeschützten Kombibremssystem mit nur einem Bedienhebel durchgeführt. Wie anfangs beschrieben, handelt es sich dabei aus verschiedenen Gründen um den Handbremshebel, der bei dem verwendeten Versuchsfahrzeug am rechten Lenkerende platziert ist.

Die untersuchte Einhebel-Bedienung gewährleistet bei blockiergeschützten Kombibremsen geringe Vorteile gegenüber der konventionell mit zwei Bedienhebeln ausgestatteten blockiergeschützten Kombibremse. Die Bremsweinsparungen resultieren aus dem schnelleren Bremsdruckaufbau zu Beginn der Bremsung. Nach Initialphase und Voll-



**Bild 31:** Erzielte Bremswege mit Einhebel- und konventioneller Zweihebel-Bremsenbedienung einer blockiergeschützten Kombibremse

bremssphase aufgeteilt steuert erstere etwa zwei Drittel der Bremswegdifferenz bei, in der Vollbremsphase wird etwa ein Drittel der Bremswegdifferenz gewonnen. Über die gesamte Bremsung konnten die Versuchsfahrer so im Mittel 2 m bis 3 m Bremsweg einsparen, s. Bild 31. Die Hypothese über den fehlenden Einfluss der Anzahl der Bedienelemente auf die erzielten Bremswege konnte somit nicht aufrechtgehalten werden.

## 6.2 Belastung und Beanspruchung

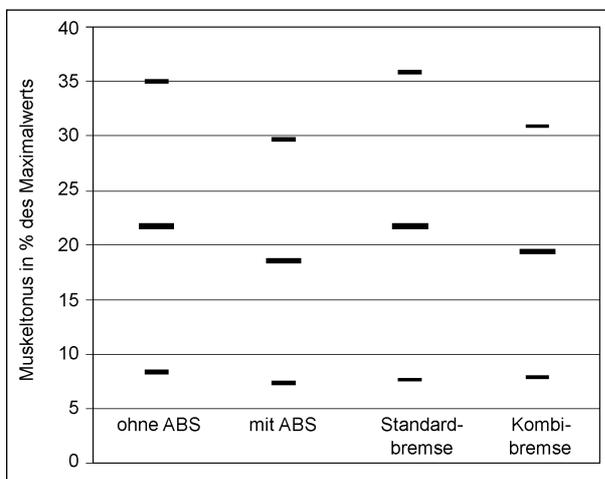
Die physische Belastung während einer Bremsung wird vor allem von den Abstützkräften am Lenker dominiert. Bei der Kurvenbremsung sind an der Blockadegrenze zusätzlich hohe Kraftgradienten einzusteuern, um eine Abweichung vom Sollkurs oder gar einen Sturz zu vermeiden [WEIDELE 1994].

Die physische Beanspruchung wird mittels des Muskeltonus am Trapezius pars descens ermittelt. In der Hypothese müsste dieser intraindividuell mit der erzielten Bremsverzögerung positiv korrelieren. Wie oben beschrieben kann sich jedoch eine höhere mentale Beanspruchung in einer Steigerung der muskulären Anspannung ausdrücken. Letztgenannter Effekt scheint bei Bremsungen ohne ABS-Sicherung den technisch begründeten Zusammenhang zu überlagern; bei Bremsungen mit ABS-geregelten Bremssystemen liegt der interindividuelle Median bei ca. 80 % des Muskeltonus bei Bremsungen ohne ABS, s. Bild 32. In leicht abgeschwächter Form ist dies auch für die Kombibremse im Gegensatz zur Standardbremse gültig. Ver-

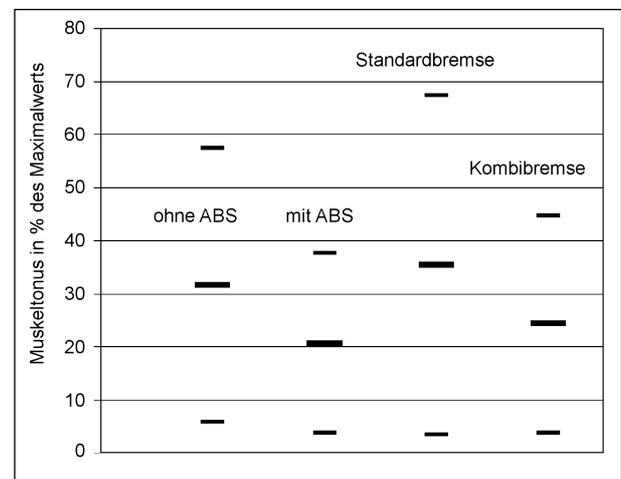
gleicht man in ähnlicher Weise den Muskeltonus des Fingerbeugers (Flexor digitorum superficialis), so wird der Einfluss der mentalen und emotionalen Disposition des Fahrers in Abhängigkeit vom verwendeten Bremssystem überdeutlich. Die Aktivierung des Muskels ist bei der Betätigung des Kupplungshebels notwendig. Weiterhin spielen die Umschließungskräfte des Fahrers am linken Lenkerende in den Muskeltonus hinein.

Die Belastung des Muskels ist bei gleichen Betätigungszeiten der Kupplung als für alle Bremssysteme identisch anzunehmen. Da die auf die gesamte Versuchszeit bezogenen Betätigungszeiten der Kupplung in Summe weniger als 3 % zwischen den Bremssystemen variierten, kann dies als gegeben betrachtet werden. Umso erstaunlicher ist der große zwischen den Bremssystemen bestehende Unterschied, s. Bild 33. Die Hypothese, nach der die physische Beanspruchung bei allen Bremssystemen gleich ist, muss demnach abgelehnt werden. Die Hypothese, nach der die psychische Beanspruchung bei Bremsungen ohne ABS größer ist, kann hingegen bestätigt werden.

Bezüglich der Beurteilung der mentalen Beanspruchung anhand der Herzschlagfrequenz können die Versuchspersonen in zwei Gruppen eingeteilt werden: Bei etwa der Hälfte der Versuchspersonen (acht) liegt die Schwankungsbreite der Herzschlagfrequenz zwischen den Versuchszyklen mit verschiedenen Bremssystemen bei weniger als 5 % des Maximalwerts. Bei sechs der Versuchspersonen hingegen kommt es zu großen Unterschieden in der Herzschlagfrequenz unter Variation des Bremssystems. Die Ergebnisse – aufgeteilt nach

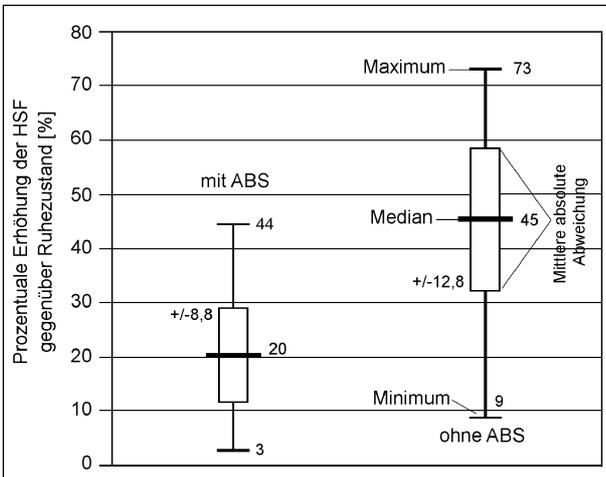


**Bild 32:** Bezogener Muskeltonus (75p, Median, 25p) des Trapezmuskels bei Bremsungen mit verschiedenen Bremssystemen über alle Bremsaufgaben

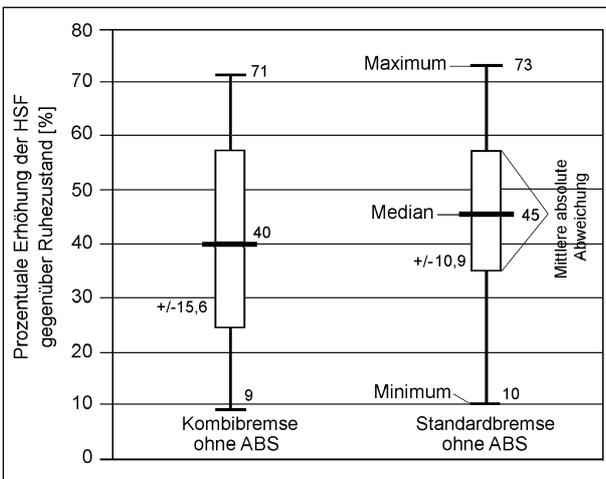


**Bild 33:** Bezogener Muskeltonus (75p, Median, 25p) des Fingerbeugers bei Bremsungen mit verschiedenen Bremssystemen über alle Bremsaufgaben

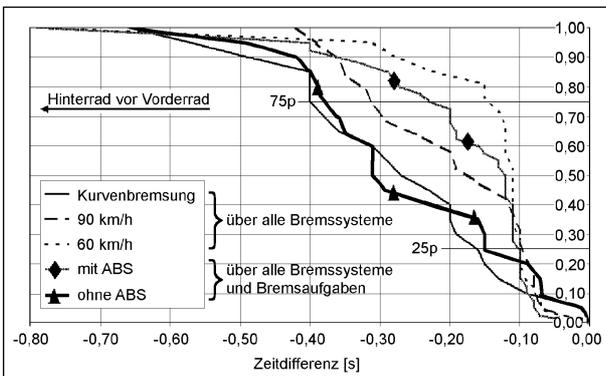
Bremssystemen mit und ohne ABS sowie Kombinations- und Standardbremssystem – zeigen Bild 34 und Bild 35 als Ausdruck des prozentualen Anstiegs der Herzschlagfrequenz gegenüber der Ruhephase.



**Bild 34:** Prozentuale Erhöhung der Herzschlagfrequenz bei Bremsungen ohne ABS gegenüber mit ABS



**Bild 35:** Prozentuale Erhöhung der HSF bei Bremsungen mit Standardbremsen gegenüber Kombibremsen



**Bild 36:** Summenkurven der Zeitdifferenzen zwischen der Betätigung des vorderen und hinteren Bremshebels aufgeteilt nach Bremssystem und Aufgabenstellung

hephase. Hierbei wird die starke Reaktion der Herzschlagfrequenz auf das Nicht-Vorhandensein eines ABS deutlich, wohingegen das Merkmal Kombi-/Standardbremse keinen belastbaren Unterschied ergibt. Vor allem der sehr starke Anstieg der Herzschlagfrequenz während der Bremszyklen mit den nicht ABS-geregelten Bremssystemen gegenüber der Ruhephase fällt auf. In absoluten Zahlen ausgedrückt haben manche Versuchsfahrer über eine Minute gemittelt Herzschlagfrequenzen von 160 bis 170 Schlägen/min. Zum Vergleich sei an dieser Stelle erwähnt, dass bei früheren fzd-Versuchen im öffentlichen Straßenverkehr bis zu 200 Schläge pro Minute gemessen wurden, was sich mit Beobachtungen von [SCHELL 2002] deckt.

Weiterhin konnte die Beobachtung gemacht werden, dass bei den vorliegenden Versuchen im Gegensatz zu bisherigen Ergebnissen [VAVRYN 1996] und zu eigenen Beobachtungen im öffentlichen Straßenverkehr die Hinterradbremse zeitlich vor der Vorderradbremse betätigt wurde. Ein Erklärungsversuch wäre, dass die als eher schlechter erreichbar beschriebene hintere Bremsenbetätigung „vorbereitend“ zur eigentlichen Vollbremsung vor der vorderen Einrichtung betätigt wird. Weiterhin ist hier die Messmethode gegenüber bisherigen Forschungen wie weiter oben beschrieben geändert worden. Für den erstgenannten Erklärungsversuch spricht die Tatsache, dass das Zeitfenster zwischen den Betätigungen von vorderer und hinterer Einrichtung umso größer wird, je anspruchsvoller die Aufgabenstellung wird. Die Auftragung der Summenkurven zeigt Bild Bild 36.

Bei Bremsungen mit Kombinationsbremssystemen mit und auch ohne ABS haben manche Versuchsfahrer teilweise nur einen Bedienhebel betätigt. Dies war ausnahmslos der vordere Bedienhebel.

### 6.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Bezüglich der Übertragbarkeit auf das reale Verkehrsgeschehen müssen einige Punkte berücksichtigt werden. Das Versuchsfahrzeug hat eine Fahrwerkskonfiguration, die sich vom Großteil der Motorradpopulation unterscheidet. Diese Fahrwerkskonfiguration vermeidet die oben beschriebene dynamische Vorderradüberbremsung. Der hohe kinematische Bremsnickausgleich und damit ein gegenüber Motorrädern mit konventioneller Telegabel vergleichsweise geringes Bremsnicken sind in der Lernkurve der Probanden enthalten. Bei Motorrädern mit Standardfahrwerkskonfiguration ist die Initi-

alphase prinzipbedingt länger als beim Versuchsmotorrad. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass vor allem die in der Initialphase ermittelten Unterschiede bei Motorrädern mit Standardfahrwerkkonfiguration stärker zum Tragen kommen.

Die Übertragbarkeit von auf der abgesperrten Versuchsstrecke gewonnenen Daten auf das reale Verkehrsgeschehen ist nur mit Einschränkungen möglich. Während davon ausgegangen werden kann, dass die Unterschiede in den Bremsleistungen der blockiergesicherten Bremssysteme zu den Bremssystemen ohne Blockiersicherung im realen Straßenverkehr größer ausfallen als bei den vorliegenden Versuchen [SPORNER 2000], können die Vorteile eines Kombinationsbremssystems gegenüber einer Standardbremse bei Versuchen mit auf die Bremsung vorbereiteten Versuchsfahrern nicht verdeutlicht werden. Die in der Literatur beschriebene Fehlbedienung der Bremsen in kritischen Fahrsituationen [PRÄCKEL 1999, SPORNER 2002] kann nach dem heutigen Stand der Forschung außerhalb des realen Verkehrsgeschehens nicht ohne Inkaufnahme einer Gefährdung von Versuchspersonen durchgeführt werden.

Bezüglich der Auswahl der Ausgangsgeschwindigkeiten kann davon ausgegangen werden, dass höhere Ausgangsgeschwindigkeiten zu deutlicheren Unterschieden in den Bremsleistungen führen, da die Erfahrung der Versuchspersonen mit der Höhe der Verzögerung und der Höhe der Ausgangsgeschwindigkeit abnimmt [PRÄCKEL 1999]. Dasselbe ist für die Geschwindigkeit und den Ausgangsrollwinkel bei der Kurvenbremsung anzunehmen [WEIDLE 1994, PRÄCKEL 1999]. Der überproportionale Anstieg der Dauer der Initialphase ist ein weiteres Indiz für deutlichere Unterschiede bei höheren Geschwindigkeiten. Drastisch wird ein Bremsszenario aus hohen Geschwindigkeiten ohne Blockierschutz von [WAGNER 2000] vor Augen geführt.

Die zur Versuchsdurchführung gewählte nasse Fahrbahnoberfläche hat mutmaßlich keinen Einfluss auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse. In [ASSING 2002] und [SPORNER 2002] kann ein Zusammenhang der Unfallhäufigkeit und -schwere mit dem Straßenzustand nicht bestätigt werden. Es ist zu beachten, dass die Fahrleistungen von Motorradfahrern sowie deren Fahrweise in Abhängigkeit vom Straßenzustand nicht bekannt sind. Mit Blick auf die vorliegende Untersuchung wird angenommen, dass die Aufgabenschwere mit dem Merkmal einer optisch nassen Fahrbahnoberfläche gegenüber einer trockenen Fahrbahn zunimmt.

Die Auswahl der Versuchspersonen erstreckte sich auf eher erfahrene Versuchspersonen mit technischem Hintergrund. Schlussfolgernd aus [WEIDLE 1994] und [PRÄCKEL 1996] wird erwartet, dass bei Versuchspersonen mit geringerer Fahrerfahrung die Unterschiede zwischen den Bremssystemen stärker hervortreten.

Nicht untersucht wurden Bremssysteme, bei denen nur eines der Räder blockiergesichert ist. Auf diese aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus geborene Zwitterlösung können die vorliegenden Ergebnisse vor allem bezüglich der Kurvenbremsung nicht übertragen werden. Auf die gestalterischen Aspekte dieser Lösung hinsichtlich der Bremskraftverteilung und des Bedienkonzepts soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

## 6.4 Anforderungen an zukünftige Kraftfahrbremssysteme

### 6.4.1 Blockierschutz

Wie auch in vorangegangenen Arbeiten, die sich mit ABS am Motorrad auseinandersetzen, kann auch an dieser Stelle nur ein eindeutiges Plädoyer für die Ausstattung von Einspurfahrzeugen mit ABS stehen. Die Versuchsergebnisse bezüglich der Bremsleistung bestätigen vorangegangene Forschungen; die Beanspruchung des Fahrers konnte in dieser Arbeit als ein weiterer, schwer wiegender Grund zur möglichst flächendeckenden Einführung von ABS im Motorrad benannt werden.

Die Kurvenbremsung mit blockiergeschützten Bremsen wurde in früheren Veröffentlichungen aufgrund der wechselnden Bremslenkmomente als problematisch beschrieben. Die vorliegende Untersuchung konnte zeigen, dass moderne ABS auch und vor allem bei der Kurvenbremsung dem Fahrer die Erzielung kürzerer Bremswege als mit nicht blockiergeschützten Bremsen ermöglichen.

Motorradfahrer, die ihr Fahrzeug vornehmlich als Freizeitgerät nutzen, reagieren jedoch empfindlich auf zusätzliche Kosten. Zusätzliche Fahrzeugmasse stellt ein weiteres Argument gegen Einbau und Applikation eines Blockierschutzes dar. Trotzdem zeigt folgendes Rechenexempel den Nutzen eines ABS sowohl für den Motorradfahrer als auch für die Volkswirtschaft: SPORNER geht bei einer vorsichtigen Schätzung davon aus, dass die Zahl der getöteten Motorradfahrer pro Jahr um 70 geringer wäre, wenn ABS flächendeckend eingeführt wäre [SPORNER 2000, 2002]. In [BAST 2003] ist der volkswirt-

schaftliche Schaden eines Unfalltoten in Deutschland (SGT) mit 1.174.064 € angegeben. Es sei angenommen, dass diese Motorradfahrer nunmehr schwere Verletzungen erleiden würden (was nicht zwingend der Fall ist und einer Worst-case-Betrachtung gleichkommt) und die Volkswirtschaft somit mit durchschnittlich 83.412 € (SSV) [BAST 2003] belasten würde. Stellt man dies den in [IVM 2003] benannten 204.129 Neuzulassungen (davon 145.369 über 125 cm<sup>2</sup>) im Beispieljahr 2002 gegenüber, so dürfte ein in allen motorisierten Zweirädern in Deutschland verbautes ABS nach der Formel:

$$ABS\_Stückpreis = \frac{GT \cdot (SGT - SSV)}{Anz\_Neuzulassung} \quad (5)$$

im Durchschnitt 374 € kosten. In der Tat kostet derzeit ein auf dem Stand der Technik befindliches ABS von beispielsweise Honda oder BMW den Endkunden weniger als 500 €. Es ist zu betonen, dass bei dieser Rechnung zu erwartende positive Effekte auf die Unfallschwere bzw. die Verletzungsschwere [SPORNER 2000] sowie verhinderte Sachschäden noch nicht berücksichtigt wurden.

Für Fahrzeuge, die auch für Einsatzzwecke außerhalb öffentlicher Straßen vermarktet werden, könnte der Blockierschutz in Analogie zu Vorgehensweisen bei Pkw und bisheriger Praxis abschaltbar gestaltet sein.

Das oft angebrachte Argument der Verhaltensanpassung nach der Theorie der Risikohomöostase von [WILDE 1981] konnte für Motorradfahrer auf öffentlichen Straßen von [PRÄCKEL 1999] entkräftet werden.

Ziel muss es sein, dass der Motorradfahrer eines Tages ebenso wie der Pkw-Fahrer das ABS nur noch wahrnimmt als eine der Kontrollleuchten, die beim Einschalten der Zündung aufleuchten. Es wäre wünschenswert, wenn sich die Motorradhersteller freiwillig selbst verpflichten würden, nur noch Motorräder mit ABS in den Handel zu bringen.

### 6.4.2 Bremskraftverteilung

Bei der Betrachtung eines realen Bremskraftverteilungsdiagramms eines Motorrads werden die zur Erzielung eines möglichst kurzen Bremswegs notwendigen Voraussetzungen bezüglich der Verteilung der Bremskraft auf die Räder deutlich. Der Fahrer muss die ideale Bremskraftverteilung genau einstellen, um die im Beispielfall mögliche Abbremsung von 80 % auszuschöpfen. Dies ist ihm nach Untersuchungen von [WEIDELE 1994] und [ECKER

2000] mit einer Standardbremse ohne Blockierschutz höchstens zufällig und nur kurzzeitig möglich. Bei Fehlbedienung der Bremse wie beispielsweise alleinige Betätigung der Hinterradbremse bis zur Blockade [SPORNER 2002] wird nur ein Bruchteil der möglichen Abbremsung erreicht, im Beispielfall ca. 30 %. Eine einfache Kombinationsbremsanlage wie in [POST 1984] gefordert mit einem bei Abbremsungen zwischen 15 % und 85 % überbremsten Hinterrad kann für diesen Fall der alleinigen Betätigung der Hinterradbremse bereits eine höhere Abbremsung von im Beispielfall über 50 % gewährleisten, s. Bild 37.

Während die Überschreitung der Blockadegrenze des Hinterrads in der Literatur als möglicherweise fahrdynamisch stabil gilt, führt eine Überschreitung des Kraftschlussangebots am Vorderrad meist unweigerlich zum Sturz [POST 1984, WEIDELE 1994, PRÄCKEL 1999, ECKER 2000].

Ausgehend vom Vorhandensein eines ABS kann der Fahrer theoretisch unabhängig vom Vorhandensein einer Kombibremse die ideale Bremskraftverteilung erreichen, indem er den Bremsdruck so lange erhöht, bis beide Räder in der Regelung sind. Etwaige Bedienfehler – beispielsweise alleinige Betätigung der hinteren Bremse – können jedoch erheblich verlängerte Bremswege zur Folge haben. Von solchen Fehlbedienungen wird in [PRÄCKEL 1996] und [SPORNER 2002] bei nicht blockiergeschützten Bremsen berichtet. Möglicherweise sind solche Fehlbedienungen mit blockiergeschützten Bremsen aufgrund des Wissens des Fahrers um die gebannte Sturzgefahr nicht mehr relevant.

Um ungeachtet dessen die Möglichkeit einer Fehlbedienung auszuschließen, muss die blockiergeschützte Bremse als Kombinationsbremse ausgeführt werden. Betrachtet man allein die Vollbremsung im

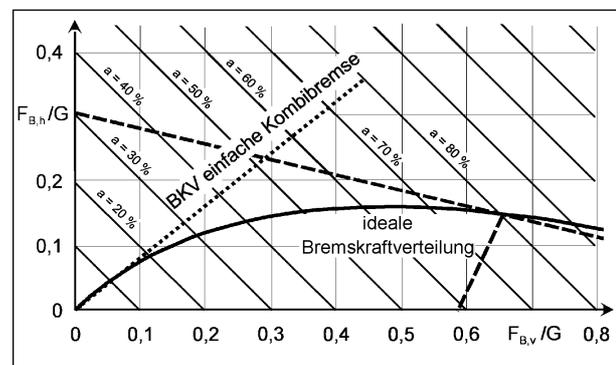
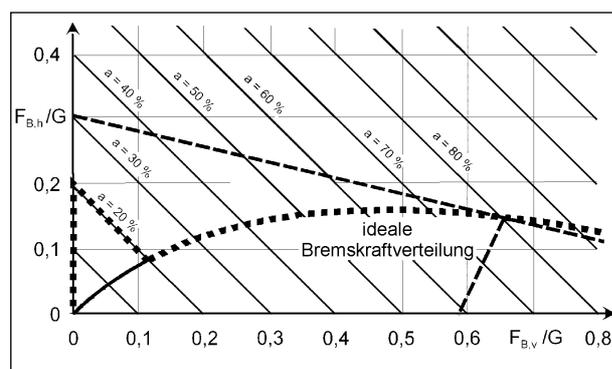


Bild 37: Bremskraftverteilung einer einfachen Bremskraftverteilung, die ab einer Abbremsung von 15 % das Hinterrad überbremst

öffentlichen Straßenverkehr mit dem Ziel eines möglichst geringen Bremswegs, so ist die Verwirklichung der zu diesem Zeitpunkt idealen Bremskraftverteilung ungeachtet der Hebelbetätigung sinnvoll. Besonders beim Motorrad ist jedoch zu beachten, dass es Bremsaufgaben gibt, die nicht der Erzielung geringstmöglicher Bremswege dienen, sondern stabilisierenden Charakter haben. Dazu zählt beispielsweise bei sehr geringen Geschwindigkeiten der dosierte Einsatz der hinteren Bremse zur Verhinderung der Stabilitätsstörung Kippen. Dieses Fahrmanöver wird auch bei Sicherheitstrainings geübt, indem eine Gasse möglichst langsam durchfahren werden soll. Es handelt sich um eine Art Staufahrt oder Rangierfahrt, auch angewendet bei der Durchfahrt enger Kehren sowie bei Kolonnenfahrten bspw. der Polizei. Ein anderes Manöver ist das leichte Betätigen der Hinterradbremse vor Kurven, welches das Motorrad stabilisieren soll. Ob dieses Manöver eher beruhigenden Einfluss auf den Fahrer als auf das Motorrad hat, war bislang noch nicht Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Hingegen wurde bereits von Motorradrennfahrern berichtet, die die hintere Bremse kurzerhand ausgebaut haben.

Weiterhin ist bei schlüpfrigen Fahrbahnverhältnissen eine Beaufschlagung des Vorderrads mit Bremskräften zumindest bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten auch mit Blockiersicherung zu vermeiden, um das ohnehin geringe Querkraftschlussangebot nicht zu vermindern. Dieser Punkt sowie die zuvor benannten eher komfortorientierten Kriterien führen zu der Überlegung, dass bei niedrigen eingesteuerten Bremsdrücken und/oder bei niedrigen Geschwindigkeiten die Kurve der idealen Bremskraftverteilung zugunsten einer hinterradlastigen Bremskraftverteilung verlassen werden sollte, s. Bild 38. Zur genaueren Auslegung bedarf es näherer Untersuchungen.



**Bild 38:** Idealisierter Verlauf einer motorradspezifischen Bremskraftverteilung für eine Kombibrmsanlage (gestrichelte Linie)

Aus gestalterischer Sicht abzulehnen sind konstruktiv vorgegebene Bremskraftverteilungen, die bei Ausfall oder Abschalten der Blockiersicherung dem Fahrer nicht die Möglichkeit geben, in einem ausreichend großen Reibschlussbereich das Hinterrad vor dem Vorderrad zu überbremsen.

### 6.4.3 Bedienkonzept

Abgesehen von rollerspezifischen Lösungen ist die Anordnung von Bremsenbedienhebeln an modernen Motorrädern vereinheitlicht: Die rechte Hand und der rechte Fuß bedienen jeweils einen Bremshebel. Dabei hat jeder Bediener eine Vorstellung, wie seine Eingabe von der Technik umgesetzt wird hinsichtlich beispielsweise der Umsetzung seiner Eingabekraft in eine Verzögerung. Solche Vorstellungen oder deren Nichtentsprechung manifestieren sich im Kleinen in Aussagen wie denen über schlechte Dosierbarkeit oder dem schlechten Druckpunkt einer Bremse. Große Abweichungen der Vorstellung des Menschen über die Auswirkung der Betätigung einer Maschine und deren tatsächliche Wirkungsweise können zu kritischen Situationen führen.

Bei der Analyse der Vorstellungen von Motorradfahrern über das Bremssystem spielt ihre Gewöhnung eine entscheidende Rolle. So wird die Umstellung auf eine blockiergeschützte Standardbremse dem bisherigen Nutzer einer nicht blockiergeschützten Standardbremse nicht schwer fallen – wenn er sie denn überhaupt bemerkt. Die Umstellung zurück von der blockiergeschützten auf die nicht blockiergeschützte Bremse kann als psychologisch schwieriger angenommen werden. Verinnerlichte Programmabläufe in Notsituationen müssen an dieser Stelle besondere Berücksichtigung finden. Mangels geeigneter Versuchspersonen ist eine Untersuchung derartiger Umgewöhnungsszenarien derzeit nicht möglich.

Bei der Umstellung von der Standard- auf eine Kombibrmsanlage kann es bei der Betätigung der hinteren Betätigungseinrichtung zu einer gegenüber dem Standardbremssystem ungewohnt höheren Verzögerung kommen. Umgekehrt kann diese Verzögerung bei der Umstellung von Kombibrmsanlage auf Standardbremse für den Fahrer überraschend niedrig sein. Für die vordere Bremsenbetätigung ergibt sich dieses Problem nicht, da der Unterschied zwischen den mit den vorgenannten Bremssystemen erzielbaren Verzögerungen vergleichsweise klein ist.

Die im vorliegenden Forschungsbericht erzielten Ergebnisse hinsichtlich einer Einhebelbedienung für eine blockiergeschützte Kombibremse haben keinerlei Nachteile für diese Art der Bremsenbetätigung allein durch den Handbremshebel erbracht. Im Gegenteil konnten für diese Art der Bremsenbetätigung tendenziell Vorteile ausgemacht werden. Die Einhebelbedienung eignet sich jedoch nur für blockiergeschützte Kombibremsen. Die gesetzliche Forderung nach zwei Betätigungseinrichtungen ist vor diesem Hintergrund für blockiergeschützte Kombibremsen nicht haltbar.

## 7 Zusammenfassung

Für das von der Bundesanstalt für Straßenwesen ausgeschriebene Projekt „Anforderungen an zukünftige Kraffradbremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit“ wurde ein Versuchsfahrzeug mit Messtechnik und verschiedenen Kraffradbremssystemen Standardbremse und Kombinationsbremse jeweils mit und ohne ABS ausgestattet. Der entwickelte Versuchsplan berücksichtigt die Besonderheiten der Motorradbremsung unter fahrzeugtechnischen, arbeitswissenschaftlichen und verkehrspsychologischen Gesichtspunkten.

Im Einzelnen wurden Testpersonen Bremsaufgaben mit den fünf verschiedenen Bremssystemen Standard- und Kombibremse jeweils mit und ohne ABS sowie blockiergeschützte Kombibremse mit Einhebel-Bedienung gestellt und die erzielten Bremswege sowie Belastungs- und Beanspruchungsgrößen des Fahrers aufgezeichnet.

Die Versuche zeigen folgende Ergebnisse: Die erzielten Bremswege sind mit ABS kürzer als ohne, was vor allem auf die Unterschiede in der Anfangsphase einer Bremsung zurückgeführt werden kann. Die während dieser Anfangsphase verstreichende Zeit steigt bei Bremsungen ohne ABS überproportional mit der Ausgangsgeschwindigkeit. Ein signifikanter Unterschied zwischen Standard- und Kombibremse konnte nicht festgestellt werden.

Die Bedienung einer blockiergeschützten Kombinationsbremse mit nur einem Bremshebel zeigt keinerlei Nachteil gegenüber einer konventionellen Zweihebel-Bedienung.

Bei Bremsungen ohne ABS stieg die als Beanspruchungsgröße herangezogene Herzschlagfrequenz deutlich stärker an als bei Bremsungen mit ABS. Auch der Muskeltonus des Flexor Digitorum Su-

perfacialis, eine Belastungsgröße, liegt wie auch andere Belastungsgrößen aufgrund der mit einer höheren mentalen Beanspruchung einhergehenden Muskelanspannung bei Bremsungen ohne ABS deutlich höher als bei Bremsungen mit ABS.

Die während des Versuchsbetriebs aufgetretenen Stürze fanden erwartungsgemäß nur bei Bremsungen ohne ABS statt.

Es können folgende Empfehlungen für zukünftige Kraffradbremssysteme abgeleitet werden: ABS sollte bei Einspurfahrzeugen möglichst flächendeckend Verwendung finden; dabei kann es abschaltbar gestaltet werden. Beim Vorhandensein einer blockiergeschützten Kombibremse ist ein Bedienelement ausreichend; dies sollte der Handbremshebel sein. Eine Überschlagregelung blockiergeschützter Bremsen ist notwendig, bestehende Überschlagregelungen müssen verbessert werden.

## 8 Danksagungen

An dieser Stelle sei all jenen Dank gesagt, die mit Ihrer uneigennütigen materiellen und/oder ideellen Unterstützung zum Gelingen des vorliegenden Forschungsprojekts beigetragen haben. Besonders erwähnt werden sollen an dieser Stelle BMW Motorrad für die Zurverfügungstellung zweier Fahrzeuge, Fahrzeugteile und der dazugehörigen Unterlagen sowie FTE für das vermittelte Systemwissen. Herrn Dr. MAUS sei für die umfangreiche Betreuung mit physiologischer Messtechnik gedankt, der Firma ContiTeves für die Überlassung von Bremsenteilen, der Metzeler Motorradreifen GmbH für die Reifenspenden, der Opel AG für die Möglichkeit, das Testcenter Dudenhofen zu nutzen, und der Firma Zweirad Norton für die in zahlreichen Nacht- und Wochenendschichten durchgeführten Wartungsarbeiten an den strapazierten Versuchsfahrzeugen.

Nicht zuletzt möchte ich den Studenten Marc-Alexander BEHR, Thomas BOTT, Nils ENDNER, Mathias GOLDT, Daniela GUDE, Jens HARTIG, Friedrich KOLB, Thomas KRAH, Steffen KUHL, Andreas MOHR, Katharina NEUMAYER, Markus RAMEL, Karsten SCHENK, Patrik SCHMIEDEL, Patrick SEINIGER und Sina STÜBIG danken, deren Mitarbeit in Form von Diplom- und Studienarbeiten sowie als Wissenschaftliche Hilfskraft in den Forschungsbericht eingeflossen sind.

## 9 Literatur

- ASSING, K.: Schwerpunkte des Unfallgeschehens von Motorradfahrern. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Mensch und Sicherheit, Heft M 137, Bergisch Gladbach 2002
- BAST (Hrsg.): Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland 2001. BAST-Info, Bergisch Gladbach 2003
- BREUER, B.: Motorräder. Skriptum zur Vorlesung Motorräder, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 2001
- BREUER, B. und Th. STROTHJOHANN: Der Darmstädter Reifensensor – ein mechatronisches System zur Ermittlung dynamischer Größen im rotierenden Reifen. Veröffentlicht in der KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, Ausgabe 11/2002, S. 610 ff.
- COLOMBO, M.: Moto Guzzi. Motor Buch Verlag, Stuttgart 1989, S. 121 1975
- ECHTERHOFF, W.: Erfahrungsbildung von Verkehrsteilnehmern. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Nr. 254, Bergisch Gladbach 1992
- ECKER, H., A. FISCHER, K. VAVRYN und M. WINKELBAUER: Bremsbeherrschung von Motorradfahrern – Ergebnisse aus einem Großversuch. Tagungsband der 3. internationalen Motorradkonferenz, München, 11.-12. September 2000
- Industrie-Verband Motorrad Deutschland e. V. (Hrsg.): IVM-Jahresbericht 2002, Essen 2003
- KERWIEN, H.: Zur Wirkungsweise mehrtägiger Rennstreckentrainings für Motorradfahrer. In: F. MEYER-GRAMCKO (Hrsg.), Verkehrspsychologie auf neuen Wegen: Herausforderungen von Straße, Wasser, Luft und Schiene. Fortschritte der Verkehrspsychologie 1998. 37. BDP-Kongress für Verkehrspsychologie, (478-488) Deutscher Psychologen Verlag, Bonn 1999
- LANDAU, K. und E. STÜBLER (Hrsg.): Die Arbeit im Dienstleistungsbetrieb – Grundzüge einer Arbeitswissenschaft der personenbezogenen Dienstleistung. Ulmer Verlag, Stuttgart 1992
- POST, W., B. BAYER und B. BREUER: Kombibremse Motorrad. Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik, Heft 289, VDI-Verlag, Düsseldorf 1984
- PRÄCKEL, J.: Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Fahrzeugtechnik, Heft F 18, Bergisch Gladbach 1996
- PRÄCKEL, J.: Die Motorradbremsung im System Mensch/Maschine/Umgebung. Diss. TH Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 384, VDI-Verlag, Düsseldorf 1999
- Richtlinie 93/14/EWG des Rates vom 5. April 1993 über Bremsanlagen für zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge
- SHELL, M.: Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Schnittstelle am motorisierten Zweirad. Dissertation an der TU München, München 2002
- SCHMIEDER, M., D. BLEY, M. SPICKERMANN und V. v. ZEDDELMANN: Kraftschlusspotenziale moderner Motorradreifen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Fahrzeugtechnik, Heft F9, Bergisch Gladbach 1994
- SOODOO, G. J.: Motorcycle Brake Testing. Technical Report, U.S. Department of Transportation, February 2002, Washington 2002
- SPiegel, B.: Die obere Hälfte des Motorrads. Verlag Heinrich Vogel, München 1998
- SPORNER, A. und Th. KRAMLICH: Zusammenspiel von aktiver und passiver Sicherheit beim Motorrad. Tagungsband der 3. Internationalen Motorradkonferenz, München, 11.-12. September 2000
- SPORNER, A.: Neueste Ergebnisse der Unfallforschung der Deutschen Autoversicherer mit speziellem Schwerpunkt: Bremsen bei Motorrädern. Tagungsband der 4. Internationalen Motorradkonferenz, München 16.-17. September 2002
- TOYOFUKU, Y., K. MATSUSHIMA, Y. IRIE, H. YONEZAWA und K. MIZUNO: Study on the effects of motorcycle anti-lock-braking-system for skilled and less-skilled riders: regarding braking in a turn. JSAE Review 15 (1994), S. 223-228
- VAVRYN, K., WINKELBAUER, M., ECKER, H., SPRINGER, H. und R. RUSPEKHOFER: Bremsverzögerungswerte und Reaktionszeiten von Motorradfahrern. In: Zeitschrift für Verkehrsrecht, 41. Jahrgang (1996), Heft 11, S. 376-383

WAGNER, A.: Langzeit-Bremssystem für Zweiradfahrzeuge. Tagungsband der 3. internationalen Motorradkonferenz, München, 11.-12. September 2000

WALKER, M.: Moto Guzzi. Heel Verlag, Königswinter 1994, S. 72

WEIDELÉ, A.: Untersuchungen zum Bremsverhalten von Motorrädern unter besonderer Berücksichtigung der ABS-geregelten Kurvenbremsung. Diss. TH Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 210, VDI-Verlag, 1994

WILDE, G. J. S.: Objektive und subjektive Sicherheit im Wechselwirkungsbereich Fahrer – Straße: Die Theorie der Risiko-Homöostase. In: Daimler-Benz AG (Hrsg.): Verkehrssicherheit: Fahrerverhalten und die Bedeutung der Risikatheorien für die Sicherheit im Straßenverkehr. Daimler-Benz AG, Stuttgart 1981

## Schriftenreihe

**Berichte der Bundesanstalt  
für Straßenwesen**

## Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

- F 1: Einfluß der Korrosion auf die passive Sicherheit von Pkw  
E. Faerber, G.-D. Wobben  
88 Seiten, 1993 € 12,50
- F 2: Kriterien für die Prüfung von Motorradhelmen  
W. König, H. Werner, E. Schuller, G. Beier, W. Spann  
80 Seiten, 1993 € 13,50
- F 3: Sicherheit von Motorradhelmen  
H. Zellmer  
52 Seiten, 1993 € 11,00
- F 4: Weiterentwicklung der Abgassonderuntersuchung  
Teil 1: Vergleich der Ergebnisse aus Abgasuntersuchung und Typprüfverfahren  
A. Richter, G. Michelmann  
Teil 2: Praxiserprobung des vorgesehenen Prüfverfahrens für Fahrzeuge mit Katalysator  
Chr. Albus  
80 Seiten, 1993 € 13,50
- F 5: Nutzen durch fahrzeugseitigen Fußgängerschutz  
R. Bamberg, H. Zellmer  
56 Seiten, 1994 € 11,00
- F 6: Sicherheit von Fahrradanhängern zum Personentransport  
G.-D. Wobben, H. Zahn  
64 Seiten, 1994 € 12,50
- F 7: Kontrastwahrnehmung bei unterschiedlicher Lichttransmission von Pkw-Scheiben  
Teil 1: Kontrastwahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr bei Fahrern mit verminderter Tagessehschärfe  
P. Junge  
Teil 2: Kontrastwahrnehmung in der Dämmerung bei Fahrern mit verminderter Tagessehschärfe  
M. Chmielarz, B. Siegl  
Teil 3: Wirkung abgedunkelter Heckscheiben - Vergleichsstudie -  
H. Derkum  
88 Seiten, 1994 € 14,00
- F 8: Anforderungen an den Kinnschutz von Integralhelmen  
D. Otte, G. Schroeder, J. Eidam, B. Kraemer  
32 Seiten, 1994 € 10,50
- F 9: Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen unter Straßenbedingungen  
M. Schmieder, D. Bley, M. Spickermann, V. von Zetzelmann  
40 Seiten, 1994 € 11,00
- F 10: Einsatz der Gasentladungslampe in Kfz-Scheinwerfern  
J. Damasky  
52 Seiten, 1995 € 12,50
- F 11: Informationsdarstellung im Fahrzeug mit Hilfe eines Head-Up-Displays  
H. Mutschler  
124 Seiten, 1995 € 16,50
- F 12: Gefährdung durch Frontschutzbügel an Geländefahrzeugen  
Teil 1: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern  
H. Zellmer, M. Schmid  
Teil 2: Quantifizierung der Gefährdung von Fußgängern  
H. Zellmer  
44 Seiten, 1995 € 12,00
- F 13: Untersuchung rollwiderstandsarmer Pkw-Reifen  
K. Sander  
40 Seiten, 1995 € 11,50
- F 14: Der Aufprall des Kopfes auf die Fronthaube von Pkw beim Fußgängerunfall  
Entwicklung eines Prüfverfahrens  
K.-P. Glaeser  
100 Seiten, 1996 € 15,50
- F 15: Verkehrssicherheit von Fahrrädern  
Teil 1: Möglichkeiten zur Verbesserung der Verkehrssicherheit von Fahrrädern  
C. Heinrich, E. von der Osten-Sacken  
Teil 2: Ergebnisse aus einem Expertengespräch „Verkehrssicherheit von Fahrrädern“  
F. Nicklisch  
220 Seiten, 1996 € 22,50
- F 16: Messung der tatsächlichen Achslasten von Nutzfahrzeugen  
R. Sagerer, K. Wartenberg, D. Schmidt  
52 Seiten, 1996 € 12,50

- F 17: **Sicherheitsbewertung von Personenkraftwagen**  
- Problemanalyse und Verfahrenskonzept  
D. Grunow, G. Heuser, H.J. Krüger, Chr. Zangemeister  
136 Seiten, 1996 € 17,50
- F 18: **Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS**  
J. Präckel  
84 Seiten, 1996 € 14,50
- F 19: **Schwingungsdämpferprüfung an Pkw im Rahmen der Hauptuntersuchung**  
E. Pullwitt  
44 Seiten, 1996 € 11,50
- F 20: **Vergleichsmessungen des Rollwiderstands auf der Straße und im Prüfstand**  
K. Sander  
60 Seiten, 1996 € 13,00
- F 21: **Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe**  
M. Fach  
80 Seiten, 1996 € 14,00
- F 22: **Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch bei kurzzeitiger Motorabschaltung**  
B. Bugsel, Chr. Albus, W. Sievert  
24 Seiten, 1997 € 10,50
- F 23: **Unfalldatenschreiber als Informationsquelle für die Unfallforschung in der Pre-Crash-Phase**  
F. A. Berg, U. Mayer  
171 Seiten, 1997 € 19,50
- F 24: **Beurteilung der Sicherheitsaspekte eines neuartigen Zweiradkonzeptes**  
I. Kalliske, Ch. Albus, E. Faerber  
44 Seiten, 1998 € 12,00
- F 25: **Sicherheit des Transportes von Kindern auf Fahrrädern und in Fahrradanhängern**  
I. Kalliske, D. Wobben, M. Nee  
39 Seiten, 1998 € 11,50
- F 26: **Entwicklung eines Testverfahrens für Antriebsschlupf-Regelsysteme**  
T. F. Schweers  
74 Seiten, 1999 € 11,50
- F 27: **Betriebslasten an Fahrrädern**  
M. Vötter, E. Groß, St. Esser, A. Born, M. Flamm, D. Rieck  
22 Seiten, 1999 € 10,50
- F 28: **Überprüfung elektronischer Systeme in Kraftfahrzeugen**  
R. Kohlstruck, H. Wallentowitz  
59 Seiten, 1999 € 13,00
- F 29: **Verkehrssicherheit runderneuerter Reifen**  
Teil 1: Verkehrssicherheit runderneuerter Reifen  
K.-P. Glaeser  
Teil 2: Verkehrssicherheit runderneuerter Lkw-Reifen  
Th. Auel  
54 Seiten, 2000 € 13,00
- F 30: **Rechnerische Simulation des Fahrverhaltens von Lkw mit Breitreifen**  
A. Faber  
44 Seiten, 2000 € 12,50
- F 31: **Passive Sicherheit von Pkw bei Verkehrsunfällen**  
D. Otte  
43 Seiten, 2000 € 12,50
- F 32: **Die Fahrzeugtechnische Versuchsanlage der BASt**  
Einweihung mit Verleihung des Verkehrssicherheitspreises 2000 am 4. und 5. Mai 2000 in Bergisch Gladbach  
63 Seiten, 2000 € 14,00
- F 33: **Sicherheitsbelange aktiver Fahrdynamikregelungen**  
W. Gaupp, D. Wobben, M. Horn, M. Seemann  
116 Seiten, 2000 € 17,00
- F 34: **Ermittlung von Emissionen im Stationärbetrieb mit dem Emissions-Mess-Fahrzeug**  
K. Sander, B. Bugsel, W. Sievert, Ch. Albus  
22 Seiten, 2001 € 11,00
- F 35: **Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren**  
H. Wallentowitz, D. Ehmanns, D. Neunzig, M. Weillkes, B. Steinauer, F. Bölling, A. Richter, W. Gaupp  
147 Seiten, 2001 € 19,00
- F 36: **Anforderungen an Rückspiegel von Kraftfahrzeugen**  
A. van de Sand, H. Wallentowitz, Th. Schrüllkamp  
64 Seiten, 2001 € 14,00
- F 37: **Abgasuntersuchung - Erfolgskontrolle: Ottomotor - G-Kat**  
G. Afflerbach, D. Hassel, H. Schmidt, K.-S. Sonnborn, F.-J. Weber  
32 Seiten, 2001 € 11,50

---

**F 38: Optimierte Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgängerschutzes**

F. Friesen, H. Wallentowitz, M. Philipps  
44 Seiten, 2001 € 12,50

**F 39: Optimierung des rückwärtigen Signalbildes zur Reduzierung von Auffahrunfällen bei Gefahrenbremsung**

J. Gail, M. Lorig, Chr. Gelau, D. Heuzeroth, W. Sievert  
27 Seiten, 2002 € 9,50

**F 40: Prüfverfahren für Spritzschutzsysteme an Kraftfahrzeugen**

Chr. Domsch, D. Sandkühler, H. Wallentowitz  
104 Seiten, 2002 € 16,50

**F 41: Abgasuntersuchung: Dieselfahrzeuge**

G. Afflerbach, D. Hassel, H. J. Mäurer, H. Schmidt, F.-J. Weber  
63 Seiten, 2003 € 14,00

**F 42: Schwachstellenanalyse zur Optimierung des Notausstiegssystems bei Reisebussen**

M. Krieg, G. Rüter, A. Weißgerber  
79 Seiten, 2003 € 15,00

**F 43: Testverfahren zur Bewertung und Verbesserung von Kinderschutzsystemen beim Pkw-Seitenaufprall**

R. Nett  
99 Seiten, 2003 € 16,50

**F 44: Aktive und passive Sicherheit gebrauchter Leichtkraftfahrzeuge**

J. Gail, C.-H. Pastor, M. Spiering, K. Sander, M. Lorig  
36 Seiten, 2003 € 12,00

**F 45: Untersuchung zur Abgasemission von Motorrädern im Rahmen der WMTC-Aktivitäten**

H. Steven  
46 Seiten, 2004 € 12,50

**F 46: Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit**

J. Funke, H. Winner  
33 Seiten, 2004 € 12,00

---

Zu beziehen durch:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10  
D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)