

**Jan Sandler**

**Untersuchungen zur ergonomiegerechten  
Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstellen  
von aktuellen Pkw-Bremsanlagen**

**Kraftfahrzeugtechnische Berichte**  
Herausgegeben von Prof. Dr. Klaus Augsburg  
Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik an der  
TU Ilmenau

**Band 4**

**Untersuchungen zur  
ergonomiegerechten Gestaltung der  
Mensch-Maschine-Schnittstellen von  
aktuellen Pkw-Bremsanlagen**

Jan Sendler



Universitätsverlag Ilmenau  
2012

## Impressum

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 04. Januar 2012

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Augsburg  
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Prof. Dr. med. Hans-Christoph Scholle  
(Universitätsklinikum Jena)

3. Gutachter: Dr. rer. nat. Dietrich Manstetten  
(Robert Bosch GmbH, Stuttgart)

Tag der Verteidigung: 16. Juli 2012

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

**Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

### **Herstellung und Auslieferung**

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

[www.mv-verlag.de](http://www.mv-verlag.de)

ISSN 1865-0880 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-86360-037-2 (Druckausgabe)

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012000031](http://nbn:de:gbv:ilm1-2012000031)

---

Titelfoto: Veit Henkel | Fakultät für Maschinenbau, TU Ilmenau

## ZUSAMMENFASSUNG

### **Untersuchungen zur ergonomiegerechten Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstellen von aktuellen Pkw-Bremsanlagen**

Die Rückgewinnung von kinetischer Fahrzeugenergie beim Bremsvorgang ist eine wichtige Maßnahme zur Effizienzerhöhung von Kraftfahrzeugen mit Elektromotor. Heute sind noch keine Kraftfahrzeuge im Serieneinsatz bekannt, die ausschließlich per rekuperativem Bremsmoment gebremst werden und damit vollständig auf eine Reibbremse verzichten können. Je nach maximal verfügbarem rekuperativen Bremsmoment und Bremsituation muss ein zusätzlicher Anteil an Reibbremsmoment erzeugt werden, um das Zielbremsmoment zu erreichen. Solche Bremsanlagen stellen besondere Anforderungen an die Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstellen.

Die vorliegende Arbeit ist ein Beitrag zur ergonomiegerechten Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstellen von aktuellen Pkw-Bremsanlagen. Dazu zählen insbesondere rekuperative Bremsanlagen und entkoppelte Bremsanlagen. Es sollen grundlegende Methodiken erarbeitet werden, mit denen neben den technischen Aspekten der Thematik auch physiologische und psychologische Faktoren berücksichtigt werden.

Zunächst werden Möglichkeiten zur Erfassung der Abläufe bei der Bremsbetätigung aus humanphysiologischer Sicht beschrieben. Untersucht werden Einflüsse des Cockpitdesigns, des Bremsmanövers, des Probanden und der Pedalcharakteristik auf die Betätigungsabläufe. Die Besonderheiten unterschiedlicher entkoppelter Bremsanlagen werden unter Nutzung einer speziell für solche Anwendungen entwickelten Pedalbetätigungsautomatik herausgearbeitet. Insbesondere die potenziell für den Fahrer störenden Effekte, die bei der Bremsenergieerückgewinnung (z. B. Störungen im Verzögerungsverlauf) und bei der Pedalcharakteristiksimulation (ungeeignete und/oder synthetische Pedal- und Bremscharakteristiken) auftreten können, stehen dabei im Vordergrund. Einen weiteren Schwerpunkt bilden gezielte Probandenuntersuchungen zu Fühlbarkeits- und Akzeptanzschwellen des Fahrers bei der Bremsbetätigung. Es werden Grundsatzuntersuchungen vorgestellt, die Hinweis darauf geben, welche der Besonderheiten von entkoppelten Bremsanlagen für den Fahrer spürbar und welche sogar störend sein können. Abschließend werden Empfehlungen für die Auslegung von Bremsanlagen mit Schwerpunkt auf den Pedalcharakteristiksimulatoren und Bremsmomenterzeugungssystemen von entkoppelten Bremsanlagen abgeleitet.

## ABSTRACT

### **Studies on ergonomics-oriented design of human-machine-interfaces of current passenger car braking systems.**

The recovery of the kinetic energy of the car during braking is an important measure to increase the efficiency of electric and hybrid electric vehicles. Till today, no car in series production is known that brakes exclusively via recuperative brake torque and therefore disclaims of a conventional friction brake at all. Depending on the maximum available recuperative brake torque and the braking situation an additional frictional braking moment has to be generated to reach the total brake torque demand. Such braking systems have special requirements for the design of the human-machine interface.

This thesis is a contribution to ergonomics-oriented design of human-machine-interfaces of current passenger car braking systems. In particular this includes recuperative braking systems and decoupled braking systems. Basic methodologies are developed and applied, considering physiological and psychological factors beside the technical aspects.

First, methods to capture the processes during the brake actuation are described from the human physiological point of view. It examines the influences of cockpit designs, braking maneuvers, driver and brake pedal characteristics on the actuation processes. The special characteristics of different decoupled braking systems are evaluated using a purpose-built pedal actuation robot. In particular, potentially perturbations which may occur during regenerative braking (e. g. disturbances in the deceleration behavior) and the pedal characteristic simulation (unsuitable and/or synthetic pedal and braking characteristics) are in the focus of attention. Another focus deals with customer clinics regarding tactility and acceptance thresholds of the driver during the brake actuation. Basic examinations will be presented that indicate, which characteristics of the brake feel of decoupled brake systems can be recognized or even be disturbing for the driver. Finally, recommendations for the design of pedal characteristic simulators and decoupled brake systems will be given.

---

## VORWORT

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik der Technischen Universität Ilmenau entstanden.

Mein Dank gilt in erster Linie dem Leiter des Fachgebiets, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Augsburg, der es mir ermöglicht hat, dieses Promotionsvorhaben durchzuführen. Bei ihm fand ich stets große Unterstützung sowie Rückhalt bei der Realisierung dieser Arbeit.

Erwähnen möchte ich auch die Herren Prof. Dr. med. Hans-Christoph Scholle und Dr. rer. nat. Dietrich Manstetten, die die Begutachtung der Arbeit übernommen haben.

Bei Herrn Dr. med. Nikolaus Peter Schumann vom Funktionsbereich Motorik, Pathophysiologie und Biomechanik des Universitätsklinikums Jena bedanke ich mich herzlich für die unverzichtbare Unterstützung bei der Analyse der muskulären Beanspruchungen mittels EMG und die sehr hilfreichen Diskussionen.

Die Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern der Robert Bosch GmbH im Rahmen von zahlreichen Industrieprojekten war immer sehr angenehm und konstruktiv. Ihnen gehört nicht zuletzt auch mein Dank für die Zurverfügungstellung von Ausrüstung.

Allen Mitarbeitern des Fachgebiets Kraftfahrzeugtechnik danke ich für das angenehme Arbeitsumfeld. Herrn Michael Posselt verdanke ich viele anregende Gespräche und Herrn Viktor Beez mindestens ebenso viele kreative Ideen und Lösungen bei der mechanischen Realisierung von Versuchsaufbauten. Bei den Herren Stefan Heimann, Maik Hoppert und Stefan Kirchner fand ich jederzeit intensive fachliche, aber auch moralische Unterstützung. Für Letztere bedanke ich mich auch ganz herzlich bei Frau Madlen Schmelcher.

Wertvolle Hilfe habe ich durch viele Studenten erfahren, die entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Dies gilt insbesondere für die Herren Christoph Noack, Till Biedermann, Frank Auler, Markus Volkmann und Thomas Löhr.

Ein besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. Ralf Trutschel, ohne den ich dieses Unterfangen vermutlich nicht begonnen hätte und der mich die letzten Jahre über stetig motiviert hat.

Sandra, Elena, Alba und Ida danke ich für ihre unerschöpfliche Geduld!

Jan Sandler

## INHALT

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation.....	1
1.2	Terminologie .....	3
1.3	Ziel, Inhalt und Aufbau der Arbeit.....	8
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung</b> .....	<b>12</b>
2.1	Bremspedalgefühl und Bremsbetätigung.....	12
2.2	Elektro- und Hybridelektrofahrzeuge .....	17
2.3	Rekuperation .....	19
2.4	Betätigungselemente.....	22
2.5	Pedalcharakteristiksimitatoren.....	24
2.6	Forschungsbedarf .....	26
<b>3</b>	<b>Bedienergonomie am Fahrer Arbeitsplatz</b> .....	<b>28</b>
3.1	Betätigungsabläufe unter physiologischen Aspekten.....	28
3.1.1	Versuchsdesign.....	28
3.1.2	Ablauf .....	35
3.1.3	Ergebnisse.....	36
3.2	Gewöhnungsvorgänge unter psychologischen Aspekten .....	55
3.2.1	Versuchsdesign.....	55
3.2.2	Ablauf .....	57
3.2.3	Ergebnisse.....	58
<b>4</b>	<b>Entkoppelte Bremsanlagen</b> .....	<b>61</b>
4.1	Experimentelle Analyse von Fahrzeugen mit entkoppelten Bremsanlagen .....	61
4.1.1	Bremsanlage entkoppelt, radindividuelle Druckmodulation, nasser Pedalcharakteristiksimitator.....	61
4.1.2	Bremsanlage entkoppelt, zentrale Druckmodulation, trockener Pedalcharakteristiksimitator.....	68
4.1.3	Gegenüberstellung der Pedal- und Bremscharakteristiken von entkoppelten und gekoppelten Bremsanlagen.....	71
4.2	Synthetische Erzeugung von Pedalcharakteristiken mit Pedalcharakteristiksimitatoren.....	79



---

<b>5</b>	<b>Probandenfahrversuche zu Fühlbarkeits- und Akzeptanzschwellen ...</b>	<b>85</b>
5.1	Versuchsreihe 1 - „Gekoppelte Bremsanlagen mit Rekuperation: Grundsatzuntersuchungen zu Fühlbarkeitsschwellen“ .....	86
5.1.1	Versuchsdesign .....	86
5.1.2	Ablauf .....	87
5.1.3	Ergebnisse.....	88
5.2	Versuchsreihe 2 - „Entkoppelte Bremsanlagen mit und ohne Rekuperation: Akzeptanz von charakteristischen Merkmalen“ .....	90
5.2.1	Versuchsdesign .....	91
5.2.2	Ablauf .....	97
5.2.3	Ergebnisse.....	97
<b>6</b>	<b>Gekoppelte Bremsanlagen ohne Rekuperation - MMS und Parameterstabilität .....</b>	<b>101</b>
6.1	Einflüsse auf den Pedalweg (p-s-Zusammenhang) .....	103
6.2	Einflüsse auf die Pedalkraft (p-F-Zusammenhang) .....	108
6.3	Einflüsse auf die Fahrzeugverzögerung (p-b-Zusammenhang).....	109
<b>7</b>	<b>Empfehlungen für die Auslegung von entkoppelten Bremsanlagen..</b>	<b>113</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>118</b>
<b>9</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>122</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>126</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>134</b>

## ABKÜRZUNGEN

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
ABS	Antiblockiersystem (auch: ABV - automatischer Blockierverhinderer)
BA	Bremsanlage
BKV	Bremskraftverstärker
BRIC-Staaten	Brasilien, Russland, Indien, China
DF OSG	Dorsalflexoren des oberen Sprunggelenks
EMG	Elektromyogramm bzw. Elektromyografie
ESC	Electronic Stability Control (Elektronische Stabilitätskontrolle; häufig auch: ESP)
EV	Electric Vehicle - Elektrofahrzeug
Fzg.	Fahrzeug
HA	Hinterachse (eines Kfz)
HEV	Hybrid Electric Vehicle - Hybrid-Elektrofahrzeug
HK	Heißkompressibilität von Bremsbelägen
ICE	Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor)
Kfz	Kraftfahrzeug
KK	Kaltkompressibilität von Bremsbelägen
M.	Musculus (Muskel)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
Nkw	Nutzkraftwagen
NSRA	National Swedish Road Administration
PF OSG	Plantarflexoren des oberen Sprunggelenks
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
RZ	Radbremszylinder
SOC	State of Charge (Ladezustand eines Akkumulators)
SUV	Sport Utility Vehicle (Geländelimousine)
THZ	Tandemhauptbremszylinder
VA	Vorderachse (eines Kfz)
Van	Abgeleitet vom Wort Caravan: Pkw mit erhöhter Karosserie, Hochdachkombis, Kleinbusse

## FORMELZEICHEN

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\mu$	-	Reibwert
$A_K$	$\text{mm}^2$	wirksame Kolbenfläche
$b$	$\text{m/s}^2$	Fahrzeugverzögerung
$C^*$	-	Bremsenkennwert bzw. innere Übersetzung der Radbremse
$c_p$	$\text{N/m}$	Gradient Bremspedalkraft zu Bremspedalweg (Steifigkeit)
$F$	$\text{N}$	Bremspedalkraft
$F_{B,HA}$	$\text{N}$	Bremskraft an der Hinterachse
$F_{B,VA}$	$\text{N}$	Bremskraft an der Vorderachse
$F_{Sp}$	$\text{N}$	Spannkraft
$G$	$\text{N}$	Gewichtskraft
$M$	$\text{Nm}$	Moment oder Bremsmoment
$M_{\text{gen}}$	$\text{Nm}$	Bremsmoment; generiert über elektromechanischen Wandler im Generatorbetrieb
$M_{\text{reib}}$	$\text{Nm}$	Bremsmoment; generiert über Reibbremsanlage
$n$	$1/\text{s}$	Drehzahl
$p$	$\text{bar}$	Bremsdruck
$P$	$\text{W}$	Leistung
$r_m$	$\text{mm}$	mittlerer Reibradius
$s$	$\text{mm}$	Bremspedalweg
$t$	$\text{s}$	Zeit
$T$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
$T_{\text{Belag}}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur Bremsbelag
$T_{\text{Scheibe}}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur Brems Scheibe (mittlerer Reibring, Topfseite)
$v_{\text{Bet}}$	$\text{mm/s}$	Pedalbetätigungsgeschwindigkeit
$v_{\text{Fzg}}$	$\text{km/h}$	Fahrzeuggeschwindigkeit
$W_p$	$\text{Nm}$	Am Bremspedal bei der Pedalbetätigung aufzubringende Arbeit
$z$	-	Störgröße
$\Delta t_{\text{bx}_{-y}}$	$\text{ms}$	Latenzzeit zwischen Pedalweg $s$ und resultierender Fahrzeugverzögerung $b=x \text{ m/s}^2$ bei dynamischer Pedalbetätigung (Betätigungsgeschwindigkeit $v_{\text{Bet}}=y \text{ mm/s}$ )

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\Delta t_{p_{x-vy}}$	ms	Latenzzeit zwischen Pedalweg $s$ und resultierendem Bremsdruck $p=x$ bar bei dynamischer Pedalbetätigung (Betätigungsgeschwindigkeit $v_{Bet}=y$ mm/s)

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Am deutschen Personenverkehrsaufwand nahm im Jahr 2007 der motorisierte Individualverkehr (MIV) mit 885,4 Mrd. Personenkilometern (Pkm) bzw. einem Anteil von 80,1 % den mit Abstand größten Anteil ein. Im Jahr 2005 emittierte ein durchschnittlicher Pkw  $\approx 144$  g des Treibhausgases  $\text{CO}_2$  je Pkm<sup>1</sup>. Der Anteil des Straßenverkehrs an der  $\text{CO}_2$ -Gesamtemission betrug im Jahr 2007 in Deutschland mit 144,1 Mio. t etwa 17,1 %. [43] Der weltweite Kraftfahrzeugbestand betrug 2009 mehr als 965 Mio. Fahrzeuge bei deutlich steigender Tendenz insbesondere in den BRIC-Staaten [85].

Diese Zahlen zeigen deutlich auf, weshalb es unerlässlich ist, die Effizienz von Kfz kontinuierlich zu steigern und damit den Ressourcenverbrauch einerseits und die Schadstoffemission andererseits immer weiter zu reduzieren. Die sogenannte Bremsenergierückgewinnung, also die Umwandlung von kinetischer Fahrzeugenergie in eine Energieform, die mindestens kurzzeitig zwischengespeichert werden kann, stellt eine Möglichkeit zur Effizienzsteigerung dar. Die so rückgewonnene Energie reduziert den Anteil der von außen zum Zweck des Fahrzeugbetriebs zuzuführenden Energie. Um die zwischengespeicherte Energie wieder in den Antriebsstrang einzuspeisen, greift man heute in aller Regel auf elektrische Antriebsmaschinen zurück. Bei solchen Fahrzeugen handelt es sich dann entweder um Hybrid-Elektrofahrzeuge<sup>2</sup> (HEV) oder um reine Elektrofahrzeuge (EV).

Während des Vorgangs der Energierückgewinnung - also der Umwandlung der kinetischen Fahrzeugenergie in z. B. elektrische Energie - wird ein generatorisches Bremsmoment erzeugt. Im Idealfall würde die kinetische Fahrzeugenergie beim Bremsvorgang vollständig in wieder nutzbare Energieformen umgewandelt werden. In der Praxis steht diesem Anspruch neben Wirkungsgradverlusten auch das maximale, vom jeweiligen elektromechanischen Wandler aufbringbare, Bremsmoment entgegen (vgl. auch Bild 13, S. 19). Der Betrag des maximalen generatorischen Bremsmoments ist u. a. abhängig von den konstruktiven Parametern des elektromechanischen Wandlers (maximale Leistungs- und Stromaufnahme, Wirkungsgrade) und dessen Betriebszustand (Drehzahl) sowie der verfügbaren Kapazität des Energiespeichers (SOC).

---

<sup>1</sup> Angenommene durchschnittliche Auslastung: 1,5 Personen/Pkw; indirekte Emissionen bei der Energieträgererzeugung berücksichtigt

<sup>2</sup> Fahrzeuge, die über einen Elektromotor und einen Verbrennungsmotor verfügen

Heute sind noch keine Kfz im Serieneinsatz bekannt, die auf eine Reibbremse verzichten können. Je nach maximal verfügbarem generatorischen Bremsmoment muss ein zusätzlicher Anteil an Reibbremsmoment erzeugt werden, um das Gesamt-Zielbremsmoment zu erreichen. Im einfachsten Fall verfügt das Fahrzeug über eine konventionelle *gekoppelte* hydraulische Reibbremsanlage. Der Zusammenhang zwischen der Bremsanforderung (Input in das Bedienelement, z. B. Bremspedal) und der Reibbremswirkung ist also in bestimmten Grenzen (vgl. Kapitel 6) fest vorgegeben. Abhängig vom Fahrzeugzustand wird diesem Reibbremsmoment das generatorische Bremsmoment überlagert. Diese Ausführungsvariante bedingt, dass der Zusammenhang zwischen Bremswunsch und Bremswirkung nicht konstant ist, sondern sich z. B. abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit ändert. Der Betrag eines auf diese Weise aufgetragenen maximalen generatorischen Bremsmoments und damit der Anteil der rückgewinnbaren kinetischen Energie ist stark limitiert, da der Fahrer zu hohe Änderungen an der Bremswirkung als störende Unstetigkeiten empfinden würde. Bei starker Bremsbetätigung käme hinzu, dass bereits das Reibbremsmoment ausreicht, um die Reifen an ihre Haftgrenze zu bringen. Eine weitere Erhöhung würde zu blockierenden Rädern und damit zu einem ABS-Regeleingriff führen. Es darf in diesem Fall also kein zusätzliches generatorisches Bremsmoment aufgebaut werden.

*Entkoppelte Bremsanlagen* stellen einen Ausweg aus diesem Konflikt dar. Hier wird die Bremswirkung der Reibbremsen energetisch von der Bremsbetätigung entkoppelt. Bei konstanter Bremsbetätigung wird nur soviel Reibbremsmoment aufgebaut, wie zusätzlich zum generatorischen Bremsmoment nötig ist, um das Gesamt-Zielbremsmoment zu erzeugen (*kooperative Bremsanlage*). Der Fahrer merkt im Idealfall nicht, dass unterschiedliche Bremsmomentenerzeugungssysteme an diesem Vorgang beteiligt sind. Aufgrund der energetischen Entkopplung von Bremsbetätigung und Bremswirkung benötigen solchen Bremsanlagen in der Regel einen sogenannten Pedalcharakteristiksimulator. Dieser stellt dem Fahrer eine konstruktiv vorgegebene synthetische Pedalcharakteristik zur Verfügung. Heute orientiert man sich dabei normalerweise an jenen von konventionellen *gekoppelten Bremsanlagen*. Die Nachbildung gelingt oft jedoch noch nicht zufriedenstellend. Grundsätzlich bietet sich außerdem die Möglichkeit, die MMS der Bremsanlage völlig neu und frei zu gestalten, was zusätzliche Fragen aufwirft: Wie sollte das Bedienelement grundsätzlich ausgeführt sein? Ist ein Bremspedal in herkömmlicher Ausführung aus ergonomischer Sicht bereits das Optimum? Welche Betätigungswege und -kräfte sind vorteilhaft? Welche zusätzlichen Funktionen sollte ein Bremsbedienelement erfüllen? Sollte es haptische Rückmeldungen über bestimmte Fahrzeugzustände, wie z. B. einen ABS-Regeleingriff, liefern können? Sollten die Pedal- und Bremscharakteristik, die Funktionalität des Bedienelements und die Fahrerarbeitsplatzergo-

nomie personalisierbar sein? So stellt eine eher kleine, zierliche Person andere Anforderungen als eine große und kräftige Person und ein junger, agiler Mensch wiederum andere Anforderungen als ein älterer Mensch mit körperlichen Einschränkungen. Die sich im demografischen Wandel befindende alternde Gesellschaft wird hier neben der fortschreitenden technischen Weiterentwicklung sicherlich ein Treiber für ein Umdenken bei der Bedienbarkeit von Kfz sein.

## 1.2 Terminologie

Nachfolgend werden wesentliche im Rahmen dieser Arbeit verwendete Begriffe definiert.

**Bremsanlage** Nach [60]: Das System bestehend aus Bremsen, Übertragungs- und Betätigungseinrichtung bezeichnet man als Bremsanlage.

Pkw-Bremsanlagen lassen sich folgendermaßen einteilen:

Nach Bauart:

- Betriebs-Bremsanlagen: Verringern oder Halten der Fahrzeuggeschwindigkeit; das Fahrzeug in den Stillstand bringen und temporär im Stillstand halten
- Hilfs-Bremsanlage: bei Versagen der Betriebs-Bremsanlage, deren Aufgabe zumindest mit geminderter Wirkung stufenlos dosierbar erfüllen
- Feststell-Bremsanlage: Fahrzeug im Stillstand halten

Nach Funktionsweise:

- Muskelkraft-Bremsanlage: ausschließlich die Muskelkraft des Fahrers wird zur Bremskrafterzeugung verwendet → energetisch *gekoppelte Bremsanlage*
- Hilfskraft-Bremsanlage: die Muskelkraft des Fahrers wird durch einen Bremskraftverstärker (BKV) mit Hilfsenergie verstärkt; übliche Variante in Pkws und leichten Nkws → energetisch *gekoppelte Bremsanlage*
- Fremdkraft-Bremsanlage: ausschließlich Fremdkraft wird zur Bremskrafterzeugung verwendet; übliche Variante für Nkws → energetisch *entkoppelte Bremsanlage*
- Hybrid-Bremsanlage: Kombination aus *gekoppelter* und *entkoppelter Bremsanlage*; Ausführungsbeispiel: Vorderachse ist mit hydraulischer Hilfskraft-Bremsanlage und Hinterachse mit elektromechanischer Fremdkraft-Bremsanlage ausgestattet → energetisch *teilentkoppelte Bremsanlage*

Nachfolgend werden ausgewählte Ausführungsformen in eigenen Abschnitten beschrieben.

Entkoppelte Bremsanlage Im Gegensatz zu konventionell *gekoppelten* Systemen besteht bei einem *entkoppelten* System keine energetische Kopplung von Betätigungs- und Übertragungseinrichtung. Man spricht bei *entkoppelten* Systemen allgemein auch von X-by-Wire- und bei Bremssystemen im Speziellen von Brake-by-Wire-Systemen, da die Übertragung des eigentlichen Betätigungswunsches ausschließlich elektronisch, also „per Draht“, als Information an ein Steuergerät geschieht (Bild 1). Um die Bremsfunktion zu gewährleisten, ist eine Fremdkraft erforderlich. Die Form des Energieflusses zwischen Energieversorgung, Übertragungseinrichtung und Radbremse kann variieren. Wird lediglich eine Achse<sup>3</sup> *entkoppelt*, während die zweite Achse konventionell gekoppelt abgebremst wird, spricht man von einem *teilentkoppelten* System. Der Anspruch bei der Entwicklung solcher Bremsanlagen liegt aus Sicht der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) darin, dass sich die Mensch-Maschine-Schnittstellen (MMS) authentisch und konsistent anfühlen, einen vertrauensereckenden Eindruck hinterlassen und eine intuitive Bedienung der Bremsfunktion ermöglichen.

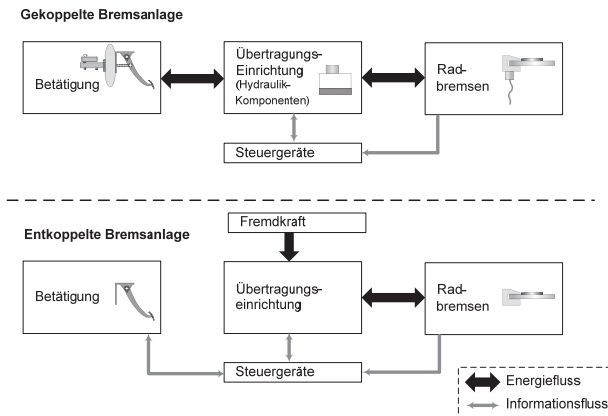


Bild 1: Schematische Darstellung: *gekoppelte* und *entkoppelte* Bremsanlagen ohne Rekuperationsmöglichkeit; nach [15]

Rekuperative Bremsanlage Durch geeignete technische Maßnahmen ist es möglich, mit einer solchen Bremsanlage kinetische Fahrzeugenergie teilweise oder komplett in eine speicherbare Energieform zu überführen, zu speichern und später wieder für den Betrieb des Fahrzeugs nutzbar zu machen → *Bremsenergie-rückgewinnung*, *Rekuperation* (vgl. Kapitel 2.3). *Rekuperative Bremsanlagen* können *gekoppelt*, *entkoppelt* oder *teilentkoppelt* ausgeführt sein.

<sup>3</sup> Des zweiachsigen Fahrzeugs



Kooperative Bremsanlage und Verblenden Eine *entkoppelte* oder *teilentkoppelte Bremsanlage*, die das Einregeln von zwei verschiedenen Bremsmomenterzeugungssystemen auf ein Gesamt-Sollmoment ermöglicht, welches dem Abbremswunsch des Fahrers entspricht, ist eine *kooperative Bremsanlage*. Ziel ist es, dass am Bedienelement der Bremsanlage kaum oder nicht spürbar ist, dass mehr als ein einzelnes Bremsmomenterzeugungssystem an diesem Vorgang beteiligt sind. In der Regel handelt es sich im Pkw bei einer *kooperativen Bremsanlage* gleichzeitig um eine *rekuperative Bremsanlage*.

Im Zusammenhang mit dem Einregeln der unterschiedlichen Bremsmomenterzeugungssysteme zu einem Gesamtmoment spricht man von „*Verblenden*“ oder von „*brake blending*“. Treten beim Einregeln Abweichungen vom Gesamt-Sollmoment, z. B. in Form von Unstetigkeiten im Verzögerungsverlauf, auf, spricht man von „*Verblendungsfehlern*“. Bild 2 zeigt einen Verblendungsvorgang für eine kooperative Bremsanlage, bei der eine herkömmliche hydraulische Reibbremseinrichtung und eine elektrogeneratorische Bremseinrichtung miteinander verblendet werden.

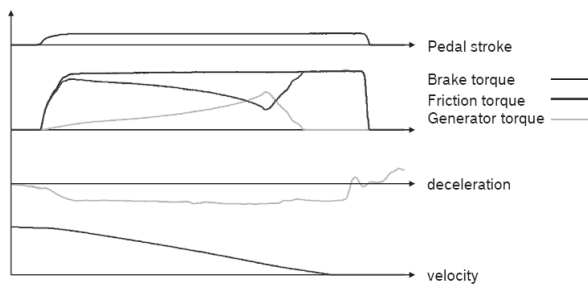


Bild 2: Verblendungsvorgang, gemessen im Fahrzeug [34]

## Bremssituationen

Zielbremsung *moderate Abbremmung* bis zum Stillstand des Fahrzeugs

Anpassungsbremmung *moderate Abbremmung* bis auf eine bestimmte Zielgeschwindigkeit

Notbremsung *Vollbremsung* in einer Notsituation; nahezu schlagartige Bremsbetätigung

Weiterhin sind noch folgende Situationen zu nennen, in denen die Bremswirkung jedoch nicht zur Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit genutzt wird:

Geschwindigkeit halten Bremsbetätigung, mit der die momentane Fahrzeuggeschwindigkeit konstant gehalten wird; typischerweise erforderlich bei Fahrten im Gefälle

Fahrzeug im Stillstand halten Bremsbetätigung, mit der das Fahrzeug am Losrollen gehindert wird; typischerweise erforderlich beim Halten am Hang

## Bremsbetätigung

Moderate Abbremsung „Alltags-Abbremsung“ mit Fahrzeugverzögerungen<sup>4</sup> von etwa  $b < 2 \text{ m/s}^2$  (max.  $b = 4 \text{ m/s}^2$ ) und Pedalbetätigungsgeschwindigkeiten von etwa  $v_{\text{Bet}} < 200 \text{ mm/s}$  ([69], [80], vgl. auch [32])

Vollbremsung Abbremsung, bei der sich alle Räder in der ABS-Regelung befinden bzw. blockieren, wenn kein ABS-System vorhanden ist

Der Bereich zwischen *moderater Abbremsung* und *Vollbremsung* wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

**Bremspedalgefühl** Der Begriff *Bremspedalgefühl* bezieht sich auf die subjektive Wahrnehmung des Fahrers. In diese spielen neben der Pedal- und der Bremscharakteristik weitere Einflussgrößen hinein, wie die Physiologie des Fahrers (Ausprägung d. Skelettmuskulatur → aktiver Bewegungsapparat, Körpermaße → passiver Bewegungsapparat), die Erfahrung und die Erwartungshaltung, aber auch die Ergonomie des Fahrerarbeitsplatzes.

**Pedalcharakteristik** Die Pedalcharakteristik beschreibt die rein objektiven charakteristischen Kenngrößen und Kennlinien des Bedienelements *Bremspedal*, die einen Einfluss auf die Wahrnehmung haben (vgl. Bild 3 (links), Bild 4, Abschnitt „Physikalisches Ersatzmodell für die Pedal- und Bremscharakteristik“).

**Bremscharakteristik** Die Bremscharakteristik beschreibt die rein objektiven charakteristischen Kenngrößen und Kennlinien der Hilfs- oder Betriebsbremsanlage beim Bremsvorgang, die einen Einfluss auf die Wahrnehmung haben (vgl. Bild 3, Bild 5, Abschnitt „Physikalisches Ersatzmodell für die Pedal- und Bremscharakteristik“). Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Zusammenhang zwischen der Betätigung des Bedienelements und der Fahrzeugreaktion (Fahrzeugverzögerung, Fahrzeugbewegungen ...).

---

<sup>4</sup> Untersuchungen ([32], [69], [80]) haben gezeigt, dass in realen Bremsituationen die Fahrzeugverzögerung die vom Fahrer eingeregelter Zielgröße ist und folglich die Größen Pedalweg und Pedalkraft charakteristikabhängig adaptiert werden. Die Zielverzögerung ist dabei weitgehend invariant von der *Pedal-* und *Bremscharakteristik*.

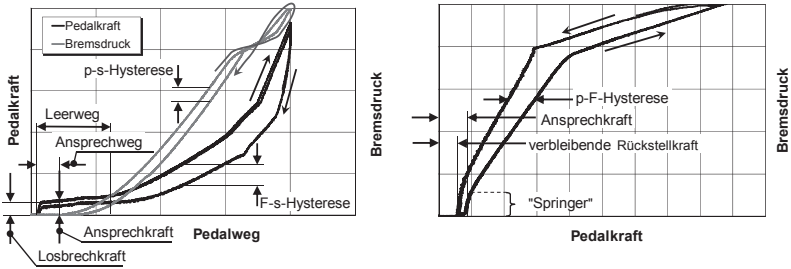


Bild 3: Zusammenhang zwischen Pedalkraft, Pedalweg und Bremsdruck - ausgewählte Kenngrößen; nach [73]

**Physikalisches Ersatzmodell für die Pedal- und Bremscharakteristik**  
 Näherungsweise gültig für Komfortbremsungen (*moderate Abbremsung*) werden die Rückstellkraft, der progressive Kurvenverlauf und die *Kraft-Hysteresese* der Pedalcharakteristik mit dem Teilmodell *Pedal* (Bild 4), der p-s-Zusammenhang mit dem Teilmodell *Bremse* (Bild 5) und der b-p-Zusammenhang mit dem Teilmodell *Fahrwerk + Aufbau* (hier nicht dargestellt) beschrieben [80].

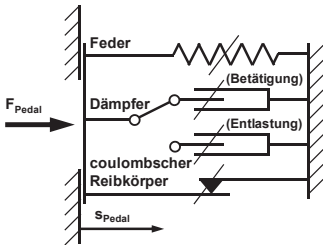


Bild 4: Teilmodell *Pedal*; nach [80]

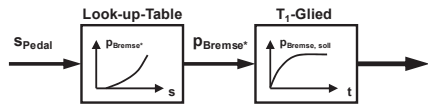


Bild 5: Teilmodell *Bremse*; nach [80]

Vereinfachungen: keine Temperatur-, Reibwert- und Volumenaufnahmeänderungen, keine ABS- und ESC-Regeleinrichtungen, keine Unstetigkeiten, wie sie bei *rekuperativen Bremsanlagen* auftreten können.

### Kräfte

Es wird ausschließlich das Merkmal „spürbare Kraft“<sup>5</sup> berücksichtigt.

<sup>5</sup> Ein einzelnes Sinnesorgan kann zwischen unterschiedlichen Reizquellen unterscheiden. Grunwald und Beyer [31] differenzieren zwischen „spürbarer Kraft“ (Kraftniveau bei einer Betätigung) und „spürbarer Mechanik“ (Laufeigenschaften einer Mechanik). Trutschel [80] ordnet den Begriff der „spürbaren Kraft“ der makroskopischen Kraft-Weg-Charakteristik und den Begriff der „spürbaren Mechanik“ dem Kraft-Weg-Zusammenhang im mikroskopischen Bereich zu.

**Fußkraft** Die Fußkraft entspricht der vom Fahrer mit dem Fuß in das Bremspedal eingeleiteten Betätigungskraft. Der Ort<sup>6</sup> der Krafteinleitung und der Winkel, unter dem die Kraft in das Pedal eingeleitet wird, können während einer einzigen Pedalbetätigung, ebenso wie zwischen unterschiedlichen Betätigungsvorgängen oder unterschiedlichen Fahrern variieren. Bild 6 illustriert anhand eines Beispiels, dass der Vektor der Fußkraft erheblich vom Vektor der Pedalkraft abweichen kann.

**Pedalkraft** Die Pedalkraft entspricht dem bei der Pedalbetätigung technisch wirksamen Kraftäquivalent. Der Vektor der Pedalkraft steht senkrecht auf einer Geraden, die gedanklich durch die Mittelachse des Pedaldrehpunkts verläuft und tangential an das Pedalpad angelegt ist. Der Krafteinleitungspunkt ist identisch mit dem Berührungspunkt zwischen der gedachten Geraden und dem Pedalpad. Außerdem liegt der Vektor der Pedalkraft parallel zur x-z-Ebene des *fahrzeugfesten Koordinatensystems*.

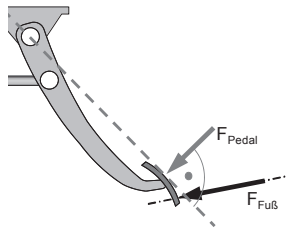


Bild 6: Definitionen Fußkraft (Betätigungskraft) und Pedalkraft (technisch wirksames Kraftäquivalent); nach [80]

**Fahrzeugfestes Koordinatensystem** Das fahrzeugfeste Koordinatensystem wurde abweichend zur Definition nach DIN 70000 [23] gewählt. Das orthogonale Rechtssystem hat den Ursprung vor dem Fahrzeug. Die x-Achse ist waagrecht nach hinten gerichtet und befindet sich in der Fahrzeuginnerebene<sup>7</sup>. Die y-Achse steht senkrecht auf der Fahrzeuginnerebene und zeigt nach rechts, die z-Achse zeigt nach oben.

### 1.3 Ziel, Inhalt und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist ein Beitrag zur ergonomiegerechten Gestaltung der MMS von aktuellen Pkw-Bremsanlagen. Dazu zählen insbesondere Bremsanla-

<sup>6</sup> Mit dem Fuß wird die Kraft flächig in das Bremspedal eingeleitet (flächiger Kontakt zwischen Fuß und Pedalpad). Zur vereinfachten Betrachtung wird angenommen, dass die gesamte Fußkraft im Schwerpunkt der Krafteinleitung eingebracht wird.

<sup>7</sup> Nach DIN 70000 [23]: fahrzeugfeste Ebene, die im statischen Bezugszustand senkrecht zur Fahrbahnebene steht und durch die Mitte der Spurweite der Vorder- und Hinterachse verläuft

gen mit Bremsenergieerückgewinnung (*rekuperative Bremsanlagen*) und *entkoppelte Bremsanlagen*, aber auch konventionelle *gekoppelte Bremsanlagen* ohne Bremsenergieerückgewinnung. Es sollen grundlegende Methodiken erarbeitet werden, mit denen neben den technischen Aspekten der Thematik auch physiologische und psychologische Faktoren berücksichtigt werden.

**Kapitel 2** gibt eine Zusammenfassung des aktuellen Stands der Forschung. Hier werden offene Fragestellungen der aktuellen Forschungstätigkeit herausgearbeitet und im Anschluss daraus der aktuelle Forschungsbedarf abgeleitet.

Ein Großteil der Aktivitäten bei der Fahrzeugentwicklung zielt darauf ab, dem Fahrer eine optimale Bedienbarkeit zu ermöglichen und in vielen Fällen auch ein bestimmtes Fahrerlebnis zu bieten<sup>8</sup>. Die Erfassung und Beschreibung der physiologischen und psychologischen Abläufe bei der Fahrzeugbedienung ist sehr komplex und heute noch nicht ausreichend erforscht. Möglichkeiten zur Erfassung der Betätigungsabläufe werden in **Kapitel 3** beschrieben. Es wird eine *stationäre Versuchsumgebung* vorgestellt, mit der der Fahrerarbeitsplatz von Pkws funktional abgebildet werden kann. Diese Vorgehensweise gestattet es, den Fahrerarbeitsplatz hinsichtlich der geometrischen Anordnung und der Austauschbarkeit der Bedienelemente schnell und umfangreich zu variieren. Des Weiteren ermöglicht erst die spezielle Gestaltung der *stationären Versuchsumgebung* die Anwendbarkeit einer umfassenden messtechnischen Ausrüstung, wie sie in diesem Kapitel vorgestellt wird. Für weitere Untersuchungen finden speziell ausgerüstete Fahrzeuge Anwendung (*mobile Versuchsumgebung*). Im Rahmen von Probandenstudien werden u. a. die Einflüsse des Cockpitdesigns, des Bremsmanövers und des Probanden auf die Betätigungsabläufe betrachtet, die wiederum aufgeschlüsselt werden in Bewegungsabläufe, Muskelaktivitäten und Abstütz- und Bedienkräfte (physiologische Aspekte). Der Untersuchungsschwerpunkt liegt dabei auf der unteren Extremität (Fuß, Bein, Hüfte). Der Thorax (Oberkörper) und die obere Extremität (Arme, Schultern) werden jedoch ebenfalls berücksichtigt. Darüber hinaus werden auch psychologische Aspekte untersucht.

Die Besonderheiten unterschiedlicher *entkoppelter Bremsanlagen* werden in **Kapitel 4** herausgearbeitet. Insbesondere die potenziell für den Fahrer störenden Effekte, die bei der Bremsenergieerückgewinnung<sup>9</sup> und bei der Pedal- und Bremscharakteristiksimulation<sup>10</sup> auftreten können, stehen dabei im Vordergrund. Gezielt wird auch das Zeitverhalten beim Bremsvorgang ausgewertet. Im Kapitel 4.1 werden komplette Bremsanlagen in Serienfahrzeugen experi-

---

<sup>8</sup> Z. B. bei sportlich ausgelegten Fahrzeugen: die Emotionen ansprechen

<sup>9</sup> Unstetigkeiten im Verzögerungsverlauf, aber auch im Pedalkraft- und Pedalwegverlauf denkbar

<sup>10</sup> Ungeeignete und/oder synthetische *Pedal- und Bremscharakteristiken*

mentell analysiert. Ausgewählt wurden dafür Fahrzeuge mit unterschiedlichen Bremsanlagenkonzepten (radindividuelle vs. zentrale Druckmodulation), Simulatorkonzepten (nass vs. trocken), Antriebskonzepten (Front- vs. Heckantrieb) und mit unterschiedlich viel Rekuperationspotenzial (hoch vs. gering vs. ohne). Der Pedalcharakteristiksimulator einer ausgewählten *entkoppelten Bremsanlage* wird in Kapitel 4.2 isoliert von den übrigen Komponenten der Bremsanlage experimentell und simulativ beleuchtet.

Nachdem im vorangegangenen Kapitel herausragende Effekte *entkoppelter Bremsanlagen* extrahiert und objektiviert werden, umfasst das **Kapitel 5** gezielte Untersuchungen zu Fühlbarkeits- und Akzeptanzschwellen des Fahrers im Rahmen von Probandentests. Hier werden Grundsatzuntersuchungen vorgestellt, die dazu geeignet sind, Hinweis darauf zu geben, welche der Besonderheiten von *entkoppelten* und *kooperativen Bremsanlagen* für den Fahrer spürbar und welche sogar störend sein können. Die Fahrstudien finden im Realfahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr statt. So ist eine hohe externe Validität<sup>11</sup> gesichert. Eine gleichzeitig hohe interne Validität<sup>12</sup> wird durch die Verwendung eines speziell umgerüsteten Versuchsfahrzeugs mit variabler Pedal- und Bremscharakteristik, welches ein in Kapitel 1.2 beschriebenes physikalisches Ersatzmodell umsetzt, sichergestellt. Zur Datengewinnung und Versuchsauswertung wird ein Mix aus unterschiedlichen Methoden der Befragung, Beobachtung und Vermessung herangezogen. Die Ergebnisse sollen eine Hilfestellung bei der Auslegung solcher Bremsanlagen bieten. Sie sind übertragbar für Fahrzeuge mit *gekoppelter rekuperativer Bremsanlage*, bei der das generatorische Bremsmoment dem Reibbremsmoment ohne Verblendung überlagert wird. Der Betrag des generatorischen Bremsmoments wird dabei von den Akzeptanzschwellen der Fahrer limitiert. Wird er zu hoch gewählt, erhält das Fahrzeug schlechte Beurteilungen. Wird er zu niedrig gewählt, erhöht das unnötig die CO<sub>2</sub>-Emission des Fahrzeugs.

Auch die Pedal- und die Bremscharakteristik von Fahrzeugen mit *gekoppelter* vakuumverstärkter hydraulischer Bremsanlage stellen keinen statischen Zustand dar. Die Ursachen dafür sind jedoch andere als bei Fahrzeugen mit *rekuperativer* oder *kooperativer Bremsanlage*. Herausgehobene Eigenschaften der Pedal- und Bremscharakteristik von Pkws mit konventioneller Bremsanlage mit praktischer Relevanz bzw. deren Veränderlichkeit werden im **Kapitel 6** experimentell analysiert. Die Änderungen werden unterschieden in reversibel und nicht reversibel sowie in schnelle und in langsame Vorgänge. Für die Datengewin-

---

<sup>11</sup> Hohe externe Validität liegt vor, wenn die Untersuchungsergebnisse auch über die konkrete Untersuchung hinaus Gültigkeit haben [20] - z. B. bei anderen Personen oder in anderen Situationen.

<sup>12</sup> Hohe interne Validität liegt vor, wenn sich Änderungen an der abhängigen Variablen eindeutig auf Änderungen an der unabhängigen Variablen zurückführen lassen [65].

nung wird eine eigens zu diesem Zweck entwickelte Pedalbetätigungsautomatik [72], [80] eingesetzt.

Aus den gesammelten Erkenntnissen der vorangegangenen Kapitel werden in **Kapitel 7** Empfehlungen für die Auslegung von Pkw-Betriebs-Bremsanlagen im Allgemeinen und von *entkoppelten Bremsanlagen* im Speziellen abgeleitet. Einen Schwerpunkt bilden dabei die Pedalcharakteristiksimulatoren und die Bremsmomentenerzeugungssysteme der *entkoppelten Bremsanlagen*. Die Empfehlungen werden in qualitativer Form ausgesprochen, da eine exakte und allgemeingültige quantitative Bezifferung im Rahmen dieser einzelnen wissenschaftlichen Arbeit nicht möglich ist.

Einen Abschluss findet diese Arbeit in der Zusammenfassung (**Kapitel 8**) und dem Ausblick (**Kapitel 9**).

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Bremspedalgefühl und Bremsbetätigung

Es ist strikt zwischen der individuellen Wahrnehmung *Bremspedalgefühl* und den objektiven Eigenschaften *Pedal- und Bremscharakteristik* zu unterscheiden<sup>13</sup>. Bisherige Forschungsaktivitäten zielten schwerpunktmäßig darauf ab, das *Bremspedalgefühl* zu objektivieren. Ausgehend von dieser Basis sollen dann Empfehlungen zur Optimierung der zugehörigen MMS gegeben werden können. Ein gewisser Konsens besteht darin, dass die Zusammenhänge von Pedalkraft, Pedalweg und Fahrzeugverzögerung als objektive Faktoren zur Beschreibung der *Pedal- und Bremscharakteristik* geeignet sind. Jedoch werden häufig lediglich die statischen Zusammenhänge betrachtet. Nachfolgend wird ein thematisch geordneter Überblick über die maßgeblichen Literaturstellen, die die Objektivierung des *Bremspedalgebühls* zum Inhalt haben, gegeben:

- **Messverfahren, Werkzeuge, Spezifizierung der *Pedal- und Bremscharakteristik*** → Systemverständnis, Parametergewinnung, Abnahmeprüfungen
  - Fahrer betätigt Bremse: [68], [80]
  - Betätigungsautomatik betätigt Bremse: [5], [70], [72], [80]
  - Analyse von Bremsenkomponenten: [4], [80], [81]
- **Subjektiv-Objektiv-Zusammenhänge** → Untersuchung der Einflüsse auf die menschliche Wahrnehmung
  - Fahrversuche mit konventionellen Fahrzeugen: [53], [77]
  - Fahrversuche mit Versuchsfahrzeugen mit variabler *Pedal- und Bremscharakteristik*: [12], [13], [19], [45], [46], [48], [73], [77], [80]
- **Bewertungsverfahren für die *Pedal- und Bremscharakteristik*, Gestaltungsrichtlinien**
  - Definition von Darstellungsformen oder Kennzahlen zur Beschreibung der *Pedal- und Bremscharakteristik* → Objektivierung des *Pedalgebühls*: [22], [40], [41], [75], Temple (zitiert in [64])
  - Optimierung von in der Praxis bewährten Parametern → Gestaltungsrichtlinien zur Darstellung eines guten *Pedal- und Bremscharakteristik*, Gewinnung optimaler Parameter: [13], [22], [28], [32], [37], [40], [41], [64], [73], [75], [80], Temple (zitiert in [64])
- **Objektivierung der *Betätigungsabläufe* mit Fokus auf den Menschen**
  - physiologische Untersuchung der *Bremspedalbetätigung* mittels EMG-Analyse → Erforschung der physiologischen Wirkung der *Pedalbetätigung* auf den menschlichen Körper, Optimierung der *Betätigungs-*

<sup>13</sup> Vgl. Kapitel 1.2 → „Bremspedalgefühl“, „Pedalcharakteristik“, „Bremscharakteristik“



- eigenschaften aus physiologischer Sicht, Untersuchung unterschiedlicher Wahrnehmung in Abhängigkeit des Individuums: [66], [70], [73]
- Simulation des menschlichen Bewegungsapparats → Simulative physiologische Betätigungsoptimierung: [59], [74]
  - Simulative Abbildung des Menschen als adaptiven Regler → Einbeziehung der physiologischen und psychologischen Eigenschaften zur simulativen Betätigungsoptimierung: [32], [38]

**Kappelman** [41] gliedert das „Thema *Pedalgefühl*“ in drei sich gegenseitig beeinflussende Hauptbereiche: den Bremsvorgang aus Sicht des Fahrers (das menschliche Bremsverhalten), die Auslegung der *Pedalcharakteristik* für mechanische Bremssysteme (*entkoppelte Bremsanlagen* mit Pedalcharakteristiksimulatoren) und die Objektivierung des *Pedalgebühls* (Kennlinien und -größen). Für die Objektivierung anhand von Kenngrößen wählt Kappelman den Ansatz der Ähnlichkeitstheorie. Auf diese Weise ermittelt er verschiedene dimensionslose Kennzahlen. Er betrachtet kritisch bisherige Ansätze zur Beschreibung von *Pedalcharakteristik* und *Pedalgefühl* hinsichtlich der in diese Ansätze einfließenden Parameter:

	Pedalkraft	Pedalweg	Verzögerung	Betätigungsschwindigkeit	Hysterese	Fahrzeugschwindigkeit
Ebert und Kaatz [22]	X	X	X			
Temple (zitiert in [64])	X	X	X	X		X
Götkan [28]	X	X	X		X	
Mitschke et. al. [48]	X	X		X		

Tabelle 1: Vergleich der, in unterschiedlichen Ansätzen zur Beschreibung von *Pedalcharakteristik* und *Pedalgefühl*, berücksichtigten Parameter; nach [41]

In keiner der von Kappelman aufgeführten Literaturstellen (Tabelle 1) werden für die Objektivierung des *Pedalgebühls* alle von Kappelman benannten Kriterien herangezogen.

**Trutschel** [80] betrachtet den Fahrer und das Fahrzeug jeweils als Teilsystem. In seiner Arbeit charakterisiert er diese sowie deren Interaktion miteinander beim Bremsvorgang. Es wird eine objektive Methode zur Beschreibung der Pedal- und Bremscharakteristik von Pkws vorgestellt, die er zur experimentellen Identifikation der Schnittstellenparameter nutzt. Trutschel weist darauf hin, dass zur Beschreibung der *Pedalcharakteristik* unter anderem die *statische* und die *dynamische Kraft-Hysterese* nicht vernachlässigt werden dürfen. Im Rahmen der Arbeit entsteht ein parametrisches Modell zur Beschreibung der Pedal- und Bremscharakteristik bei Komfortbremsungen. Im weiteren Verlauf seiner

Untersuchungen verwendet Trutschel ein spezielles Forschungsfahrzeug mit der Fähigkeit zur modellbasierten Veränderung der Pedal- und Bremscharakteristik zur Durchführung von Subjektiv-Objektiv-Untersuchungen. Er führt statistische Betrachtungen zum Bremsverhalten von Normalfahrern im Realverkehr durch und analysiert die subjektive Wirkung objektiver Parameter der Pedal- und Bremscharakteristik, die Möglichkeit, haptische Informationen über das Bremspedal zu vermitteln und die Eignung von adaptiven Pedal- und Bremscharakteristiken. Den dritten Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die Benennung konstruktiver Einflussgrößen auf die Charakteristiken. Trutschel entwickelt zu diesem Zweck ein physikalisches Simulationsmodell einer Pkw-Bremsanlage. Die Merkmale der Bremsanlagen-MMS lassen sich damit bis zur Einzelkomponente zurückverfolgen.

Speed beschreibt in [75] einen Ansatz, der bewusst den Menschen in den Mittelpunkt der Betrachtung stellt („Braking feel, a human centred approach“). Sie gibt eine umfassende Übersicht der Wahrnehmungsreize und Einflussparameter, die das *Pedalgefühl* betreffen (Bild 7).

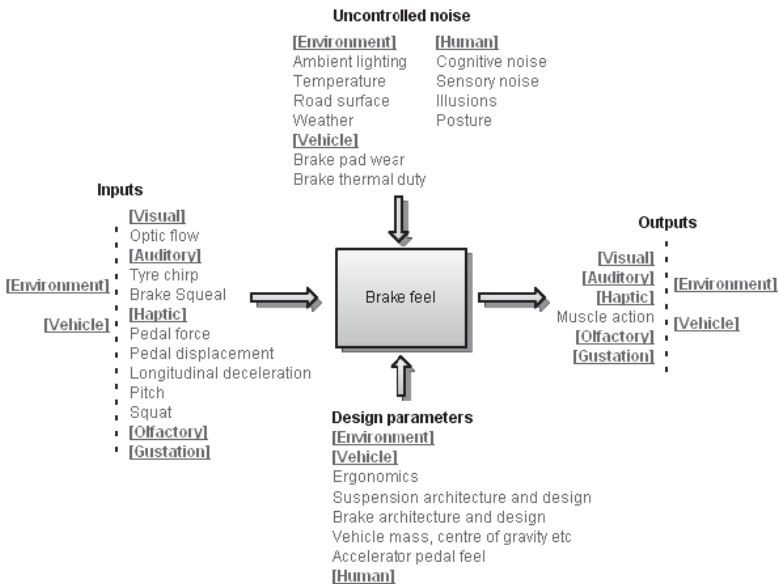


Bild 7: Das *Pedalgefühl* betreffende Wahrnehmungsreize und Einflussparameter [75]

Speed überführt die physikalischen, nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Pedalkraft, Pedalweg und Fahrzeugverzögerung in eine logarithmische Darstel-

lungsform, in der sich die Zusammenhänge als Geradenabschnitte beschreiben lassen. Sie weist darauf hin, dass die Wahrnehmung solcher Reize, wie der Helligkeit oder den elektrischen Stromstoß, logarithmisch mit deren Intensität zusammenhängt. Weiterhin stellt sie im Ausblick die drei genannten Größen in einem dreidimensionalen Zusammenhang dar.

**Temple** (um ca. 1995, zitiert in [64]) erarbeitet ein objektives Bewertungsverfahren für die Güte der Bremsanlage. Die Bewertung erfolgt über das Arbeits-Steifigkeits-Diagramm und nicht, wie bei den meisten anderen Ansätzen, durch direkte Berücksichtigung von Pedalweg, Pedalkraft und Fahrzeugverzögerung. Für zwei unterschiedliche Fahrzeugverzögerungsniveaus (Bild 8) werden die Kennwerte *Pedalarbeit* ( $W_p$ ) und *Pedalsteifigkeit* ( $c_p$ ) errechnet.

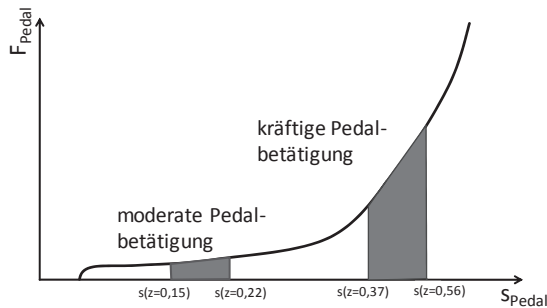


Bild 8: F-s-Zusammenhang (nur Betätigung dargestellt), schraffiert dargestellt sind die Bereiche, die für die Auswertung nach Temple herangezogen werden; nach [87]

Diese werden in einem Arbeits-Steifigkeits-Diagramm (vgl. Bild 9) - dem *Temple Diagramm* - dargestellt. Die relative Lage dieser beiden Punkte zu von Temple ausgezeichneten Vorzugsbereichen soll Aufschluss über die Bremsanlagengüte geben. Die Bewertung nach Temple hat sich nach [64] im nordamerikanischen Fahrversuch bewährt. Kappelmann [41] beschäftigt sich mit der Temple-Methode und dem Einfluss der Betätigungsgeschwindigkeit auf die „Temple-Ergebnisse“. Kappelmann gelingt es nicht, Fahrzeuge zu identifizieren, deren *Pedalcharakteristiken* in den von Temple empfohlenen Bereichen liegen. Die Ergebnisse der Auswertung von Kappelmann liegen im Vergleich zu den Temple-Empfehlungen bei etwa vergleichbaren *Pedalsteifigkeiten* (nur geringe Abweichungen), aber bei höheren bis deutlich höheren *Pedalarbeiten*.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden unter Verwendung einer Pedalbetätigungsautomatik [72], [80] mehrere Fahrzeuge nach der Temple-Methode analysiert. Die Ergebnisse sind in Bild 9 zusammengefasst. Es ist klar zu erkennen, dass keines der untersuchten Fahrzeuge innerhalb der von Temple definierten Vorzugsbereiche liegt.

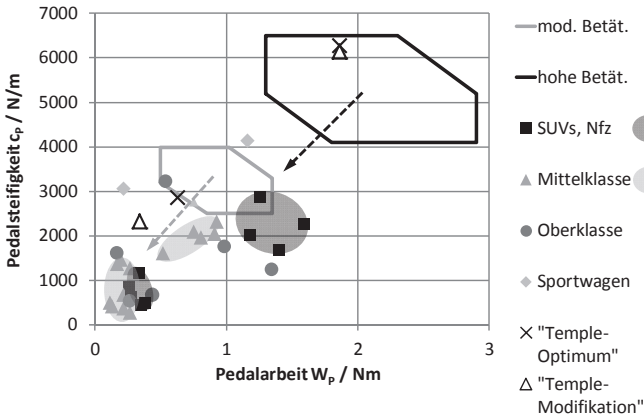


Bild 9: Arbeits-Steifigkeits-Diagramm mit Vorzugsbereichen nach Temple für eine Auswahl von Serienfahrzeugen; nach [87]

Teilweise mögen diese Abweichungen darauf rückführbar sein, dass für die Temple-Methode keine exakte Definition der Größen *Pedalkraft* und *Pedalweg* veröffentlicht ist. Weiterhin ist nicht bekannt, ob Temple lediglich Betätigungsvorgänge zur Auswertung herangezogen oder zwischen Betätigung und Entlastung gemittelt hat. Eine weitere Ursache für diese Diskrepanz mag der unterschiedliche Zielmarkt (Nordamerika vs. Europa) sein.

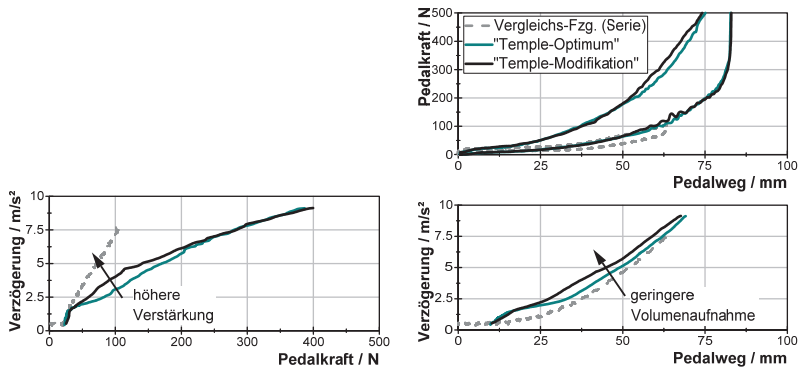


Bild 10: Synthetisch erzeugte Kennlinien, die nahe bei oder in den von Temple definierten Vorzugsbereichen liegen (Vergleichsfahrzeug: Oberklasslimousine)

Versuche mit dem, in Kapitel 5 vorgestellten, Versuchsfahrzeug eine „Temple-optimale“ *Pedal- und Bremscharakteristik* zu kreieren, führten zu den Charakteristiken „Temple-Modifikation“ und „Temple-Optimum“ (Bild 9, Bild 10). Während die Charakteristik „Temple-Modifikation“ bereits den Vorzugsbereich für hohe Verzögerungen trifft, liegt der Kennwert für niedrige Verzögerungen noch deutlich außerhalb des entsprechenden Vorzugsbereichs. Diese Charakteristik ist für hohe Verzögerungen jedoch signifikant schlecht dosierbar (sehr hohe *Kraft-Hysterese*, sehr hohes Kraftniveau). Die Charakteristik „Temple-Optimum“ trifft beide Vorzugsbereiche, ist aber für geringe und für hohe Verzögerungen signifikant schlecht dosierbar.

Es ist nicht gelungen, eine Charakteristik zu erzeugen, die im Temple-Optimum lag und gleichzeitig subjektiv überzeugt hätte. Hinzu kommt, dass folgende, offensichtlich pedalgefühlrelevante, Parameter von dieser Methode gar nicht oder nur unvollständig erfasst werden können:

- *Statische Kraft-Hysterese*
- *Dynamische Kraft-Hysterese*<sup>14</sup>
- Vorhandensein eines *Springers* (Jump-In)
- Harmonie, Linearität, Monotonie, Stetigkeit der charakteristischen Verläufe (Kraft-, Weg- und Verzögerungszusammenhänge)

Stellvertretend für die in Tabelle 1 aufgeführten Ansätze wird anhand der Temple-Methode deutlich, dass deren Aussagekraft bisher jeweils auf einen nur eingeschränkten Anwendungsbereich begrenzt ist. Allgemeingültige Aussagen im Sinne einer übergreifenden Methode können nicht getätigt werden.

## 2.2 Elektro- und Hybridelektrofahrzeuge

Gemein ist beiden Fahrzeugkonzepten, dass ein elektromechanischer Energiewandler mindestens einen Teil der Antriebsenergie bereitstellt. Im Sinne der Steigerung der Energieeffizienz können diese Fahrzeuge in der Regel die beim Bremsvorgang zu reduzierende kinetische Fahrzeugenergie in eine Energieform wandeln, die für eine gewisse Zeit zwischengespeichert und später wieder zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt werden kann.

Die Bandbreite der hybrid-elektrischen Fahrzeuge (HEV) reicht, abhängig von der Leistungsfähigkeit des elektromechanischen Energiewandlers, vom Micro-HEV bis zum Voll-HEV (Bild 11, Bild 12).

---

<sup>14</sup> Über die beiden definierten Betätigungsgeschwindigkeiten hinaus gehend

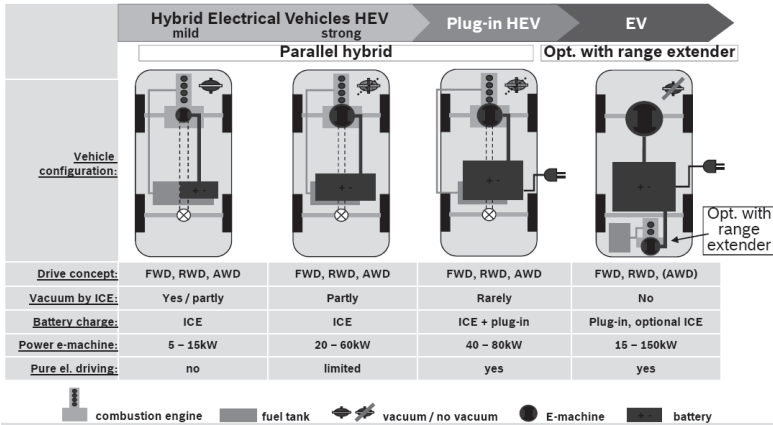


Bild 11: Antriebsstränge von HEV und EV [34]

All diese Fahrzeuge beziehen die für den elektromechanischen Energiewandler erforderliche elektrische Energie lediglich aus dem Fahrbetrieb, also z. B. durch Bremsenergierückgewinnung oder indem vom Verbrennungsmotor Leistung zum Betrieb eines Generators abgezweigt wird. Abhängig vom Hybridisierungsgrad kann der elektromechanische Energiewandler lediglich den Verbrennungsmotor unterstützen - der Verbrennungsmotor kann dann beispielsweise kleiner ausgelegt werden („Downsizing“) oder in einem verbrauchsgünstigeren Zyklus (z. B. Atkinsonzyklus) oder Arbeitspunkt betrieben werden - oder für wenige Kilometer als alleinige Antriebsquelle dienen.

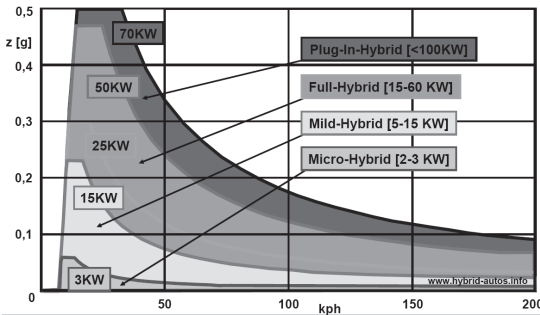


Bild 12: Einteilung der HEV nach Hybridisierungsgraden [58]

Die sogenannten Plug-In-HEV (Bild 11, Bild 12) sind mit einem vergleichsweise großen Energiespeicher ausgestattet, der, z. B. an einer Haushaltssteckdose, durch externe Energiezufuhr aufgeladen werden kann. Solche Fahrzeuge kön-

nen dann bereits über rein elektrische Reichweiten von mehreren zehn Kilometern verfügen. Plug-In-HEV mit besonders hoher elektrischer Reichweite und vorzugsweise seriellern Hybrid-Antrieb (Bild A1, S. 134) spannen den Bogen zum reinen Elektrofahrzeug (EV). Im Gegensatz zum reinen EV, welches komplett ohne Verbrennungsmotor auskommt, verfügen solche als „EV mit Range Extender“ bezeichneten Fahrzeuge über einen zumeist kleinen Verbrennungsmotor, der im einfachsten Fall als Antrieb eines Generators der Erzeugung elektrischer Energie dient. In dieser Konstellation lassen sich die Vorteile des reinen EV (lokales emissionsfreies Fahren) mit den Vorteilen des Verbrennungsmotors (große Reichweite dank hoher Energiedichte der mineralischen Kraftstoffe) kombinieren.

Die heute am weitesten verbreitete Variante der elektromechanischen Energiewandler im Pkw ist die permanenterregte Synchronmaschine (PSM), deren Hauptvorteil die hohe Leistungsdichte ist [24]. Bedingt durch den Kennlinienverlauf im Generatorbetrieb (Bild 12, Bild 13) ist die maximale Bremswirkung beim *rekuperativen* Bremsen abhängig von der Motordrehzahl.

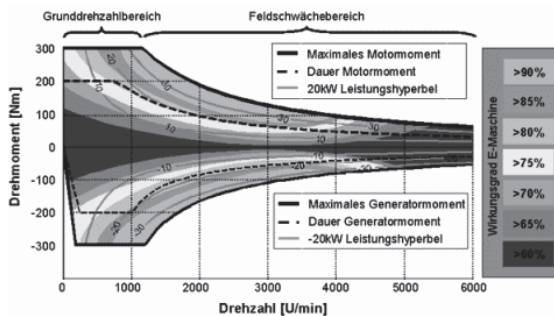


Bild 13: Typisches Wirkungsgradkennfeld einer PSM [35]

Gelingt es nicht, durch geeignete Maßnahmen in allen relevanten Situationen<sup>15</sup> eine genügend hohe generatorische Bremswirkung zur Verfügung zu stellen, ist eine zusätzliche Bremsvorrichtung erforderlich.

### 2.3 Rekuperation

Während bei der konventionellen Betriebsbremse die Fahrzeuggeschwindigkeit reduziert wird, indem die kinetische Fahrzeugenergie über Reibung in, bisher nicht weiter genutzte, Wärme gewandelt wird, ist es das Grundprinzip der Bremsenergieerückgewinnung, die kinetische Fahrzeugenergie teilweise oder

<sup>15</sup> Z. B.: sehr hohe Fahrzeuggeschwindigkeit, sehr geringe Fahrzeuggeschwindigkeit, Fahrzeugstillstand, Energiespeicher gefüllt

komplett in eine speicherbare Energieform zu überführen, zu speichern und später wieder für den Betrieb des Fahrzeugs nutzbar zu machen. Auf diese Weise kann der Gesamtwirkungsgrad des Fahrzeugs gesteigert werden.

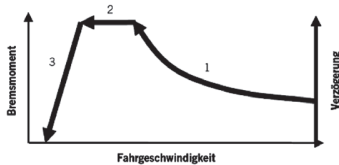


Bild 14: Schematische Generatorcharakteristik einer PSM, Generatorcharakteristik limitiert durch:  
1 - Generatorleistung, 2 - Generatorstrom,  
3 - Generatoreffizienz [21]

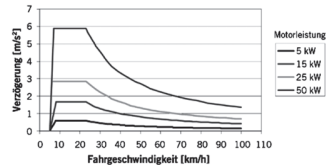


Bild 15: Schematische Verzögerungscharakteristiken mit einer PSM [21]

Die derzeit am weitesten verbreitete Form der Energierückgewinnung ist die Nutzung eines elektromechanischen Wandlers im Generatorbetrieb. Das bei der Umwandlung der kinetischen in elektrische Energie im elektromechanischen Wandler entstehende „Bremsmoment“ wird über den Fahrzeugantriebsstrang an die Antriebsräder übertragen. Die elektrische Energie wird typischerweise in einen elektrochemischen Speicher eingespeist. In Bild 14 ist die typische Generatorcharakteristik einer PSM und in Bild 15 die zugehörige typische Verzögerungscharakteristik dargestellt.

Darüber hinaus werden, teilweise für Spezialanwendungen, immer wieder auch andere Konzepte der Energierückgewinnung und Energiespeicherung erprobt. **Porsche** greift derzeit in einem Technologieträger das, bereits in den 50er Jahren in den sogenannten **Gyrobussen** [76] erprobte, Prinzip der Energiespeicherung mit einem rotierenden Schwungrad wieder auf (Bild 16) [2].

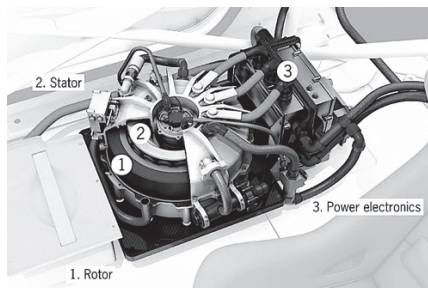


Bild 16: Schwungrad-Energiespeicher im Porsche GT3 Hybrid [2]

Die Firma **Bosch Rexroth AG** stellt in [42] ein sogenanntes hydrostatisches regeneratives Bremssystem (HRB, Bild 17) mit hydromechanischem Energie-



wandler<sup>16</sup> vor. Die hydraulischen Blasenpeicher bieten eine sehr hohe Leistungsdichte, dafür aber nur eine vergleichsweise geringe Energiedichte. Der Fokus dieses Konzepts liegt auf der Rekuperation der Bremsenergie bei Fahrzeugen mit hoher Umschlagsleistung und hoher Fahrzeugmasse (z. B. Entsorgungsfahrzeuge oder Stadtbusse).

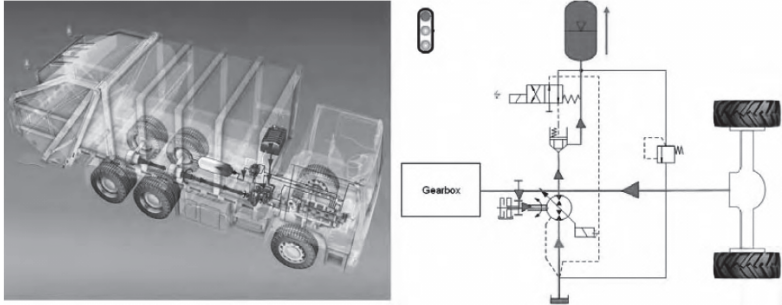


Bild 17: Mechanischer Fahrtrieb mit HRB-Komponenten im Bremsbetrieb [42]

Nach **Neudorfer, Binder und Wicker** [52] liegt das Potenzial der Energieeinsparung von Fahrzeugen mit Rekuperationsmöglichkeit je nach Fahrzyklus zwischen ca. 4 % bei einem Zyklus mit sehr wenigen und geringen Verzögerungsphasen und ca. 52 % bei einem Zyklus mit häufigem Start-Stopp-Betrieb (Tabelle 2).

Fahrzyklus	Energieeinsparung mit/ohne Rekuperation [%] (Tabelle 6 gegenüber Tabelle 5)			Fahrbereich
	ASM	PSM	SRM	
1 Auto-Motor-Sport	25,6	24,4	26,4	L
2 NEDC (NEFZ)	15,9	15,6	16,5	S,L,A
3 Japan 10–15 Mode	29,5	31,9	30,1	S,A
4 HYZEM Urban	42,5	43,9	44,8	S
5 HYZEM Rural	25,5	24,3	26,8	L
6 HYZEM Highway	5,6	5,5	6,2	A
7 UDDS (FTP-72)	28,1	25,6	27,8	S,A
8 FTP-75	25,9	23,7	26,0	S,A
9 SFTP-US06	14,0	13,7	15,4	A
10 SFTP-SC03	30,2	27,6	29,5	S,A
11 EPA NYCC	51,4	50,8	52,1	S
12 EPA HWFET	4,3	4,1	5,0	L
13 IM240	27,7	25,2	28,1	S,L
14 California LA 92 Cycle	27,8	25,6	27,6	S,A
15 Indian Driving Cycle	37,7	41,8	39,9	S
16 Milano Cycle	29,1	32,7	35,0	S,A

Tabelle 2: Berechnete Energieeinsparung in % durch Rekuperation bezogen auf den Energiebedarf eines fiktiven EV; Vergleich unterschiedlicher Zyklen für die Verbrauchsmessung (ASM: Asynchronmaschine, SRM: geschaltete Reluktanzmaschine) [52]

<sup>16</sup> Hier: eine hydromechanische Axialkolbenmaschine

Das französische Forschungsinstitut **INRETS** hat den Hybrid Technology Approaching Efficient Zero Emission Mobility-Zyklus (HYZEM, Bild 18) entwickelt, der auf die Besonderheiten von Hybrid-Elektrofahrzeugen (HEV) abzielt [29].

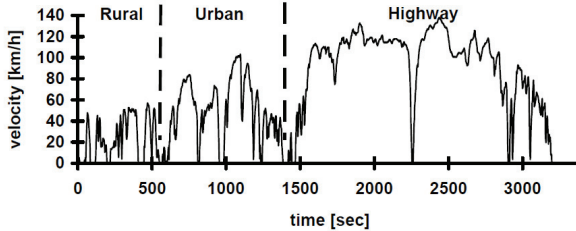


Bild 18: Fahrzyklus für die Verbrauchsmessung von HEV: HYZEM [29]

Der **TÜV Süd** hat einen speziell auf Elektrofahrzeuge (EV) abgestimmten Verbrauchermittlungszyklus, den TÜV Süd-E-Car-Cycle (TSECC, Bild 19), entwickelt [7], [82].

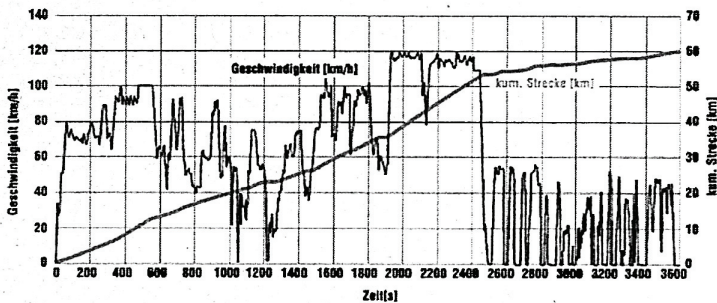


Bild 19: Fahrzyklus für die Verbrauchsmessung von EV: TSECC [7]

## 2.4 Betätigungselemente

Seit den Anfängen des Automobils wird die Bremse über ein Bremspedal betätigt. Dieses ist als Hebel ausgeführt und dient in der hydraulischen Pkw-Bremsanlage der Aktivierung des Geberzylinders<sup>17</sup> des Bremshydrauliksystems. Die Gestaltung des Bremspedals<sup>18</sup> besitzt maßgeblichen Einfluss auf die Be-

<sup>17</sup> I. d. R. ausgeführt als Tandemhauptbremszylinder bzw. THZ

<sup>18</sup> Pedalübersetzung

dienwege und -kräfte. Heute wird die Bremse mit dem rechten Fuß über hängend ausgeführte Pedale aktuiert.

Vereinzelt wird in der Literatur ein Ansatz beschrieben, der die Funktion von Brems- und Fahrpedal in einem Betätigungselement - einem kombinierten Pedal - vereint. Nach dem Ansatz von **Poock** [57] soll die Funktion des Fahrpedals durch die Aktuierung mit dem Fußballen und die des Bremspedals durch die Aktuierung mit der Ferse realisiert werden. Bisher ist keine Realisierung eines solchen Konzepts im Serieneinsatz bekannt geworden. **Gustaffson** hingegen schlägt vor, zum Beschleunigen das Pedal zu kippen (Drehbewegung des Sprunggelenks) und zum Bremsen das Pedal auf herkömmliche Weise niederzutreten (Bild 20, beschrieben in [54]). Die Swedish National Road Administration (NSRA) und Volvo haben dieses System getestet. Ein Serieneinsatz ist auch hier zurzeit nicht bekannt.

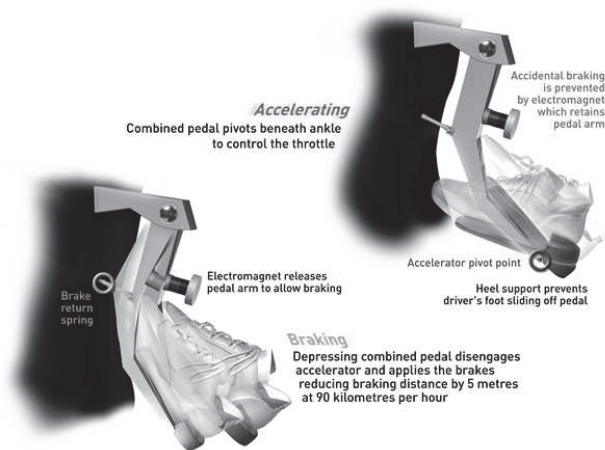


Bild 20: Beispiel für ein kombiniertes Fahr- und Bremspedal [30]

**Nilsson** [54] schreibt, dass durch den vermiedenen Umsetzvorgang zwischen Fahr- und Bremspedal mindestens 0,2 s bei der Notbremsbetätigung eingespart werden können, was bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h einer Reduzierung des Anhaltewegs um mehr als 5 m entspricht. **Winner und Heuss** benennen die Zeit, die durch die Vermeidung des Umsetzvorgangs bei der Bremsbetätigung eingespart werden könnte, mit ca. 0,2 bis 0,4 s [89].

**Lohse und Irlinger** stellen ein stehend angeordnetes Bremspedal vor [47], welches in dem konkreten Beispiel vermutlich durch konstruktive Randbedin-

gungen motiviert ist (Anordnung des Hauptbremszylinders unterhalb des Fahrerfußes, Bild 21).

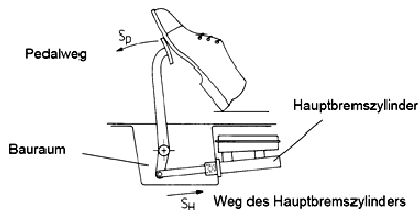


Bild 21: Konzept für ein stehendes Bremspedal [47]

**Sacher** [63] stellt in einer Analyse des gesamtheitlichen Bedienverhaltens von Fahrzeugfunktionen in der täglichen Nutzung fest, dass bei der Fahrzeugführung durchschnittlich zwei Bedienvorgänge je Minute an sekundären oder tertiären Bedienelementen vorgenommen werden. Sie kommt zu dem Ergebnis, dass bei den 72, in der Studie untersuchten, Probanden diesbezüglich eine hohen Inter- und Intraindividualität vorliegt.

## 2.5 Pedalcharakteristiksimitatoren

Bedingt durch die fehlende energetische Kopplung zwischen Betätigungs- und Übertragungseinrichtung verfügen *entkoppelte Bremsanlagen* nicht per se über eine typische bzw. konventionelle *Pedalcharakteristik* (vgl. Bild 3, S. 7). Eine geeignete Charakteristik der MMS muss vielmehr synthetisch erzeugt werden. Dafür bedient man sich sogenannter Pedalcharakteristiksimitatoren<sup>19</sup>. Grundsätzlich ergibt sich aus der Nutzung solcher Simulatoren die Möglichkeit der völligen Gestaltungsfreiheit der Betätigungscharakteristik und damit die Chance, die Charakteristik weiter zu optimieren<sup>20</sup> und den Wiedererkennungswert der Fahrzeugmarke weiter zu steigern<sup>21</sup>. Diese Ansprüche werden heute noch nicht zufriedenstellend technisch umgesetzt, wie in der Auto-Presse vielfach geübte Kritik an den *Pedalcharakteristiken* von *entkoppelten Bremsanlagen* zeugt. Die Kommentare lauten häufig „synthetisch“ [27], [49] oder „gefühllos“ [36]. Zum Teil sind die Ursachen für solche Kritik bekannt. Zum Teil ist aber noch nicht erforscht, welche Eigenschaften eine sehr gute Pedal- und Bremscharakteristik auszeichnen bzw. welche Abweichungen von einem vorgegebenen Optimum zulässig sind.

<sup>19</sup> Häufig auch als Pedalwegsimulatoren bezeichnet

<sup>20</sup> Z. B. intuitivere Bremsbedienung, situationsgerechte - adaptive - Anpassung, optimierte Betätigungswege und -kräfte

<sup>21</sup> Eigenständiges Design der Pedalcharakteristik, passend zur Markenphilosophie

Heutige Pedalcharakteristiksimulatoren in Serienanwendungen bestehen durchgängig aus passiven Konstruktionselementen, wie Elastomerefedern, Schraubenfedern und Dämpfern. Es ist zu unterscheiden zwischen *nassen* Simulatoren (vgl. Bild 61, S. 62), bei denen ein Fluid, z. B. zur Kraftübertragung oder Bedämpfung der Charakteristik, vorhanden ist, und *trockenen* Simulatoren (vgl. Bild 71, S. 69).

Seriensimulatoren weisen i. d. R. Defizite bei der Gestaltung eines authentischen Kraft-Weg-Zusammenhangs, der *statischen*<sup>22</sup> oder, insbesondere im Fall der trockenen Simulatoren, der *dynamischen*<sup>23</sup> Kraft-Hysterese auf (Bild 3, S. 7). In Bild 22 (links) ist ein konstruktiver Vorschlag für einen solchen Simulator dargestellt, mit dem insbesondere die Problematik der zielgerichteten Nachbildung von *statischer Kraft-Hysterese* (über eine Reibungsbremse 17) und *dynamischer Kraft-Hysterese* (über einen Rotationsdämpfer 5) ermöglicht werden soll. Durch die spezielle, schaufelartige Ausbildung der Flügel des Rotationsdämpfers bzw. alternativ durch das Bypassventil (8) soll eine bewegungsrichtungsabhängig unterschiedliche Dämpfungswirkung erreicht werden. In Bild 22 (rechts) ist ein Vorschlag mit ähnlichen Eigenschaften dargestellt. Die *statische Kraft-Hysterese* wird durch den sogenannten Reibungsdämpfer (8) generiert, während der mit einem sogenannten Kraftbegrenzer (5) in Reihe geschaltete Dämpfer (6) den *dynamischen Kraft-Hystereseanteil* erzeugen soll. Eine praktische Umsetzung dieser beiden Vorschläge ist nicht bekannt.

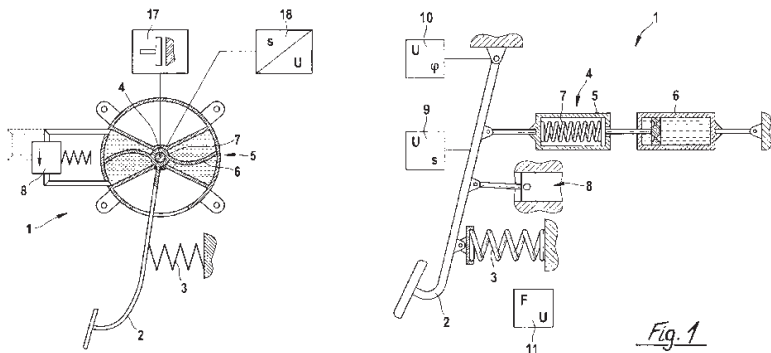


Bild 22: Passive Pedalcharakteristiksimulatoren mit statischer und dynamischer Kraft-Hysterese-Erzeugung (links: [61], rechts: [62])

<sup>22</sup> „Reibung“

<sup>23</sup> „Dämpfung“

## 2.6 Forschungsbedarf

Ein Kernthema bei der Entwicklung von MMS, wie bei Bremsanlagen mit Rekuperationsmöglichkeit, ist die Güte der Schnittstelle. Die MMS müssen sich authentisch und konsistent anfühlen, einen vertrauenserweckenden Eindruck vermitteln und eine intuitive Bedienung der Bremsfunktion ermöglichen. Die zielgerichtete und zuverlässige Auslegung von MMS, wie z. B. die des gesamten Fahrerarbeitsplatzes, ist sehr komplex und vielschichtig. Das Repertoire der Einflussparameter ist außerordentlich umfangreich, zumal zu diesen nicht nur rein technische Merkmale, sondern auch vergleichsweise schwer mess- und interpretierbare "menschbezogene" Größen zählen. Eine interdisziplinäre Herangehensweise an die Problematik erscheint zwingend erforderlich, ist aber heute noch nicht selbstverständlich. Die Forscher und Entwickler der Ingenieurwissenschaften können wertvolle Unterstützung durch Erkenntnisse und Methoden aus den Disziplinen Humanphysiologie und Humanpsychologie erfahren.

Im Detail kann folgender Bedarf an weiterer Forschungsarbeit identifiziert werden:

- **Analyse der Betätigungsabläufe beim Bremsvorgang** Anhand der veröffentlichten Arbeiten zum *Bremspedalgefühl* wird deutlich, dass die Berücksichtigung des Fahrers unter physiologischen und psychologischen Gesichtspunkten bisher zu kurz kommt. Dabei erscheint es vor dem Hintergrund eines solch komplexen Themas essenziell, zu verstehen, welche Abläufe im Körper des Fahrers während des Bremsvorgangs vorstattengehen. Letztendlich gipfeln alle Bemühungen zur Optimierung des *Bremspedalgebühls* darin, die MMS optimal auf die Bedürfnisse des Fahrers abzustimmen. Eine umfassende Berücksichtigung dieses Anspruchs erfordert zwingend die Zusammenführung unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen (Ingenieurwissenschaften, Humanphysiologie, Humanpsychologie). Die Erfassung der komplexen Gegebenheiten bei Betätigungsabläufen erfordert eine Vielzahl von Analysemethoden und Beobachtungsmöglichkeiten, u. a. für Bewegungsabläufe, Bedienkräfte, Muskelaktivitäten und subjektive Eindrücke. Es ist zu klären, ob diese Informationen im fahrenden Fahrzeug zu gewinnen sind oder ob ein noch zu entwickelnder stationärer Versuchsaufbau mit mehr Freiheitsgraden bei der Datenerfassung und der Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes eine geeignete Möglichkeit darstellt.
- **Spezifische, pedalgefühlrelevante Eigenschaften von entkoppelten, rekuperativen und kooperativen Bremsanlagen** *Entkoppelte, rekuperative* und *kooperative* Bremsanlagen weisen im Vergleich zu herkömmlichen Bremsanlagen pedalgefühlrelevante Besonderheiten auf, die es zu identifi-

zieren und bewerten gilt. Bei *entkoppelten Bremsanlagen* ist die Bremswirkung passend zur Bremsbetätigung abzustimmen. Auch die Dynamik, mit der die Bremswirkung nach deren Anforderung einsetzt, gilt es zu berücksichtigen. Die Pedalcharakteristiksimulatoren dieser *entkoppelten* Anlagen sollen heute die Charakteristika von *gekoppelten* Anlagen möglichst authentisch imitieren. Einfache, preiswerte und zuverlässige Möglichkeiten zur Realisierung stehen hier im Fokus. Bei Bremsanlagen mit Rekuperationsmöglichkeit gilt es, den Fahrer nicht durch die zusätzliche rekuperative Bremswirkung zu stören oder gar zu irritieren. Bedarf besteht bei der systematischen Analyse dieser spezifischen, pedalgefühlrelevanten Eigenschaften sowie deren Ursachen und bei der Entwicklung von Möglichkeiten zur Kompensation von unerwünschten Effekten. Dazu bedarf es Methoden zur präzisen automatisierten und reproduzierbaren Erfassung der relevanten Fahrzeugeigenschaften im realen Fahrbetrieb sowie zur weiteren Analyse der gewonnenen Daten.

- **Fühlbarkeits- und Akzeptanzschwellen** Noch großer Forschungsbedarf besteht bei der Fragestellung, welche Abweichungen von einem gegebenen Optimum für den Fahrer fühlbar und welche noch akzeptabel sind. Solche Informationen sind aber unerlässlich für die zielgerichtete und wirtschaftliche Auslegung der MMS. Es wäre nicht zweckmäßig, mit viel Aufwand Effekte eliminieren zu wollen, die vom Fahrer überhaupt nicht als störend wahrgenommen werden. Umgekehrt muss jedoch bekannt sein, worauf bei der Entwicklung einer Bremsanlage ein besonderes Augenmerk gelegt werden muss. Diese Erkenntnisse lassen sich mit einem Fahrzeug, mit dem sich in Alltagssituationen unter vergleichbaren Bedingungen gezielte Parameteränderungen und Störungen an der MMS vornehmen lassen, gewinnen. Mit Probandenstudien können Aussagen zu Fühlbarkeits- und Akzeptanzschwellen herausgefunden werden.

## 3 Bedienergonomie am Fahrerarbeitsplatz

Auf die Bewertung der Pedal- und Bremscharakteristik haben nicht ausschließlich objektive fahrzeugbezogene Merkmale, sondern noch weitere Parameter Einfluss. Zu diesen zählen die Fahrerumgebung (z. B. Sitzergonomie), fahrerindividuelle physiologische Merkmale (z. B. Bewegungsregulation, Körperbau) und die Psychologie (z. B. Erwartungshaltung, Gewöhnungseffekte ...). Nachfolgend werden Untersuchungsmethoden beschrieben, die dazu geeignet sind, den Einfluss dieser "weiteren Parameter" auf die Anforderungen an eine gelungene MMS aufzuzeigen.

### 3.1 Betätigungsabläufe unter physiologischen Aspekten

Die Abläufe bei der Betätigung von Bedienelementen während der Ausübung der Fahraufgabe - hier: die Bewegungen der Extremitäten des Fahrers, die Betätigungs- und Abstützkräfte, die von ihm aufgebracht werden und die Aktivität seiner Skelettmuskulatur - lassen Rückschlüsse auf die ergonomische Güte der MMS des Fahrzeugs zu.

#### 3.1.1 Versuchsdesign

Auf den ersten Blick unbeherrschbar viele und unterschiedliche Parameter haben Einfluss auf die Empfindungen und Handlungen des Fahrers. Für den Untersuchungsschwerpunkt „*Bremspedalgefühl*“ gibt [75] einen Überblick (vgl. auch Bild 7, S. 14). Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, abhängig vom Untersuchungsschwerpunkt, einige Vereinfachungen und Einschränkungen einzuführen - das Untersuchungsobjekt wird ingenieurmäßig freigeschnitten.

#### Stationäre Versuchsumgebung

Die Untersuchungen zu den Betätigungsabläufen fanden zum Teil an einer stationären Versuchsumgebung (Bild 23, Bild 24) statt. Vorversuche mit einem modifizierten Pkw<sup>24</sup> (Bild A4, S. 135) haben gezeigt, dass der Pkw als Versuchsumgebung Nachteile hinsichtlich Variabilität des Fahrerarbeitsplatzes, Nutzbarkeit von kamerabasierten Bewegungsanalyse-Systemen und Bauraum für die Messtechnik mit sich bringt. Deshalb wurde der Ansatz gewählt, den Fahrerarbeitsplatz von Pkws lediglich funktional nachzubilden (vgl. [83], [86]). Diese Vorgehensweise bietet folgende Vorteile:

---

<sup>24</sup> Ausgestattet mit Messtechnik für die Betätigungsanalyse u. a. an der Pedalerie, dem Lenkrad und dem Fahrersitz; Zur Verbesserung der Sichtbarkeit für das kamerabasierte Bewegungsanalyse-System wurden die Türen und einige Verkleidungsteile im Innenraum entfernt.



- Die stationäre Versuchsumgebung gestattet die schnelle Variation des Fahrerarbeitsplatzes hinsichtlich der geometrischen Anordnung und der Austauschbarkeit von Bedienelementen. Somit können völlig unterschiedliche MMS-Konzepte in ein und derselben Versuchsumgebung überprüft werden.
- Die stationäre Versuchsumgebung wurde so entwickelt, dass die Sicht auf den Bediener (Fahrer) möglichst wenig beeinträchtigt wird. Kamerabasierte Systeme zur visuellen Bewegungsanalyse können so sehr gut eingesetzt werden.
- Bauraumintensive Kraft-, Momenten-, Weg- und Winkelsensorik kann in der künstlichen Versuchsumgebung im Gegensatz zum seriennahen Versuchsfahrzeug problemlos an allen relevanten MMS des Fahrerarbeitsplatzes implementiert werden.

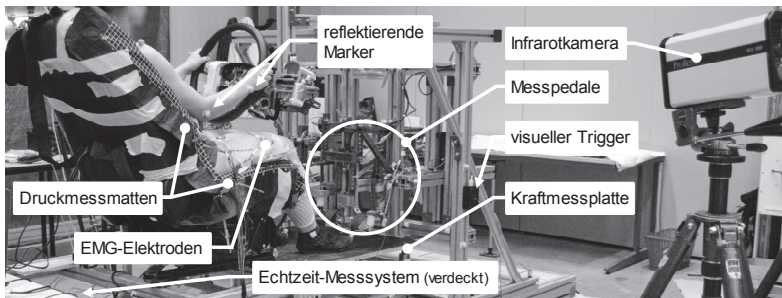


Bild 23: Stationäre Versuchsumgebung

Der Nachteil der eingeschränkten Realitätsnähe durch die künstliche Anmutung der Versuchsumgebung und die fehlenden dynamischen Fahrzeugreaktionen wird für diese Untersuchungen zu Bewegungsabläufen, Abstütz- und Bedienkräften und Sitzposition in Kauf genommen. Die Betätigungsabläufe sollen zunächst einmal grundsätzlich und mit hoher interner Validität erfasst und verstanden, geeignete Messkonzepte entwickelt und validiert werden. Vergleichsmessungen zum Einfluss der fehlenden Fahrzeugdynamik auf die Muskelaktivitäten werden im Abschnitt „Muskelaktivitäten“ → „Einfluss der Bremssituation“ vorgestellt.



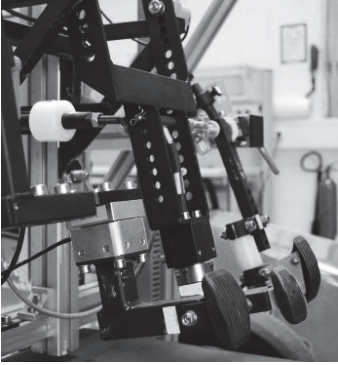


Bild 24: Detailansicht der stationären Versuchsumgebung

Das Konzept der stationären Versuchsumgebung eröffnet weitreichende Möglichkeiten für die Gestaltung des Fahrer Arbeitsplatzes. Dank des modularen Aufbaus können einzelne Elemente den Anforderungen entsprechend hinzugefügt, weggelassen oder ausgetauscht werden. So ist z. B. eine Pedalanordnung für Handschaltgetriebe (3 Pedale) genauso möglich, wie für Automatikgetriebe (2 Pedale). Alternative Bedienphilosophien können problemlos realisiert werden, wie es z. B. mit dem Ersatz des Lenkrads durch eine Joysticklenkung denkbar wäre. Die Komponenten lassen sich in einem konstruktiv vorgegebenen Parameterraum frei anordnen, sodass Erreichbarkeitsuntersuchungen oder auch z. B. Variationen des Stufensprungs<sup>25</sup> vorgenommen werden können. Die Betätigungscharakteristiken der Bedienelemente - z. B. die *Pedalcharakteristiken* - sind an die Versucherfordernisse anpassbar.

---

<sup>25</sup> Abstand bzw. Versatz in Betätigungsrichtung zwischen Fahr- und Bremspedal in der unbetätigten Ausgangslage

Die folgende Tabelle 3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Elemente des Messtechnikkonzepts.

Beispieldarstellung	Teilsystem
 <p data-bbox="191 669 382 700">Bild 25: Messpedale<sup>26</sup></p>	<p data-bbox="562 300 802 338">Kraft-, Momenten-, Weg- und Winkelmesstechnik</p> <ul data-bbox="562 346 966 539" style="list-style-type: none"> <li>• Erfassung der Betätigungsvorgänge direkt an den MMS (z. B. Pedalkraft, Pedalwinkel, Betätigungsgeschwindigkeit)</li> <li>• Erfassung der Bedien- und Abstützkraftvektoren (Intensität, Einleitungsrichtung, Einleitungsart)</li> <li>• Berechnung der Kräfteinleitungsstelle (z. B. Kräfteinleitung über die Ferse in das „Bodenblech“)</li> </ul>
 <p data-bbox="191 870 540 916">Bild 26: Infrarotkameras (links), reflektierende Marker (rechts)</p>	<p data-bbox="562 716 900 739">Kamerabasiertes Bewegungsanalysesystem</p> <ul data-bbox="562 746 944 808" style="list-style-type: none"> <li>• visuelle, berührungsfreie Bewegungsanalyse</li> <li>• Aufzeichnung der Bewegungstrajektorien von markanten Gelenkpunkten/Körperteilen</li> </ul>
 <p data-bbox="191 1185 546 1232">Bild 27: EMG-Elektroden (ohne Verkabelung)</p>	<p data-bbox="562 936 704 959">Mehrkanal-EMG</p> <ul data-bbox="562 967 955 1078" style="list-style-type: none"> <li>• Kennzeichnung der Muskelaktivierung bei der Pedalbetätigung (vgl. Kapitel 3.1.3 → „Abstütz- und Bedienkräfte“)</li> <li>• Untersuchung der Strategien für die Auswahl von Muskelgruppen</li> </ul>

<sup>26</sup> Erfasst wurden je zwei Schnittkräfte im Pedalarm in der x-z-Ebene und die Lagerreaktionskraft in der Koppel (vgl. [80 (Anlage 5, Variante 2)]). Aus diesen drei Messgrößen (vgl. Bild 48, S. 47) wurde der Fußkraftvektor (Betätigungsintensität, Kräfteinleitungsrichtung, Kräfteinleitungsart, vgl. Bild 6, S. 8) in der x-z-Ebene berechnet.


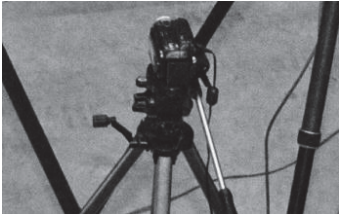
Beispieldarstellung	Teilsystem
 <p data-bbox="128 485 431 523">Bild 28: Druckmessmatten (montiert auf dem Fahrersitz)</p>	<p data-bbox="500 218 649 238">Druckmessmatten</p> <ul data-bbox="500 243 900 385" style="list-style-type: none"> <li>• Ermittlung der vom Fahrer verursachten Druckverteilung an Sitzfläche und Rückenlehne</li> <li>• Nach örtlicher Diskretisierung der Druckverteilung ergibt sich außerdem die Verteilung der in die Sitzfläche und die Rückenlehne eingeleiteten Normalkräfte<sup>27</sup></li> </ul>
 <p data-bbox="128 762 322 785">Bild 29: Videokamera</p>	<p data-bbox="500 537 726 557">Videokameras, Fotokameras</p> <ul data-bbox="500 562 900 608" style="list-style-type: none"> <li>• Protokollierung der Versuchssituation (getriggert und synchronisiert)</li> </ul>

Tabelle 3: Elemente des Messtechnikkonzepts

Weitere Analysetechnik kann bei Bedarf ergänzt werden. Die erfassten Messdaten werden mit einem Echtzeit-Industrie-PC synchronisiert und fusioniert (Bild 30).

<sup>27</sup> Die verwendeten Druckmessmatten erfassen mit einer konstruktiv bedingten örtlichen Auflösung für jeden einzelnen Messpunkt (hier: 4096 Stück) die in Normalrichtung eingeleitete Kraft. So wird eine Aussage zur Verteilung der Normalkräfte über die Fläche der Druckmessmatten möglich (vgl. Bild 44, S. 44). Anmerkung: Da die verwendeten Druckmessmatten flexibel sind, sind die Normalrichtungen der einzelnen Messpunkte nur näherungsweise parallel zueinander.

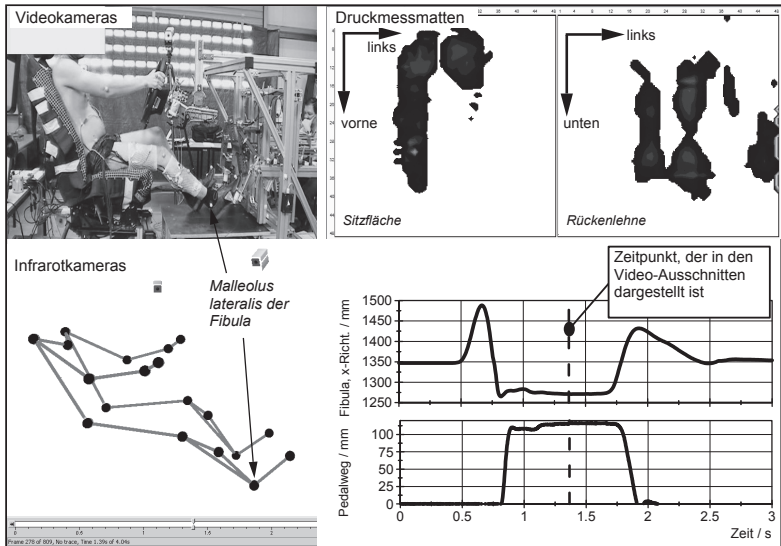


Bild 30: Datenfusion: Bewegungsabläufe beim Betätigen des Bremspedals; Zur Definition des Malleolus lateralis der Fibula: vgl. Bild 36, S. 37

**Parametervariationen** Es wurden gezielt der Einfluss der Körpermaße der Probanden, die Art der Pedalbetätigung und das Design des Cockpits auf die Abläufe beim Betätigen des Bremspedals untersucht.

**Probandenkollektiv** Schwerpunkt bei der Probandenauswahl war der Einfluss der unterschiedlichen Körpermaße (vgl. DIN 33402 [26]).

Proband	Kürzel	Körpergewicht / kg	Körperhöhe / mm	Fußlänge / mm	Beinlänge <sup>28</sup> / mm
männlich, 95. Perzentil	M95	99,0 (95,0) <sup>29</sup>	1915 (1910)	287 (290)	1245 (1260)
männlich, 50. Perzentil	M50	69,0 (72,5)	1790 (1790)	251 (270)	1076 (1155)
weiblich, 50. Perzentil	W50	63,0 (60,0)	1674 (1660)	247 (250)	999 (1100)
weiblich, 5. Perzentil	W05	52,5 (49,0)	1532 (1560)	209 (225)	872 (1020)

Tabelle 4: Probandenkollektiv, ausgewählte anthropometrische Parameter

Die Probandenstichprobe wurde so gewählt, dass mit dem Spektrum von der sehr kleinen Frau (ca. 5. Perzentil) bis zum sehr großen Mann (ca. 95. Perzentil) die typische Zielgruppe der Fahrzeugentwicklung abgedeckt werden konnte (Tabelle 4).

<sup>28</sup> Beinlänge ergibt sich aus der Summe der „Kniehöhe“ und der „Gesäß-Kniehöhe“ (vgl. [25])

<sup>29</sup> Werte in Klammern: Werte nach DIN 33402 (Altersgruppe 18-25 Jahre) [26]

**Betätigungsvarianten** Neben der Betätigungsintensität (*moderater Bremsvorgang* bzw. *Vollbremsung*, Tabelle A1, S. 136) wurde die Position des rechten Fußes vor der Bremsbetätigung (auf dem Fahrpedal → „mit Umsetzen“ bzw. vor dem Bremspedal → „ohne Umsetzen“) vorgegeben.

**Cockpitdesign** Einmal wurde der Fahrerarbeitsplatz in der Art eines typischen Pkw-Cockpits<sup>30</sup> (ähnlich Bild 31 links) und einmal in der Art eines typischen Van-Cockpits<sup>31</sup> (ähnlich Bild 31 rechts) gestaltet. Aus den unterschiedlichen Cockpitdesigns resultieren unterschiedliche Sitzpositionen, Betätigungsvorgänge und Kraftaufwendungen.

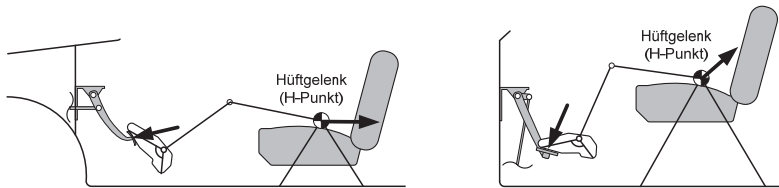


Bild 31: Schematische Darstellung der Unterschiede<sup>32</sup> in der ergonomischen Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes zwischen Pkw (links) und Van bzw. Nkw (rechts); nach [80]

### Mobile Versuchsumgebung

Zur Ergänzung der Untersuchungen an der stationären Versuchsumgebung wurden Tests im fahrenden Fahrzeug (mobile Versuchsumgebung) durchgeführt. Als wichtiger Einfluss kommt damit die Gesamtheit der dynamischen Fahrzeugreaktionen (Fahrzeugverzögerung, Aufbaubewegungen) hinzu. Insbesondere bei Untersuchungen zu MMS, die dynamische Fahrzeugreaktionen bedingen oder durch diese bedingt werden, ist es unbedingt ratsam, die stationär gewonnenen Ergebnisse auf diese Weise abzusichern und zu ergänzen.

Die folgende Tabelle 5 gibt einen Überblick über die wichtigsten Elemente des Messtechnikkonzepts. Auch hier kann weitere Analysetechnik bei Bedarf ergänzt werden. Die erfassten Messdaten werden ebenfalls mit einem Echtzeit-Industrie-PC synchronisiert und fusioniert.

<sup>30</sup> Typisches Cockpitdesign z. B. von Fahrzeugen der Kompakt-, Mittel- und Oberklasse

<sup>31</sup> Typisches Cockpitdesign von Großraumlimousinen zur Personenbeförderung (Hochdachkombis und Kleinbusse) ebenso wie von Lieferwagen (Kleintransporter). Deren Cockpits charakterisiert typischerweise eine im Vergleich zum klassischen Pkw-Cockpit erhöhte und aufrechtere Sitzposition.

<sup>32</sup> Schematische Darstellung der ergonomischen Gegebenheiten und der vorherrschenden Abstützrichtungen

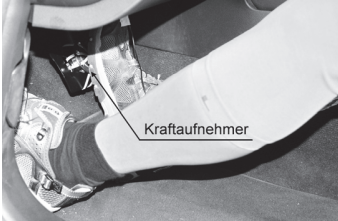


Beispieldarstellung	Teilsystem
 <p data-bbox="190 458 528 483">Bild 32: Kraftaufnehmer am Bremspedal</p>	<p data-bbox="565 218 962 263">Kraft-, Momenten-, Weg- und Winkelmesstechnik am Bremspedal</p> <ul data-bbox="565 269 962 386" style="list-style-type: none"> <li>• Erfassung der Betätigungsvorgänge direkt an der MMS (z. B. Pedalkraft, Pedalwinkel, Betätigungsgeschwindigkeit)</li> <li>• Erfassung der Betätigungsintensität, der Bedienkräfte und der Abstützkräfte</li> </ul>
 <p data-bbox="190 720 528 765">Bild 33: Berührungslose Geschwindigkeitsmessung</p>	<p data-bbox="565 495 962 517">Fahrodynamikmesstechnik</p> <ul data-bbox="565 523 962 568" style="list-style-type: none"> <li>• Erfassung der Fahrzeugdynamik (Geschwindigkeit, Verzögerung)</li> </ul>
 <p data-bbox="190 1074 528 1119">Bild 34: EMG-Elektroden (sichtbar an der rechten Wade)</p>	<p data-bbox="565 779 962 800">Mehrkanal-EMG</p> <ul data-bbox="565 806 962 924" style="list-style-type: none"> <li>• Kennzeichnung der Muskelaktivierung bei der Pedalbetätigung (vgl. Kapitel 3.1.3 → „Abstütz- und Bedienkräfte“)</li> <li>• Untersuchung der Strategien für die Auswahl von Muskelgruppen</li> </ul>

Tabelle 5: Elemente des Messtechnikkonzepts

### 3.1.2 Ablauf

Nachgestellt wurden unterschiedliche Situationen, wie sie im Fahralltag vorkommen können:

- Vorbeifahrt an geschwindigkeitsbegrenzenden Verkehrszeichen (*Anpassungsbremung*)
- Zufahren auf eine rote Ampel (*Zielbremung*)

- Halten des Fahrzeugs im Stillstand (z. B. an einer roten Ampel)
- *Notbremsungen* mit maximaler Verzögerung

### **Stationäre Versuchsumgebung**

Der Versuchsleiter kündigte zu jedem Teilversuch an, ob der nächste Bremsvorgang ein fiktiver *moderater Bremsvorgang* (*Zielbremsung*) oder eine fiktive *Vollbremsung* werden soll und ob sich der rechte Fuß bei Versuchsbeginn auf dem Fahrpedal ("mit Umsetzen") oder unmittelbar vor dem Bremspedal ("ohne Umsetzen") befinden muss. Die verbale Umschreibung der Vorgaben für den *moderaten Bremsvorgang* und die *Vollbremsung* ist in Tabelle A1 (S. 136) dokumentiert. Die Probanden hatten die *Pedalcharakteristiken* im Rahmen dieser Versuchsreihe nicht subjektiv zu bewerten. Betrachtet wurden ausschließlich die Betätigungsabläufe.

### **Mobile Versuchsumgebung**

Äquivalent zu den Untersuchungen in der stationären Versuchsumgebung kündigte der Versuchsleiter zu jedem Teilversuch die durchzuführende Aktion an. Auch hier wurden ausschließlich die Betätigungsabläufe betrachtet, sodass die Probanden die *Pedalcharakteristiken* ebenfalls nicht subjektiv zu bewerten hatten.

#### **3.1.3 Ergebnisse**

##### **Bewegungsabläufe bei der Bremsbetätigung (stationäre Versuchsumgebung)**

**Vorbetrachtung** Für die Untersuchungen an der stationären Versuchsumgebung mussten die Probanden die Vorgaben (*moderater Bremsvorgang* bzw. *Vollbremsung*) ohne Fahrzeugrückwirkung umsetzen.

Wie in Bild 35 ersichtlich wird, setzen die Probanden diese Vorgaben zwar interindividuell verschieden, aber intraindividuell sehr reproduzierbar um. Die aufgezeichneten Pedalwege liegen, ebenso wie die Betätigungsdauern, je Proband und Szenario sehr nahe beieinander. Die Pedalwege für das Szenario *Vollbremsung* sind dabei erwartungsgemäß deutlich größer als die Pedalwege für das Szenario *moderate Abbremsung*.



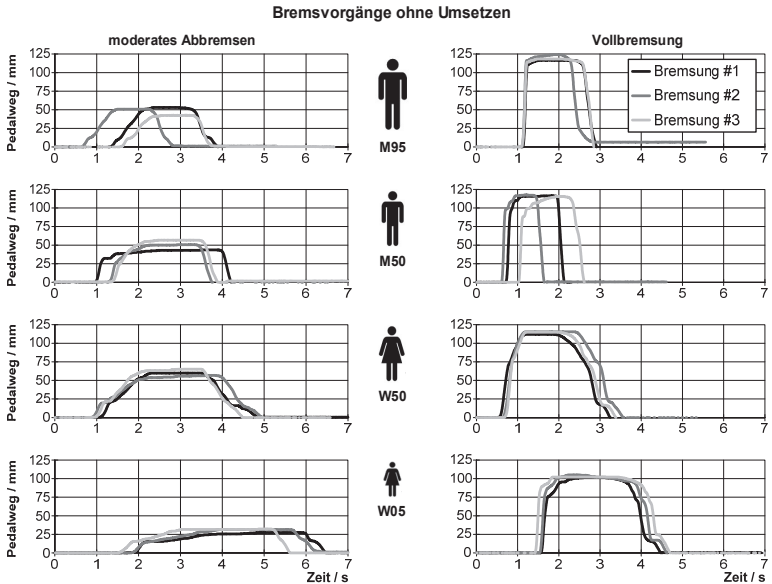


Bild 35: Pedalwege bei der Betätigung des Bremspedals in der stationären Versuchsumgebung (Pkw)

**Bewegungsabläufe am Fuß** Am Beispiel der Fußbewegung<sup>33</sup> während der Bremsbetätigung werden nachfolgend fahrerindividuelle Unterschiede im Betätigungsverhalten herausgearbeitet.

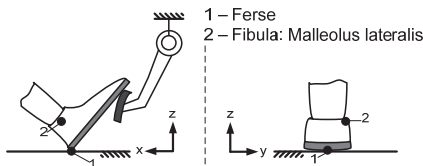


Bild 36: Kontaktpunkt Ferse/Bodenplatte (1) und Malleolus lateralis der Fibula (2); nach [84]

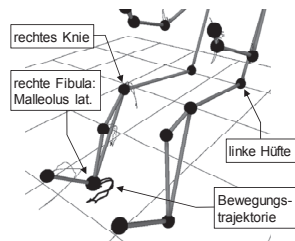


Bild 37: Bewegungsanalyse: beispielhafte 3D-Darstellung der Marker und der Bewegungstrajektorien

<sup>33</sup> Aufgezeichnet wurde die Bewegung des Malleolus lateralis (Außenknöchel) der Fibula (Wadenbein) des rechten Beins (Bild 36)

Die Bewegungsdaten (Bild 38) wurden aus den mit dem kamerabasierten Bewegungsanalysesystem (vgl. Bild 26, S. 31) gewonnenen Bewegungstrajektorien (Bild 37) extrahiert. Während der große Proband *M95* im Verlauf nahezu aller Betätigungsvorgänge die Ferse aufgesetzt bzw. abgestützt lassen konnte, war es der kleinen Probandin *W05* zu keiner Zeit möglich, die Ferse abzstützen (Bild 38). Der Malleolus lateralis der Fibula des rechten Beins ändert seine Position in z-Richtung ("Höhe") bei Proband *M95* bei der Bremsbetätigung kaum. Die geringe Veränderung der Position in z-Richtung bei der *Vollbremsung* resultiert nicht aus einem Abheben der Ferse, sondern aus einer Kippbewegung des Fußes und des Malleolus lateralis um die Ferse herum. Bei den Probanden *M50* und *W50* sind während des *moderaten Abbremsens* lediglich geringe Änderungen in der z-Richtung zu verzeichnen. Bei der *Vollbremsung* sind die Änderungen jedoch bereits sehr deutlich. Ein Vergleich mit dem Kontrollvideo zeigt, dass diese Probanden die Ferse bei der *Vollbremsung* anheben und den Fuß vollständig auf dem Bremspedal abstellen. Bei Probandin *W05* zeigt sich für jeden Bremsvorgang, auch für die lediglich *moderaten Abbremsungen*, eine deutliche Änderung in der z-Richtung, sobald der Bremsvorgang beginnt und wenn der Bremsvorgang beendet wird.

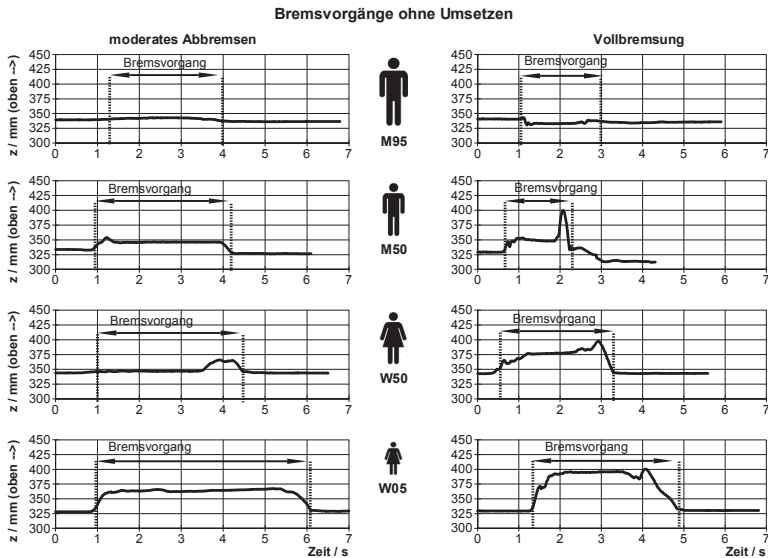


Bild 38: Bewegungstrajektorien des Malleolus lateralis der Fibula (vgl. Bild 36) des rechten Beins (z-Richtung, Pkw)

Die interindividuell unterschiedlichen Betätigungsdauern (Bild 38, vgl. auch Bild 35 und Bild 42) sind offensichtlich auf die künstliche Situation zurückzuführen (fehlende Rückmeldung darüber, wann das fiktive Fahrzeug zum Stillstand gekommen ist). Die Überhöhungen (Peaks) im Betätigungsverlauf (Bild 38, hier: *M50* und *W50*) sind weder reproduzierbar noch repräsentativ und möglicherweise auch auf die spezielle Versuchssituation zurückzuführen. Beide Effekte werden als unkritisch bezüglich der qualitativen Aussagekraft der Versuchsreihe eingestuft.

Auch bei der Betrachtung der Bewegungstrajektorien in der y-z-Ebene (Bild 39, Bild A7, S. 139) fällt sofort auf, dass der Malleolus lateralis der Fibula des rechten Beins von Proband *M95* kaum Bewegung<sup>34</sup> bzw. tendenziell weniger Bewegung<sup>35</sup> als bei den kleineren Probanden unterliegt. In x-Richtung ist dieser Unterschied nicht deutlich ausgeprägt (vgl. Bild A5, S. 137, vgl. Bild A6, S. 138).

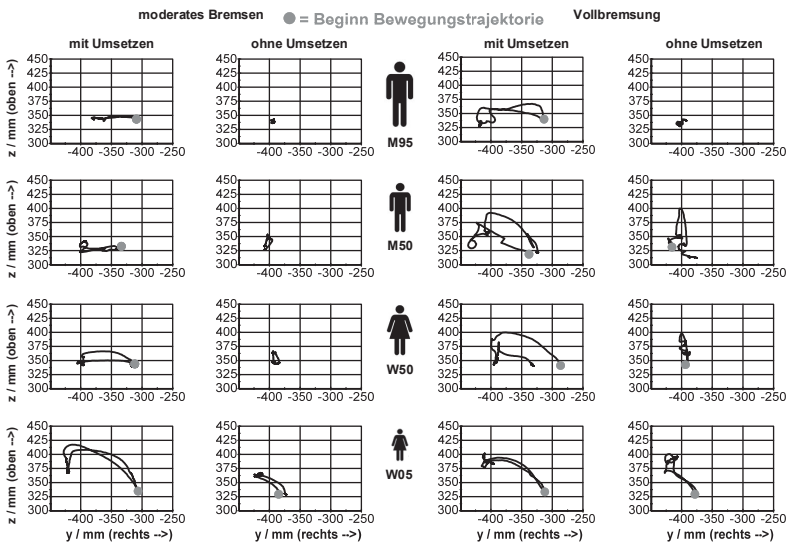


Bild 39: Bewegungstrajektorien des Malleolus lateralis der Fibula (vgl. Bild 36) des rechten Beins (y-z-Ebene, Blick von hinten, Pkw)

Gerade bei Pedalbetätigungen mit nur sehr geringer Pedalkraft (*moderate Abbremsung*: *Zielbremsung*, *Anpassungsbremung*) darf es als ergonomisch ungünstig

<sup>34</sup> Ohne Umsetzen

<sup>35</sup> Mit Umsetzen

angesehen werden, wenn der Fuß neben dem Kontakt Fußballen/Bremspedal nicht zusätzlich über den Kontakt Ferse/Bodenblech abgestützt werden kann. Der Fahrer muss im Fall der fehlenden Fersenabstützung den Fuß vor bzw. über dem Bremspedal entgegen der Gewicht- und Trägheitskraft des Fußes halten. Das Bein kann dabei vereinfacht als kinematische Kette mit den Gliedern Oberschenkel, Unterschenkel und Fuß, den Gelenken Hüftgelenk, Kniegelenk und Sprunggelenk und dem Fixpunkt Oberkörper angenommen werden. Diese kinematische Kette hat ein Eigengewicht und entlang der Kette verstärken sich unwillkürliche Bewegungen in Richtung Fuß. Es ist zwangsläufig so, dass in diesem Fall die Bremsbetätigung weniger feinfühlig dosiert werden kann, als wenn über den Kontakt Ferse/Bodenblech eine zusätzliche Abstützung, die der Entlastung und Bewegungsdämpfung dient, erfolgen kann.

Bei der *Vollbremsung* gilt diese Betrachtung nicht mehr. Typischerweise sind für eine *Vollbremsung* erhebliche Pedalwege erforderlich, sodass die Pedalbetätigung nicht mehr nur aus einer Kippbewegung des Fußes um die Ferse herum heraus erfolgen kann. Der Fuß wird je nach Situation zunächst in einer kombinierten Kipp-Gleit-Bewegung zwischen Ferse und Bodenblech in Richtung Pedal bewegt. Anschließend wird er i. d. R.<sup>36</sup> vollständig abgehoben und ausschließlich auf dem Pedal abgestützt. Da dann die Summe aus Gewicht- und Trägheitskraft des auf dem Pedal abgestützten Bewegungsapparats im Vergleich zur erforderlichen Pedalkraft klein ist, kann der Fuß voll auf dem Bremspedal abgestützt werden, ohne gegenhalten zu müssen. Es kommt nun nur noch darauf an, eine möglichst hohe Kraft in das Pedal einzuleiten. Eine dosierte Betätigung wie bei der *moderaten Abbremsung* findet nicht mehr statt (vgl. Kapitel 3.1.3 → „Muskelaktivitäten“ → „Einfluss der Bremssituation“).

**Bewegungsabläufe am Oberkörper** Bild 41 zeigt für Probandin *W05* eine Auffälligkeit in der Bewegung des Oberkörpers (visualisiert durch die Bewegungstrajektorie des Markers *Sternum* „unten“, vgl. Bild 40). Für die Bremsaufgabe *Vollbremsung* bewegt die Probandin den Oberkörper im Cockpitdesign *Van* kaum nach hinten in Richtung Rückenlehne. Auf dieses Phänomen wird im nachfolgenden Abschnitt detailliert eingegangen.

---

<sup>36</sup> Ausnahmen sind möglich, z. B. bei Personen mit sehr großen Füßen → 95.-Perzentil-Mann

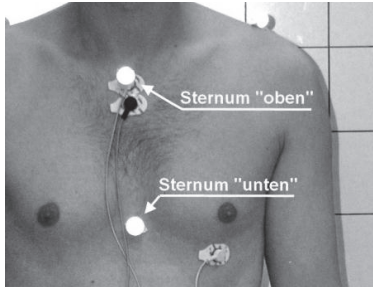


Bild 40: Markierungen (Marker) am Sternum<sup>37</sup>

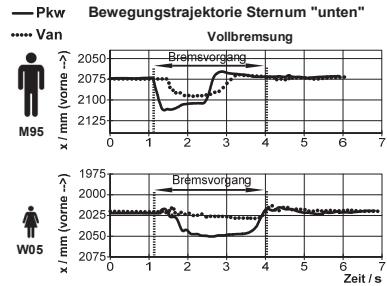


Bild 41: Bewegungstrajektorie des Markers Sternum „unten“ (x-Richtung)

### Abstütz- und Bedienkräfte (stationäre Versuchsumgebung)

**Vorbetrachtung** Aus Bild 42 wird exemplarisch ersichtlich, wie die Probanden die Vorgaben *moderater Bremsvorgang* bzw. *Vollbremsung* ohne Fahrzeugrückwirkung an der stationären Versuchsumgebung (vgl. Kapitel 3.1.1) umgesetzt haben. Vergleichbar mit den Pedalwegen (Bild 35, S. 37) liegen die aufgezeichneten Pedalkräfte je Proband und Szenario sehr nahe beieinander. Auch hier wird jedoch deutlich, dass die Umsetzung interindividuell unterschiedlich ausfällt. Es zeigt sich ein deutlicher Trend vom 95.-Perzentil-Mann (große Kräfte) hin zur 5.-Perzentil-Frau (kleine Kräfte). Die aufgebrachten Pedalkräfte korrelieren, mangels dynamischer Fahrzeugrückwirkungen, mit den körperlichen Gegebenheiten und nicht mit der, im abgebremsten Fahrzeug zu erreichenden, Fahrzeugverzögerung. Eine kräftige Person nimmt eine gegebene aufzubringende Kraft anders wahr als eine weniger kräftige Person (vgl. Kapitel 3.1.3 → „Muskelaktivitäten“ → „Einfluss des Fahrers“). Die Pedalkräfte für das Szenario *Vollbremsung* sind etwa eine Zehnerpotenz größer als für das Szenario *moderate Abbremmung*. Für das Szenario *moderate Abbremmung* fallen die Pedalkräfte tendenziell höher aus ( $F=50-150\text{ N}$ ), als sie in einem typischen Pkw erforderlich wären ( $F \ll 75\text{ N}$ , vgl. Messergebnisse in Kapitel 4.1.3 und Kapitel 6.2, vgl. [80]).

<sup>37</sup> Brustbein

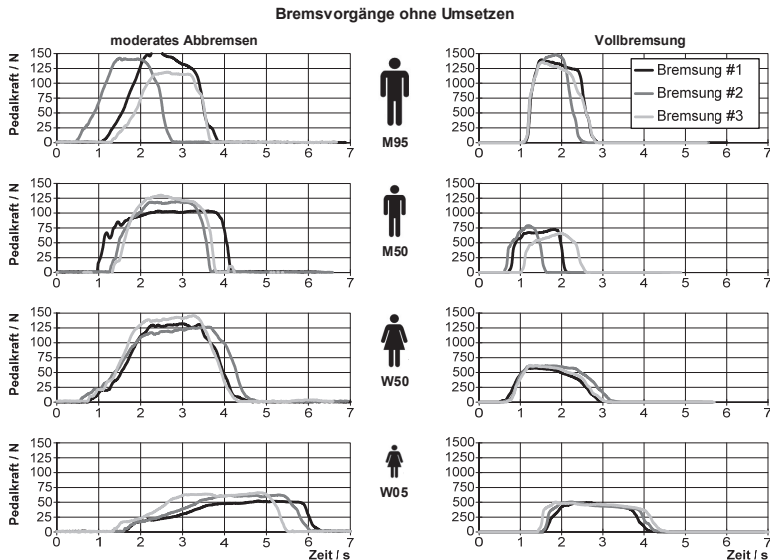


Bild 42: Pedalkräfte bei der Betätigung des Bremspedals in der stationären Versuchsumgebung (Pkw)

**Abstützkräfte** Anhand der in den Sitz eingebrachten Abstützkräfte können Rückschlüsse auf individuelle Besonderheiten bei der Bremsbetätigung gezogen werden. Weiterhin gestattet diese Art von Untersuchung Aussagen hinsichtlich der ergonomischen Eignung des Fahrerarbeitsplatzes für unterschiedlich große Fahrer. Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden die Abstützkräfte in Normalrichtung zu Sitz und Rückenlehne erfasst (Bild 28, S. 32).

Beim *moderaten Abbremsen* sind die in die Sitzfläche eingeleiteten Normalkräfte nahezu gleich verteilt zwischen linkem und rechtem Oberschenkel bzw. linker und rechter Gesäßhälfte (Bild 43 links). Bei den *Vollbrems*-Situationen kommt es zu einer deutlichen Verschiebung des Schwerpunkts der Normalkräfte hin zur rechten Körperhälfte (Bild 43 rechts). An der Rückenlehne ist eine Verschiebung des Schwerpunkts der Normalkräfte zu einer Körperhälfte hin nicht auszumachen. Hier kommt es lediglich zu einer deutlichen Zunahme des Betrags der Normalkräfte (vgl. Bild 45). Der Körper stützt sich bei der *Vollbremsung* nahezu vollständig auf dem rechten Bein und an der Rückenlehne ab. Bedingt durch die Anatomie des Beins und der Anordnung des Sitzes drückt der Oberschenkel des durchgestreckten rechten Beins auf die Sitzfläche (Bild A8, S. 140). Der linke Oberschenkel wird stark entlastet. Der linke Fuß ist

in diesem Beispiel auf der Fußstütze abgestellt. Das linke Knie liegt nicht auf der Sitzfläche auf.

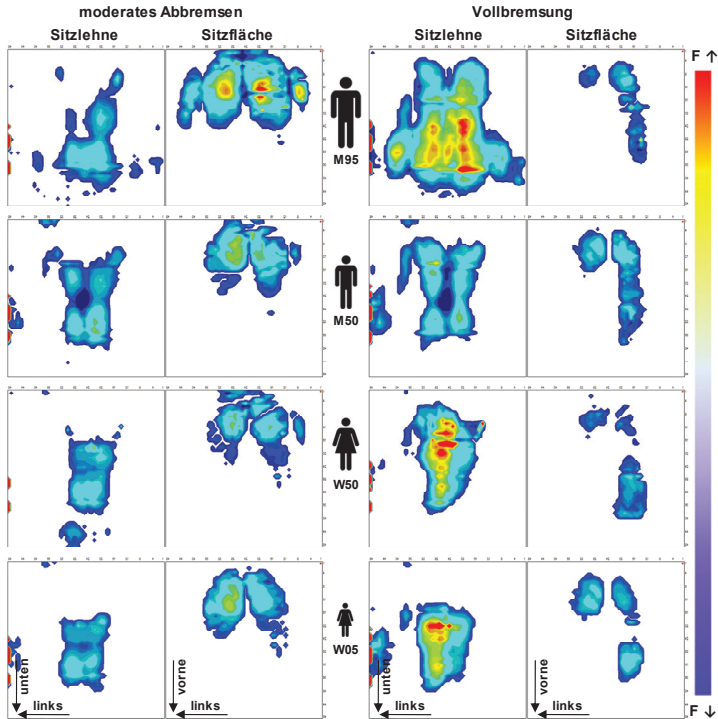


Bild 43: Momentaufnahme der Verteilung der Normalkräfte in der Sitzfläche bzw. der Rückenlehne des Fahrersitzes bei der Bremsbetätigung (Fahrzeugkonfiguration *Pkw*)

Eine Besonderheit zeigt sich im Vergleich der Cockpitdesigns *Pkw* und *Van* bei der kleinen Probandin *W05*. Während sich die in die Rückenlehne eingeleiteten Normalkräfte für alle anderen Probanden bzw. alle anderen Situationen im Fall der *Vollbremsung* erhöhen, fällt das Kraftniveau in dieser Situation bei Probandin *W05* im *Van* ab (Bild 44). Die Kontaktfläche zwischen Rücken und Rückenlehne wird gleichzeitig signifikant kleiner.

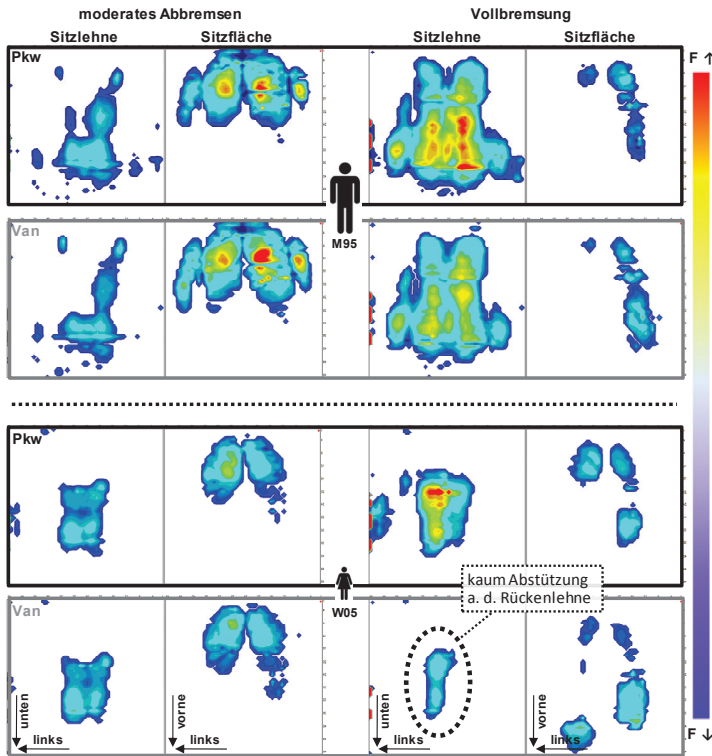


Bild 44: Momentaufnahme der Verteilung der Normalkräfte in der Sitzfläche bzw. der Rückenlehne des Fahrersitzes bei der Bremsbetätigung (Vergleich Fahrzeugkonfigurationen *Pkw* und *Van*)

Bild 45 und, im Detail, Bild 46 zeigen die zeitlichen Verläufe der Gesamtnormalkraft<sup>38</sup> aufgeschlüsselt in Sitzfläche und Lehne. Diese Daten zeigen in Übereinstimmung mit dem Kontrollvideo und den Daten der Bewegungsanalyse (vgl. Kapitel 3.1.3 → „Bewegungsabläufe bei der Bremsbetätigung“ → „Bewegungsabläufe am Oberkörper“), dass sich die Probandin *W05* bei der *Vollbremsung* in der Versuchsumgebung *Van* nicht an der Lehne abstützt (Summe der Normalkräfte an der Rückenlehne wird während der Bremsbetätigung geringer). Stattdessen bringt sie die für die Pedalbetätigung erforderliche Gegenkraft auf, indem sie sich an das Lenkrad heranzieht. In einer realen Not-

<sup>38</sup> Für die *Gesamtnormalkraft* werden die Normalkräfte jedes Messpunkts einer Druckmessmatte (hier: 4096 Stück) aufaddiert. Sie entspricht also der Summe der in Normalrichtung auf eine Druckmessmatte aufgebrauchten Kräfte. Vgl. Fußnote 27, S. 32.



situation, wie einer *Vollbremsung* während eines Ausweichmanövers, wäre die Überlagerung von hohen Zugkräften und schnellen dosierten Lenkbewegungen am Lenkrad deutlich nachteilig für die Beherrschung der Fahrzeugquerdynamik.

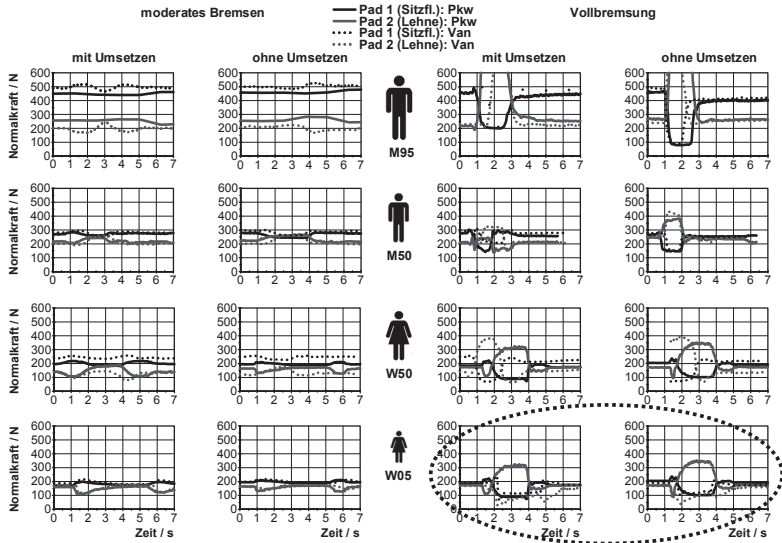


Bild 45: Zeitliche Verläufe der Normalkräfte auf Sitzfläche bzw. der Rückenlehne des Fahrersitzes

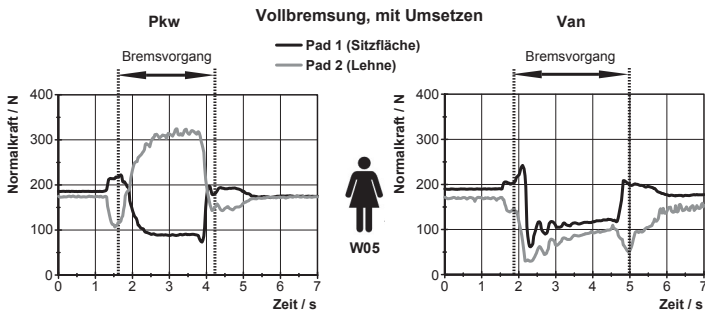


Bild 46: Zeitliche Verläufe der Normalkräfte auf Sitzfläche bzw. der Rückenlehne des Fahrersitzes (*Vollbremsung*, mit Umsetzen, Detailansicht für Probandin *W05*)

Beim untersuchten Cockpitdesign *Van* konnte als Ursache für die abweichende Vollbremsstrategie der Probandin *W05* die im Vergleich zum *Pkw* abweichende Relativlage von Bremspedal und Fahrersitz identifiziert werden (Bild 47). Das

Bremspedal war beim *Van* vor allem signifikant niedriger (ca. 120 mm in -z-Richtung) angeordnet. Der Abstand in x-Richtung war beim *Van* zusätzlich noch leicht größer (ca. 10 mm). Daraus resultieren zwei Effekte, die für Probandin *W05* bei der *Vollbremsung* eine Abstützung mit dem Rücken und dem Gesäß erschweren bzw. unmöglich machen:

- Der Abstand von der Vorderkante der Sitzfläche zum Bremspedalpad wird signifikant größer und damit auch der Abstand zwischen den Abstützstellen „Rückenlehne“ und „Bremspedalpad“. Zudem beträgt die Gesäß-Knielänge<sup>39</sup> von *W05* lediglich 516 mm bei einer Länge der Sitzfläche von ca. 500 mm.
- Die Probandin muss das Bremspedal tendenziell eher "nach unten" als "nach vorne" betätigen.

Das vergleichsweise kurze Bein befindet sich hier bei Kontakt zum unbetätigten Bremspedal schon nahe an der Strecklage. Die Kniekehle schließt mit der Vorderkante der Sitzfläche ab. Bei fortschreitender Pedalbetätigung kann das Knie nicht nach unten ausweichen. Würde die Probandin sich nun mit dem Gesäß oder dem Rücken an der Rückenlehne abstützen, würde sich die Kniekehle hinter die Vorderkante der Sitzfläche schieben. Die Bewegungsfreiheit des Beins würde noch weiter eingeschränkt werden. Bei der Bremsbetätigung mit hoher Kraft kommt es nun dazu, dass sich die Probandin, bedingt durch diese ergonomischen Gegebenheiten, aus dem Sitz heraushebt (vgl. Kapitel 3.1.3 → „Muskelaktivitäten“ → „Einfluss des Fahrzeugs“).

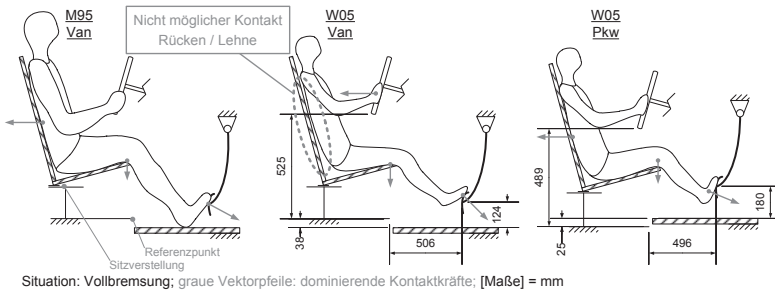


Bild 47: Schematische Darstellung der ergonomischen Gegebenheiten für die Probanden *M95* bzw. *W05* bei einer *Vollbremsung* im *Van* bzw. *Pkw*; nach [84]

Durch die fehlende Abstützung an der Rückenlehne und die gestreckte Beinhaltung kann nicht genügend Kraft auf das Bremspedal aufgebracht werden.

<sup>39</sup> Vgl. DIN 33402 [25]

Die Probandin muss die Gegenkraft für die Pedalbetätigung aufbringen, indem sie sich an das Lenkrad heranzieht (Bild 47).

Bezüglich der Abstützkräfte gibt es, im Gegensatz zu den Bewegungsabläufen am Fuß (Bild 39, S. 39), keine signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien *mit Umsetzen* und *ohne Umsetzen* (Bild 45).

**Bedienkräfte** Unter Auswertung der Daten, die mit speziell ausgerüsteten Messpedalen (Bild 25, S. 31) gewonnen wurden, wurde der Winkel<sup>40</sup> berechnet, unter dem die Fußkraft in die Pedale eingeleitet wurde. Die bereits im Abschnitt „Abstütz- und Bedienkräfte“ → „Abstützkräfte“ beschriebenen Phänomene bei der Bremsbetätigung durch deutlich unterschiedlich große Probanden konnten hier erneut bestätigt werden. Während der große Proband *M95* beim Bremsmanöver *Vollbremsung* tendenziell eher „nach vorne“ betätigt, also die Betätigungskraft unter einem kleinen Winkel in das Pedal einleitet, ist der Betätigungswinkel bei der kleinen Probandin *W05* größer. Sie betätigt eher nach „schräg unten“ (Bild 48, Bild 49). Die unterschiedlichen Betätigungswinkel, die neben der Körpergröße maßgeblich auch von der Einstellung des Sitzes in x- und z-Richtung abhängen, bedingen bei gleicher Betätigungskraft<sup>41</sup> unterschiedliche Wirkkräfte<sup>42</sup>. Bild 47 illustriert schematisch die bei der Versuchsdurchführung vorherrschenden ergonomischen Gegebenheiten.

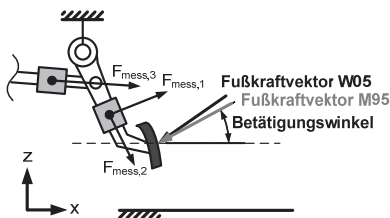


Bild 48: Schematische Darstellung eines Messpedals und der Fußkraftvektoren der Probanden *M95* und *W05* während des Bremsmanövers *Vollbremsung*

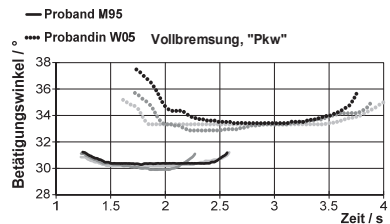


Bild 49: Zeitliche Verläufe der Betätigungswinkel beim Bremsmanöver *Vollbremsung* (jeweils 3 Betätigungsvorgänge dargestellt)

### Muskelaktivitäten (mobile Versuchsumgebung)

Die Analyse der Muskelaktivität mittels EMG eröffnet die Möglichkeit, Einflüsse unterschiedlicher Parameter auf das Bedienverhalten des Menschen zu

<sup>40</sup> Betätigungswinkel, vgl. Bild 48

<sup>41</sup> Fußkraft, vgl. Bild 6

<sup>42</sup> Pedalkraft, vgl. Bild 6

identifizieren. "Ein Elektromyogramm (EMG) spiegelt den elektrophysiologischen Erregungsvorgang von Muskeln, die nicht als Ganzes, sondern in fixen Gruppierungen von Muskelfasern (sogenannte motorische Einheiten) aktiviert werden, wider. Aufgezeichnet werden die Summenaktionspotenziale dieser motorischen Einheiten bzw. deren Interferenzmuster [...] Bei der Oberflächen-Elektromyografie erfolgt die Registrierung von relativ oberflächennahen EMG-Aktivitäten [...]" [73] Da diese nicht-invasive, in den Bewegungswissenschaften etablierte, Technik im Vergleich zur Anwendung von Nadel- oder Fine-Wire-Elektroden auf eine hohe Akzeptanz bei den Probanden trifft und die für die nachfolgenden Untersuchungen relevanten Muskel mit Oberflächenelektroden ableitbar sind (Bild A9, S. 141, Bild A10, S. 142, vgl. auch Bild 50), wurde dieser Methode der Vorzug gegeben.

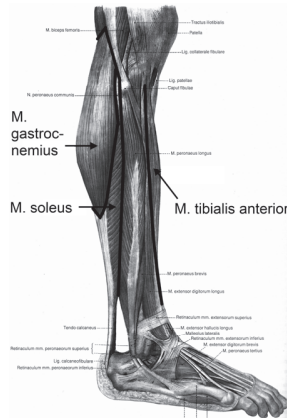


Bild 50: Auswahl von, für die Pedalbetätigung, wichtigen Muskeln des Beins; nach [79]

Exemplarisch werden nachfolgend die Einflüsse von Bremssituation, Fahrer und Fahrzeug auf die Muskelaktivitäten bei der Betätigung des Bremspedals betrachtet.

**Einfluss der Bremssituation** Ein typischer zeitlicher Verlauf der Muskelaktivierung bei der Betätigung des Bremspedals ist in Bild 51 am Beispiel einer *Vollbremsung* dargestellt.

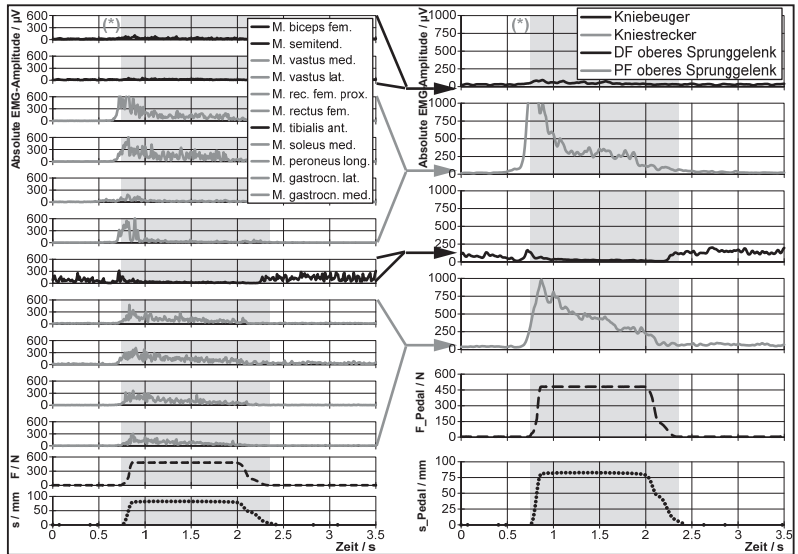


Bild 51: Effektivwerte der EMG-Muskelaktivität während eines Bremsvorgangs (*Vollbremsung*, aufgeschlüsselt nach einzelnen Muskeln (links) bzw. zusammengefasst zu Muskelgruppen (rechts), (\*): Zeitabschnitt mit Fuß-Pedal-Kontakt)

In Bild 52 sind die EMG-Aktivitäten ausgewählter Muskeln des rechten Beins für unterschiedliche Bremsmanöver aufgezeigt.

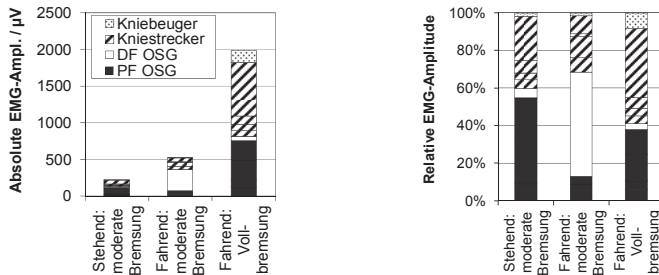


Bild 52: EMG-Muskelaktivität während des Bremsvorgangs (mittlere EMG-Amplitude; absolut und relativ; nach [73])

Der Anteil der Aktivität des Musculus tibialis anterior (Dorsalflexor des oberen Sprunggelenks bzw. DF OSG, weiße Balken) hängt erheblich vom durchgeführten Bremsmanöver ab. Durch Kontraktion des M. tibialis anterior (vgl.

Bild 50) wird der Fuß vom Bremspedal weg nach oben angewinkelt - aus anatomischer Sicht wird dabei der Fuß im oberen Sprunggelenk in Richtung des Fußrückens gebeugt (Dorsalflexion, vgl. Bild 52: DF OSG). Während bei einer *Vollbremsung*, bei der die Modulation der Fahrzeugverzögerung nicht im Vordergrund steht, der Dorsalflexor<sup>43</sup> kaum beansprucht wird, nimmt dessen absoluter und relativer Anteil bei *moderaten Bremsungen* deutlich zu. Das absolute Niveau der EMG-Aktivität ist bei der *Vollbremsung* um ein Vielfaches höher als bei der *moderaten Bremsung*.

Durch Kontraktion der Musculi soleus und gastrocnemius (vgl. Bild 50) wird der Fuß in Richtung Bremspedal nach unten abgewinkelt - aus anatomischer Sicht wird dabei der Fuß im oberen Sprunggelenk in Richtung der Fußsohle gebeugt (Plantarflexion, vgl. Bild 52: PF OSG). Das führt in Verbindung mit einer Streckung, zumindest aber mit einer Stabilisierung von Knie- und Hüftgelenk, zur Betätigung des Bremspedals. Eine Steigerung der Muskelkraft wird via Zentralnervensystem durch die Erhöhung der Erregungsfrequenz bereits arbeitender motorischer Einheiten und/oder durch das Zuschalten weiterer, meist größerer motorischer Einheiten gesteuert [33]. Eine Positions- oder Kraftregelung erfolgt darüber hinaus durch das Zusammenspiel von Agonist<sup>44</sup>, Synergisten<sup>45</sup> und Antagonisten<sup>46</sup>. Der Dorsalflexor M. tibialis anterior ist Gegenspieler der Plantarflexoren M. soleus und M. gastrocnemius. Die beim Einstellen einer Fahrzeugverzögerung (z. B. *moderate Bremsung*) notwendige Regalarbeit schlägt sich deshalb im überproportional großen Aktivitätsanteil des, das Sprunggelenk stabilisierenden, Dorsalflexors nieder (Bild 52: DF OSG). [71] Das Bremsmanöver *moderate Bremsung* wurde im stehenden Fahrzeug wiederholt. Hier sollten sich die Probanden vorstellen, auf eine rote Ampel zuzufahren und davor anzuhalten. Der relative Anteil der Dorsalflexoraktivität liegt auf ähnlich geringem Niveau wie bei der *Vollbremsung*. Dieses Ergebnis erscheint plausibel, da im stehenden Fahrzeug keine Fahrzeugverzögerung moduliert werden kann. [73] Der beschriebene Effekt verdeutlicht, dass bei Ergonomieuntersuchungen in nicht realen Umgebungen, wie es z. B. bei Fahr simulatoren der Fall ist, genau abzuwägen ist, ob der Verzicht auf eine realitätsnahe Fahrzeugrückwirkung zulässig ist.

**Einfluss des Fahrers** Je nach Ausprägung der Skelettmuskulatur können identische *Pedalcharakteristiken* von verschiedenen Probanden unterschiedlich

---

<sup>43</sup> M. tibialis anterior

<sup>44</sup> „Spieler“; einer von paarweise gegensätzlich wirkenden Muskeln; bewirkt eine Bewegung, die der des Antagonisten („Gegenspieler“) entgegengesetzt ist

<sup>45</sup> Mehrere Muskeln, die zusammen in die gleiche Richtung wirken

<sup>46</sup> „Gegenspieler“; einer von paarweise gegensätzlich wirkenden Muskeln; wirkt dem Agonisten („Spieler“) entgegen

wahrgenommen werden. Eine kräftige Person nimmt eine vorgegebene aufzubringende Kraft anders wahr als eine weniger kräftige Person. Die von einem Muskel aufgebrachte Kraft steht in einem annähernd linearen Zusammenhang zu seiner mittleren EMG-Amplitude [10]. Dieser Zusammenhang ist aber für jeden Muskel und für jedes Individuum unterschiedlich. Versuche, die mit zwei unterschiedlich kräftigen Probanden durchgeführt wurden, machen diesen Effekt deutlich (Bild 53). Proband Nr. 1 ist ein trainierter Triathlet, während Proband Nr. 2 nur gelegentlich Freizeitsport betreibt. Die Messergebnisse wurden während eines Auto-Motor-und-Sport-Bremstests (AMS-Test<sup>47</sup>) gewonnen, der aus ergonomischer Sicht mit dem Bremsmanöver *Vollbremsung* aus dem vorangegangenen Abschnitt vergleichbar ist (vgl. Bild 52). Proband Nr. 1 wendete im Mittel eine höhere Betätigungskraft auf als Proband Nr. 2 (Bild 53 links). Trotzdem erreicht Proband Nr. 2 deutlich höhere EMG-Amplituden in der unteren Extremität (Bild 53 Mitte). Auch die EMG-Amplituden in der oberen Extremität und im Thorax fallen bei Proband Nr. 2 höher aus (Bild 53 rechts). Er aktiviert seine Muskeln stärker. Der kräftigere Proband Nr. 1 muss offenbar weniger Aufwand betreiben, um die gleiche Bremsaufgabe bei gleichzeitig höherer Betätigungskraft auszuführen als Proband Nr. 2.

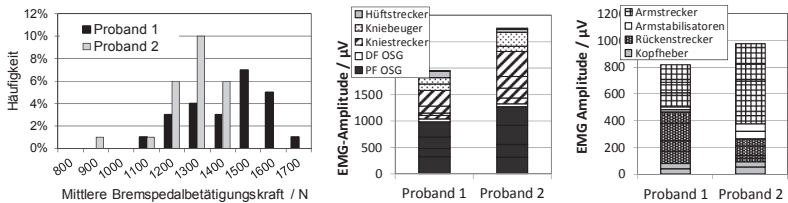


Bild 53: Links: Verteilung d. mittleren Bremspedalbetätigungskräfte während des Bremsvorgangs beim AMS-Test; Mitte, rechts: EMG-Muskellaktivität während des Bremsvorgangs beim AMS-Test (mittlere EMG-Amplitude; Mittelwert aus je 10 Bremsvorgängen); nach [73]

Bedingt durch das regelmäßige Training von Proband Nr. 1, ist dessen Muskelkoordination optimiert. So können die durch die Nervenfasern erregten motorischen Einheiten höhere Kräfte erzeugen und das Aktivierungsniveau gleichzeitig länger aufrechterhalten [70]. Für Probandenfahrversuche zur Beurteilung von Schnittstelleneigenschaften lässt sich ableiten, dass für die Auswahl der Versuchsteilnehmer auch deren physische Kondition berücksichtigt werden sollte. Es muss überprüft werden, wo die Probanden innerhalb des Spektrums

<sup>47</sup> Der Auto-Motor-und-Sport-Bremstest (AMS-Test) besteht aus 10 unmittelbar hintereinander durchgeführten Vollbremsungen aus einer Startgeschwindigkeit von  $v_{FZG} \approx 100$  km/h bis in den Stillstand.

an unterschiedlichen Trainingszuständen einzuordnen sind und ob die jeweilige Probandengruppe repräsentativ für die anstehende Aufgabe ist. Entwicklungsentscheidungen zu Bedienelementen, bei deren Betätigung nennenswerte Kräfte aufzubringen sind, die aufgrund der Beurteilung einzelner Personen getroffen werden, sind vor diesem Hintergrund kritisch zu hinterfragen.

MMS, die bezüglich der Bedienkräfte variabel bzw. adaptiv sind, könnten hier Vorteile bringen. Das in Kapitel 5 vorgestellte Fahrzeug (Bild 100, Bild 101, S. 86) mit variabler Pedal- und Bremscharakteristik ist prinzipiell dazu geeignet, an den Trainingszustand anpassbare Schnittstelleneigenschaften (hier: Pedal- und Bremscharakteristik) zu evaluieren. Auch die in Kapitel 3.1.1 vorgestellte stationäre Versuchsumgebung (Bild 23, S. 29) mit anpassbaren Bedienelement-Betätigungscharakteristiken bietet sich hierfür an.

**Einfluss des Fahrzeugs** In den folgenden Darstellungen ist der Einfluss des Fahrzeugkonzepts und damit auch der Sitzergonomie auf die eingesetzten Muskeln aufgezeigt. Es handelt sich bei den untersuchten Fahrzeugen um einen Sportwagen („Sport“), eine Limousine der oberen Mittelklasse („Limousine“) und ein leichtes Nutzfahrzeug („Nkw“). Das zugrunde liegende Bremsmanöver ist wieder der AMS-Test, bei dem der Fahrer physisch stark gefordert wird. In Bild 54 ist die Verteilung der mittleren Bremspedalbetätigungskräfte je Bremsvorgang für die 3 unterschiedlichen untersuchten Fahrzeugkonzepte aufgetragen. Für jedes Fahrzeug gehen in diese Auswertung zwischen 25 und 50 Bremsvorgänge ein. Es kristallisiert sich deutlich heraus, dass das Häufigkeitsmaximum für das Nutzfahrzeug bei deutlich geringeren Kräften als bei den beiden Pkws liegt.

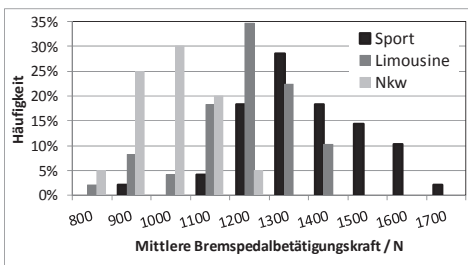


Bild 54: Verteilung der mittleren Bremspedalbetätigungskräfte während des Bremsvorgangs beim AMS-Test; nach [71]

Die Betrachtung der EMG-Muskelaktivität im rechten Bein und der Hüfte (Bild 55 links) und in ausgewählten Muskeln des Oberkörpers und der Arme (Bild 56 links) liefert ein ähnliches Bild. Auch hier ist die EMG-Muskelaktivität für den Vollbremsvorgang im Nutzfahrzeug niedriger als in den Pkws.



Als Erklärung für die unterschiedlichen maximal aufbringbaren Kräfte und EMG-Muskelaktivitäten kann die deutlich voneinander abweichende Sitzergonomie der untersuchten Fahrzeuge herangezogen werden. Bild 31 (S. 34) verdeutlicht diese schematisch. Die sehr aufrechte Sitzposition im Nkw führt dazu, dass sich der Fahrer beim kräftigen Betätigen des Bremspedals tendenziell aus dem Sitz heraus hebt. Dadurch ist die maximale Betätigungskraft, die er aufbringen kann, unter Vernachlässigung der Abstützung durch die Arme und die Reibung zwischen Fahrer und Rückenlehne, näherungsweise durch sein Körpergewicht und die daraus resultierende Gewichtskraft limitiert. Die deutlich flachere Sitzhaltung im Pkw, speziell im Sportwagen, führt dazu, dass sich der Fahrer gut an der Rückenlehne abstützen und somit signifikant höhere Betätigungskräfte auf das Bremspedal aufbringen kann (Bild 54).

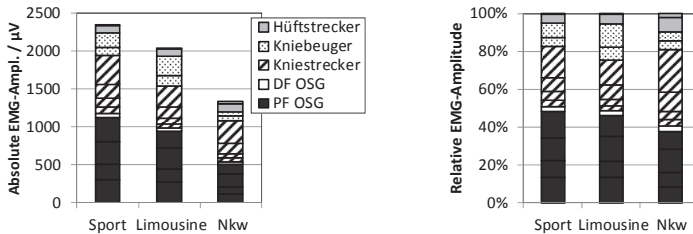


Bild 55: EMG-Muskelaktivität im Bein während des Bremsvorgangs beim AMS-Test (mittlere EMG-Amplitude; absolut und relativ); nach [71]

Ein weiterer, vermutlich aus der unterschiedlichen Sitzergonomie resultierender, Effekt ist der deutlich geringere Anteil der Plantarflexoren des oberen Sprunggelenks<sup>48</sup> an der Gesamt-EMG-Muskelaktivität im Nkw (Bild 55: PF OSG). Bedingt durch die aufrechte Sitzposition wird im Nkw offensichtlich mehr „aus dem Knie heraus“ gebremst (größerer Anteil der Kniestrecker).

Die Sitzposition ist vermutlich auch verantwortlich für die Unterschiede im absoluten Anteil der Armstrecker (Bild 56 links). Dieser Anteil ist in der Limousine am höchsten. Durch die, im Vergleich zum Sportwagen, in der Limousine aufrechtere Sitzposition muss sich der Fahrer in der Limousine vermutlich stärker über die Arme am Lenkrad abstützen. Im Nkw ist die Sitzposition zwar noch aufrechter, der Fahrer sitzt hier in Relation zum Lenkrad aber so hoch, dass eine Abstützung am Lenkrad nur in geringerem Maße möglich ist.

<sup>48</sup> Musculi soleus und gastrocnemius

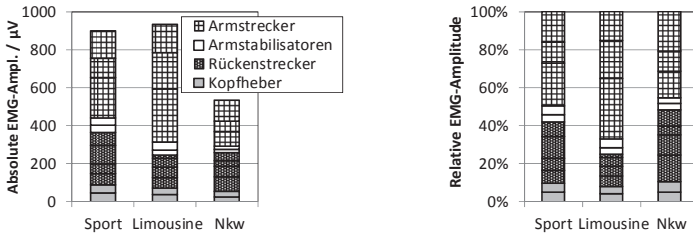


Bild 56: EMG-Muskelaktivität in den Armen und im Oberkörper während des Bremsvorganges beim AMS-Test (mittlere EMG-Amplitude; absolut und relativ); nach [71]

## Zusammenfassung

Es konnte der grundsätzliche Einfluss unterschiedlicher Cockpitdesigns herausgearbeitet werden (Abschnitte „Abstützkräfte“, „Bedienkräfte“, „Muskelaktivitäten“ → „Einfluss des Fahrzeugs“). Anhand von Beispielen, die existierenden Serienfahrzeugen nachempfunden waren, wurde aufgezeigt, dass die ergonomischen Gegebenheiten in typischen Serien-Pkw für das vorhandene Spektrum von vor allem verschiedenen großen Menschen unterschiedlich gut geeignet sind. Während die vorhandenen Anpassungsmöglichkeiten des Fahrerarbeitsplatzes dem - bezogen auf die Körpergröße - Durchschnittsfahrer eine für seine Bedürfnisse geeignete Einstellung ermöglichen, müssen sich besonders große und kleine Fahrer u. U. mit signifikanten Abstrichen abfinden (Abschnitte „Bewegungsabläufe am Fuß“, „Bewegungsabläufe am Oberkörper“, „Abstützkräfte“), die für eine statistisch relevante Bevölkerungsgruppe zu signifikanten Einschränkungen bezüglich Fahrzeugbeherrschung und auch Fahrkomfort führen können.

Größere Verstellbereiche lediglich von Fahrersitz und Lenkrad können hier nur begrenzt Abhilfe schaffen. Zum Beispiel muss ein kleiner Fahrer darauf achten, dass er noch genügend hoch sitzt, da sonst sein Sichtbereich unzulässig eingeschränkt wird. Er könnte also auch einen beliebig verstellbaren Sitz nicht beliebig weit in Richtung der Pedalerie verstellen, ohne möglicherweise andere wichtige Randbedingungen (Sichtfeld, Abstand zum Lenkrad) zu verletzen. Potenzial versprechen hier verstellbare Pedalierien (mindestens Bremspedal, besser jedoch alle Pedale), die in ihrer Lage relativ zum Fahrer verändert werden können. Solche Lösungen haben inzwischen bereits in einigen Serienfahrzeugen Einzug gefunden, sind jedoch noch entfernt von einer Marktdurchdringung. Die bisher in der Serie realisierten Verstellwege liegen bei etwa 75 mm. Vorstellbar ist es, dass bei genügend Verstellmöglichkeiten (Pedalerie, Lenkrad) auf die Verstellbarkeit des Sitzes in x- und ggf. auch in z-Richtung

verzichtet werden kann. Das würde das Mehr an Gewicht und Komplexität der verstellbaren Pedalerien möglicherweise zum Teil kompensieren. Die Verstellbarkeit der Länge der Sitzfläche bzw. der Oberschenkelauflage, wie sie in Fahrzeugen der oberen Preissegmente vorzufinden sind, erscheint ebenfalls sehr hilfreich. Allgemeingültige quantitative Aussagen über erforderliche Verstellbereiche können an dieser Stelle nicht getroffen werden. Für das konkrete vorliegende Beispiel lässt sich aber eine Größenordnung der erforderlichen Verstellbereiche im *Van* für Probandin *W05* abschätzen:

- Länge der Oberflächenauflage des Sitzes: um etwa 50 mm verstellbar in Richtung „kürzer“ (Differenz der Gesäß-Knielänge zwischen *W05* und der nächstgrößeren Probandin *W50*: 568 mm-516 mm=52 mm)
- Position des Bremspedals (Pedalpad bzw. Krafteinleitungsstelle): um mindestens 70 mm in Richtung „Knie des Fahrers“ (Differenz der Kniehöhe zwischen *W05* und der nächstgrößeren Probandin *W50*: 430 mm-355 mm=75 mm, Differenz Position Pedalpad zwischen *Van* und *Pkw* (Bild 47, S. 46): ca. 120 mm)

Diese Ansätze sind nur dann wirksam, wenn sie vom Fahrer korrekt umgesetzt werden. Fahrerassistenzsysteme, welche in der Lage sind, die korrekte Einstellung zu detektieren, könnten hier zukünftig Warnungen ausgeben, Hinweise zur optimalen Einstellung des Fahrerarbeitsplatzes geben oder diese Einstellungen gleich selbsttätig vornehmen.

## 3.2 Gewöhnungsvorgänge unter psychologischen Aspekten

Der Inhalt dieses Teilkapitels wurde bereits in [69] beschrieben und wird an dieser Stelle zusammenfassend im gegebenen Kontext dargestellt.

Die Gestaltung der MMS des Fahrzeugs ist so anzustreben, dass die Gewöhnung<sup>49</sup> des Individuums an die zu bedienende Funktion schnellstmöglich erfolgen kann. Fehlbedienungen aufgrund von Diskrepanzen zwischen erwarteten und tatsächlichen Reaktionen des Fahrzeugs auf Bedieneingaben sind bestmöglich zu vermeiden.

### 3.2.1 Versuchsdesign

Die Erfassung der subjektiven Daten erfolgte in einer Kombination aus mündlicher und schriftlicher Befragung.

---

<sup>49</sup> Die Gewöhnung ist eine einfache Form des Lernens und läuft beim Menschen in der Regel unbewusst ab. Sie setzt ein, wenn ein Individuum wiederholt mit einem konstanten Reiz konfrontiert wird. In der Folge schwächt sich die Reaktion auf diesen Reiz allmählich ab und unterbleibt womöglich vollkommen. Wird der Reiz nach Eintreten der Gewöhnung lange genug von dem Individuum ferngehalten, nimmt dessen Reaktionsbereitschaft wieder zu. [78], [88]

**Abstraktionsebenen** Die abgefragten Kriterien wurden in drei Abstraktionsebenen unterteilt.

Abstraktionsebene 1 Absolute Kriterien mit direktem Bezug zu objektiven physikalischen Parametern. Einige Kriterien sind eher der Pedalcharakteristik und einige Kriterien eher der Fahrzeugrückwirkung bzw. Bremscharakteristik zuordenbar (Bild 3, S. 7).

- Pedalcharakteristik-Kriterien: Losbrechkraft, statische Kraft-Hysterese, dynamische Kraft-Hysterese, Pedal-Leerweg, Pedalsteifigkeit  $dF/ds$
- Bremscharakteristik-Kriterien: Ansprechweg, Ansprechkraft, Volumenaufnahme  $db/ds$ , Verstärkung  $db/dF$ , verbleibende Rückstellkraft

Abstraktionsebene 2 Teilintegrative Kriterien, die noch einen Bezug zu objektiven physikalischen Parametern aufweisen. Auch hier sind einige Kriterien eher der Pedalcharakteristik und einige Kriterien eher der Fahrzeugrückwirkung bzw. Bremscharakteristik zuordenbar.

- Pedalcharakteristik-Kriterien: Kraftaufwand
- Bremscharakteristik-Kriterien: Dosierbarkeit, Ansprech-/Reaktionsverhalten

Abstraktionsebene 3 Integrative Kriterien, die den Gesamteindruck zusammenfassen. Die direkte Zuordnung der Kriterien zu Pedal- oder Bremscharakteristik ist nicht möglich: Sicherheitseindruck, Komforteindruck, Akzeptanz, Dauer des Gewöhnungsvorgangs, Gesamteindruck.

**Charakteristiken**<sup>50</sup> Die *Charakteristik 1* ist einem konventionellen Mittelklasse-Pkw nachempfunden, der eine in Fachkreisen anerkannt sehr gute *Bremspedalcharakteristik* aufweist. Dazu wurde dieser Pkw zuvor mit der Betätigungsautomatik [72], [80] vermessen. Die *Charakteristiken 2, 3* und *4* basieren auf der *Charakteristik 1*, wurden aber in einzelnen Parametern modifiziert:

Charakteristik 1 Konventioneller Mittelklasse-Pkw

Charakteristik 2 Eine erhöhte Volumenaufnahme wurde simuliert, indem die Gradienten  $dF/ds$  und  $db/ds$  um jeweils 25 % reduziert wurden. Der Zusammenhang zwischen Pedalkraft und Fahrzeugverzögerung blieb unverändert.

Charakteristik 3 Eine verringerte Volumenaufnahme wurde simuliert, indem die Gradienten  $dF/ds$  und  $db/ds$  um jeweils 50 % erhöht wurden. Der Zu-

<sup>50</sup> Vgl. Kapitel 1.2 → „Pedalcharakteristik“, „Bremscharakteristik“

sammenhang zwischen Pedalkraft und Fahrzeugverzögerung blieb unverändert.

Charakteristik 4 Ein verringerter Reibwert wurde simuliert, indem die Gradienten  $db/dF$  und  $db/ds$  um jeweils ca. 50 % verringert wurden. Der Zusammenhang zwischen Pedalkraft und Pedalweg blieb unverändert.

Charakteristik 5 Hierbei handelt es sich um eine synthetische Charakteristik, die sich in konventionellen Pkws nicht wiederfindet. Zur Erzeugung von Fahrzeugverzögerung ist kaum Pedalweg notwendig. Die Fahrzeugverzögerung ist fast ausschließlich über eine Pedalkraftmodulation einzustellen („Knopfbremse“). Die Auslegung wurde bewusst extrem gewählt, um eine völlig künstliche *Pedalcharakteristik* zu erzeugen, an die man sich möglicherweise nur schwer oder gar nicht gewöhnen kann.

### 3.2.2 Ablauf

Die Fahrversuche wurden im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt (Bild A11, S. 143, Bild A12, S. 144). Die Charakteristiken wurden in randomisierter Reihenfolge absolviert. Als Versuchsfahrzeug wurde ein Pkw mit veränderbarer Pedal- und Bremscharakteristik verwendet (vgl. Bild 100, Bild 101, S. 86).

Die Fragestellungen wurden den *Abstraktionsebenen* 2 und 3 entnommen. Die Kriterien dieser beiden Abstraktionsebenen finden sich in der Begriffswelt von Normalfahrern wieder. Die abgefragten Kriterien mussten anhand einer siebenstufigen bipolaren Skala mit neutraler Mitte an mehreren Stellen der Versuchsstrecke absolut bewertet werden.

**Stadtverkehr** Die Probanden wurden aus dem Umfeld der Studenten und Mitarbeiter der Technischen Universität Ilmenau gewonnen und können als Normalfahrer gelten. Als Kompromiss zwischen statistischer Relevanz und Aufwandbegrenzung wurde die Stichprobengröße auf 21 Personen<sup>51</sup> festgelegt. Während der Versuchsfahrten wurden dem jeweiligen Probanden nacheinander verschiedene Charakteristiken eingestellt. Es musste jedes Mal die gleiche festgelegte Strecke gefahren werden (Bild A11, S. 143). Der Proband wurde während der Fahrt zu seinen Eindrücken befragt. Dazu zählte die Abfragung der Gewöhnung an die jeweilige Charakteristik an vorher definierten Positionen der Versuchsstrecke. Im Anschluss an die jeweilige gefahrene Runde fand eine Abschlussbefragung im stehenden Fahrzeug statt.

**Verkehrsarmer Bereich** Im Unterschied zu dem Versuch *Stadtverkehr* wurde das Verkehrsgeschehen hier zum Teil künstlich nachgebildet. Es sollte unter

---

<sup>51</sup> 13 Männer, 8 Frauen, Alter zwischen 20 und 35 Jahren

anderem eine typische Situation nach Übernahme eines Mietfahrzeuges (Ausparken, Auffahren auf eine befahrene Straße ...) simuliert werden. Die Versuchsstrecke führte noch immer durch den öffentlichen Straßenverkehr, wurde aber in ein verkehrsarmes Gewerbegebiet verlegt (Bild A12, S. 144). Die Versuchsbedingungen konnten so unter vergleichsweise realistischen Bedingungen vereinheitlicht werden. Die Anzahl und Art der Bremsmanöver war reproduzierbar und die Abfrage der Gewöhnung konnte nach jedem Bremsvorgang stattfinden. So konnten die Abfragen zur Gewöhnung in Bezug auf Bremsmanöver und Fahrzeit besser aufgelöst werden.

Pro Runde waren vier *Anpassungsbremungen*, fünf *Zielbremungen* und zwei *Vollbremungen* zu absolvieren. Zum Abschluss jeder Runde bzw. jeder Charakteristik musste der Proband auf einem Parkplatz noch einen Einparkvorgang vornehmen. Im Anschluss an jede gefahrene Runde fand eine Abschlussbefragung im stehenden Fahrzeug statt.

### 3.2.3 Ergebnisse

Die Versuchsteilnehmer gaben durchweg sehr früh an, sich auf die jeweilige Charakteristik eingestellt zu haben (Versuchsreihe *Stadtverkehr*: spätestens bei der 3. Abfrage, Bild 57). Zur *Charakteristik 1* gaben sogar 70 % der Befragten gleich beim ersten Mal an, sich bereits daran gewöhnt zu haben. Im Vergleich dazu antworteten lediglich etwa 50 % der Probanden, sich bereits bei der 1. Abfrage an die *Charakteristiken 2* oder *3* gewöhnt zu haben.

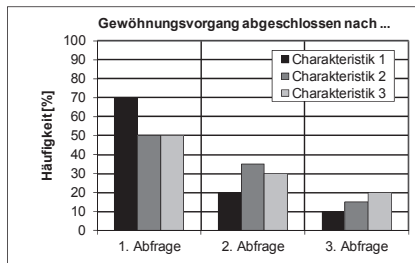


Bild 57: Gewöhnungsabfrage während der Versuchsfahrt (nur Abfragen 1 bis 3 dargestellt); nach [69]

Die im Anschluss an jede Testrunde abzugebende Endbewertung ergab sehr viele Nennungen zur *schnellen* oder *sehr schnellen* Gewöhnung. Hier bildet sich auch wieder die Tendenz ab, dass die *Charakteristik 1* am unproblematischsten in Bezug auf die subjektive Gewöhnung ist. Hinsichtlich des subjektiven Sicherheitsempfindens und des Gesamteindrucks wird jedoch die *Charakteristik 3*, die die verringerte Volumenaufnahme repräsentiert, mehrheitlich besser einge-

schätzt. 80 % der Probanden sind mit dem Gesamteindruck der *Charakteristik 3* mindestens *eben zufrieden*, während es bei *Charakteristik 1* lediglich 65 % sind.

In Bild 58 und Bild A13 (S. 145) ist an ausgewählten Kriterien beispielhaft der Vergleich der Ergebnisse der Befragung 1 und der Endbewertung gezeigt. Mit Befragung 1 wurden die Eindrücke bereits nach einer kurzen Eingewöhnungsrunde festgehalten (Bild A11, S. 143). Die Bewertung der abgefragten Kriterien ist offenbar unabhängig vom Gewöhnungszustand. Die Nennungen variieren über den Verlauf des Versuchs nur wenig bzw. gar nicht.

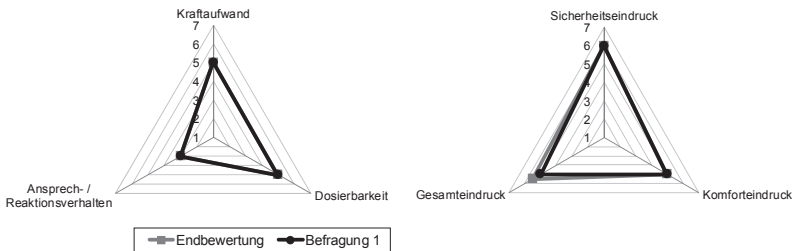


Bild 58: Vergleich Befragung 1 und Endbewertung bei *Charakteristik 3* (7=gut, 1=schlecht); nach [69]

In Bild 59 sind Ergebnisse des Abschlussfragebogens des Versuches *verkehrsarmer Bereich* dargestellt.

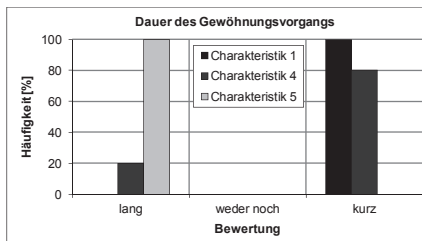


Bild 59: Häufigkeitsverteilung des Merkmals *Benötigte Dauer zur Gewöhnung*; nach [3]

Die siebenstufige Skala wurde für diese Darstellung zu drei Kategorien zusammengefasst. Hier sticht die synthetische *Charakteristik 5* deutlich hervor. Alle Probanden gaben an, dass sie sich an diese Ausprägung nur langsam gewöhnen konnten. Die beiden konventionellen *Charakteristiken 1* und *4* werfen offenbar keine Probleme in dieser Hinsicht auf. Auffällig ist, dass für die *Charakteristiken 1* und *4* zum Bremsmanöver *Zielbremsung* ausnahmslos jeweils nach dem ersten Bremsvorgang bereits angegeben wird, dass die Gewöhnung erfolgt ist (Bild 60, links). Dieser Effekt beruht sicher zum Teil darauf, dass vor der

ersten *Zielbremsung* bereits 2 *Anpassungsbremungen* stattgefunden haben (Bild A12, S. 144). Zum negativen Abschneiden der *Charakteristik 5* bei der Gewöhnungsabfrage - auch noch nach der 5. Abfrage (Bild 60<sup>52</sup>, rechts) - passt deren Einstufung als schwer dosierbar. Die Kriterien Sicherheitsempfinden und Komfortempfinden werden von den Probanden für diese Kennlinie ebenfalls sehr schlecht bewertet. Beide Beurteilungen hängen vermutlich direkt mit der schlechten Dosierbarkeit zusammen. Es gab keinen Versuchsteilnehmer, der mit dieser Charakteristik „zufrieden“ war.

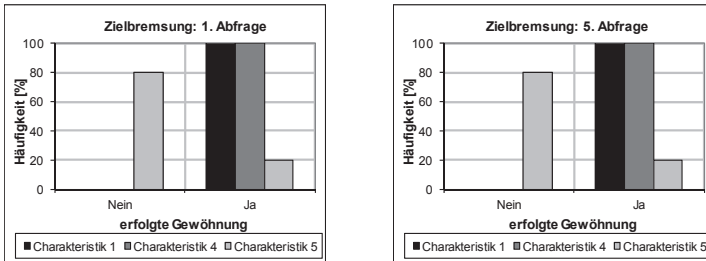


Bild 60: Gewöhnungsabfrage bei den *Zielbremsungen*; nach [3]

<sup>52</sup> Die Häufigkeitsverteilungen der Antworten nach der 1. und der 5. Abfrage sind in diesem Beispiel identisch.



## 4 Entkoppelte Bremsanlagen

Die Anzahl der am Markt verfügbaren und der in der Entwicklung befindlichen Elektro- und Hybridfahrzeuge nimmt ständig zu. Eine Möglichkeit, den Gesamtwirkungsgrad und damit die Effizienz solcher Fahrzeuge zu steigern, ist die Rückgewinnung (Rekuperation) der beim Bremsen umzuwandelnden kinetischen Fahrzeuggenergie. *Entkoppelte Bremsanlagen* bieten den Vorteil, dass das Zusammenspiel zwischen generatorischer Bremswirkung und Reibbremswirkung so gestaltet werden kann, dass die Pedal- und Bremscharakteristik gleich und reproduzierbar bleibt. Ziel muss es sein, dass beide Bremsmomenterzeugungssysteme so miteinander interagieren, dass das vom Fahrer angeforderte Gesamtbremsmoment ohne störende Artefakte bereitgestellt wird. Bei *entkoppelten Bremsanlagen* muss die *Pedalcharakteristik* auf geeignete Weise künstlich erzeugt bzw. simuliert werden. Die Ausgestaltung des Pedalcharakteristiksimulators ist maßgeblich mitentscheidend für die Qualität der MMS.

### 4.1 Experimentelle Analyse von Fahrzeugen mit entkoppelten Bremsanlagen

In den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 werden beispielhaft zwei *entkoppelte* Bremsanlagen mit unterschiedlich viel Rekuperationsvermögen, unterschiedlicher Architektur der *entkoppelten Bremsanlage* und unterschiedlichen Pedalcharakteristiksimulatoren (vgl. auch Kapitel 4.2) beschrieben. Diese Anlagen wurden detailliert unter Zuhilfenahme einer Pedalbetätigungsautomatik [72], [80] untersucht, um die hervorstechenden Systemeigenheiten abstrahieren zu können. Zusätzlich werden in Kapitel 4.1.3 die Pedal- und Bremscharakteristiken von ausgewählten *entkoppelten* und *gekoppelten Bremsanlagen* gegenübergestellt. Für den ersten Teil dieses Kapitels wurden Fahrzeuge ausgewählt, die serienmäßig mit *ge-* als auch mit *entkoppelter Bremsanlage* verfügbar sind. Die vorgestellten Fahrzeugpaare sind also, abgesehen von der verbauten Bremsanlage, miteinander vergleichbar. Die Besonderheiten der unterschiedlichen Bremsanlagen lassen sich somit weitgehend isoliert von störenden Einflüssen, die von unterschiedlichen Fahrzeugen herrühren, herausarbeiten.

#### 4.1.1 Bremsanlage entkoppelt, radindividuelle Druckmodulation, nasser Pedalcharakteristiksimulator

**Beschreibung der Bremsanlage** Die *entkoppelte Bremsanlage* ist elektrohydraulisch mit Hydroaggregat und Druckspeicher ausgeführt. Die Radbremsen können radindividuell angesteuert werden (aktive Druckregelung). Bei dem Fahrzeug handelt es sich um einen frontgetriebenen leistungsverzweigten (Bild A3, S. 134) Vollhybriden (Bild 11, S. 18) mit *rekuperativer Bremsanlage*. Die Bremsbetätigung erfolgt über einen *passiven nassen Pedalcharakteristiksimulator*. Das heißt,

im Simulator sind lediglich passive Elemente verbaut; Fluide sind, z. B. zur Kraftübertragung oder Bedämpfung, vorhanden.

**Pedalcharakteristik** Ein hydraulisch betätigter Pedalcharakteristiksimulator (ähnlich Bild 61: Pos. 40), der über den Sekundärkreis des THZ aktuiert wird, bestimmt zusammen mit der Grundcharakteristik der THZ-Rückstellfedern und den Totwegen im THZ die *Pedalcharakteristik*. Der Simulator besteht aus einem doppelstufigen Schraubendruckfederpaket mit zwischengeschalteten Elastomerfedern.

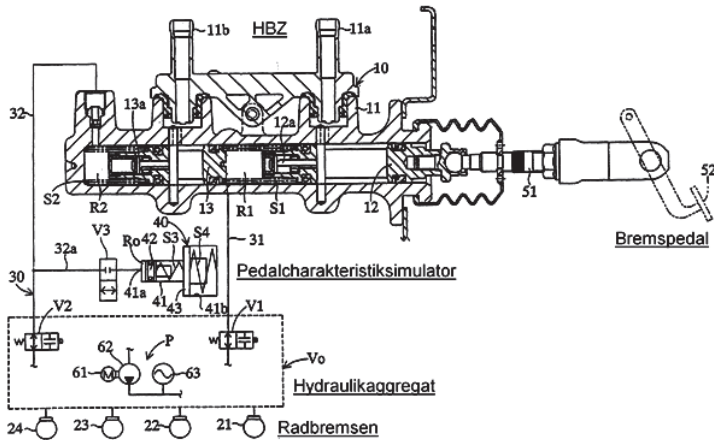


Bild 61: Schematische Darstellung: Brmspedal, THZ und Pedalcharakteristiksimulator (Hydraulikbremsgerät) [1]

Die *Pedalcharakteristik* dieser Bremsanlage weist Merkmale auf, die diese subjektiv „synthetisch“ erscheinen lassen. So beträgt die *Kraft-Hysterese* über nahezu den kompletten *Pedalleerwegbereich* gerade einmal ca. 5 N (Bild 62, Bild 63). Dies ist ein außergewöhnlich geringer Wert<sup>53</sup>. Das Kraftniveau wird insgesamt, vermutlich auch aufgrund der geringen *Kraft-Hysterese*, als gering beurteilt. Die Dosierbarkeit von geringen Zielverzögerungen wird so erschwert. Der Gradient  $dF/ds$  im *Leerwegbereich* ist auffällig groß, die *Losbrechkraft* dagegen sehr gering. Im Bereich des *Leerwegs* und der Progression befinden sich mehrere Unstetigkeiten im Pedalwegverlauf, die einen unharmonischen Eindruck bei der Pedalbetätigung hinterlassen.

<sup>53</sup> Vgl. Kapitel 5.2.3 → gute Bewertung der Charakteristiken „07-entkoppelte BA, modifizierte Kraft-Hysterese“ und „08-gekoppelte BA“

Der geringe Wert der *Kraft-Hysterese* erscheint prinzipbedingt, da keine Vorrichtung vorhanden ist, mit der gezielt coulomb'sche Reibung eingebracht werden kann. Auch der Verlauf des  $dF/ds$ -Gradienten resultiert vermutlich aus dem Konstruktionsprinzip. Die geringe *Losbrechkraft* ist möglicherweise bewusst gewählt worden. Der auffällig kurze bzw. geringe maximale Pedalweg scheint ebenfalls gezielt so realisiert worden zu sein. Den maximal möglichen Pedalweg markiert ein subjektiv als „hart“ empfundener „Endanschlag“. ABS- und ESC-Regelungseingriffe haben bei diesem System keine Auswirkung auf die Pedalhaptik.

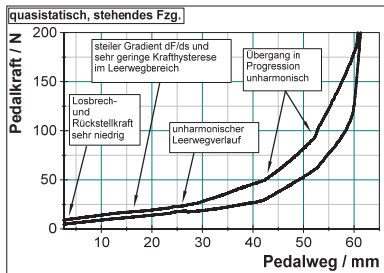


Bild 62: Messung des F-s-Zusammenhangs

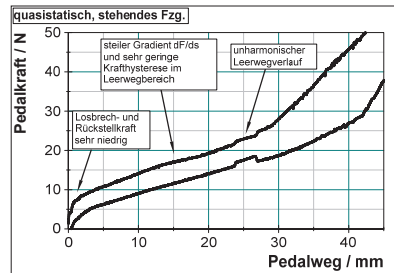


Bild 63: Messung des F-s-Zusammenhangs (vergrößerter Ausschnitt)

**Bremscharakteristik** Die Druckerzeugung erfolgt durch ein Hydroaggregat. Ein Hochdruckspeicher ist mit allen vier ESC-Einlassventilen (Proportionalventile) verbunden. Der Radbremsdruck wird über die Ansteuerung der einzelnen Einlass- und Auslassventile radindividuell eingestellt.

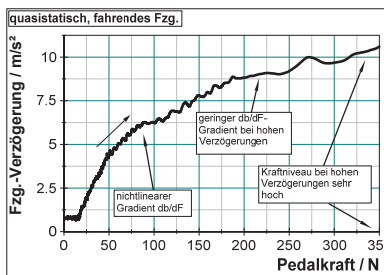


Bild 64: Messung des b-F-Zusammenhangs (nur Betätigung dargestellt)

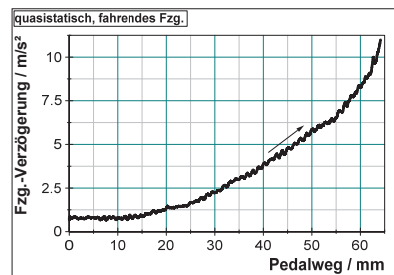


Bild 65: Messung des b-s-Zusammenhangs (nur Betätigung dargestellt)

Der Gradient  $db/dF$  verläuft ungewöhnlich nichtlinear und bei hohen Verzögerungen sehr flach (Bild 64, Bild 84 links, S. 76). Die zur Vollverzögerung

erforderliche Pedalkraft ist sehr hoch. Der b-s-Zusammenhang erscheint un-auffällig (Bild 65).

Der in Bild 64 dargestellte b-F-Zusammenhang wurde bei einer sehr geringen und für *gekoppelte Bremsanlagen* noch als näherungsweise quasistatisch anzunehmender Pedalbetätigungsgeschwindigkeit von  $v_{\text{Bet}}=20 \text{ mm/s}$  ermittelt. Bei diesem Fahrzeug treten jedoch bereits bei diesen Betätigungsgeschwindigkeiten signifikante dynamische Effekte im Druck- und Verzögerungsaufbau auf. In Bild 66 wird ein Vergleich mit einer Betätigung bei noch geringerer Betätigungsgeschwindigkeit  $v_{\text{Bet}}=5 \text{ mm/s}$  gezeigt. Bei der schnelleren Betätigung ( $v_{\text{Bet}}=20 \text{ mm/s}$ ) ist zuerst ein, bezogen auf die erreichbare Fahrzeugverzögerung, hohes Kraftniveau erforderlich (Hinweis auf hohe *dynamische Kraftthysteresis*). Der stationäre Arbeitspunkt stellte sich anschließend ein<sup>54</sup>, während das Bremspedal in der Endposition bei einem konstanten Pedalweg gehalten wird. Bei der langsameren Betätigung wird dieser stationäre Endpunkt direkt erreicht. Jedoch wird im realen Fahralltag kaum ein Fahrer das Bremspedal mit einer so geringen Betätigungsgeschwindigkeit niedertreten, dass er den tatsächlichen quasistatischen b-F-Zusammenhang dieses Fahrzeugs wahrnehmen wird. Typische Betätigungsgeschwindigkeiten liegen für den Bereich der *moderaten Abbremsungen* bei ca.  $v_{\text{Bet}}=100 \text{ mm/s}$ <sup>55</sup> [80]. Zudem werden im Alltag Verzögerungen von  $b>4 \text{ m/s}^2$  selten erreicht ([69], [73]), sodass von Normalfahrern keine, durch diese Besonderheit bedingten, auffälligen Subjektivbewertungen zu erwarten sind.

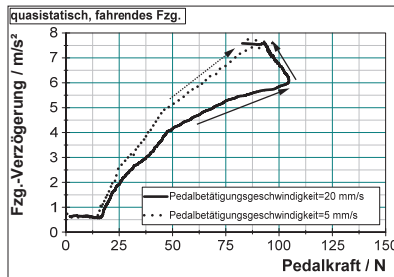


Bild 66: Vergleich der gemessenen b-F-Zusammenhänge bei unterschiedlichen, sehr geringen, Betätigungsgeschwindigkeiten (nur Betätigung dargestellt)

<sup>54</sup> Die Pedalkraft fällt wieder etwas ab. Die Fahrzeugverzögerung steigt noch etwas weiter an (Hinweis auf hohe Latenzzeit zwischen s und b, vgl. Fzg. 26 in Bild 87, S. 79).

<sup>55</sup> Der angegebene Wert bezieht sich auf das Maximum der Pedalantrittsgeschwindigkeit der statistisch untersuchten *Pedal- und Bremscharakteristiken*. Das Maximum der Entlastungsgeschwindigkeit hat bei diesen Untersuchungen bei ca.  $200 \text{ mm/s}$  gelegen. Für modulierende Pedalbewegungen wurden Werte zwischen ca.  $35 \text{ mm/s}$  und  $70 \text{ mm/s}$  ermittelt. [80]

**Rekuperation** Aus Bild 67 kann das für einen Hybridantriebsstrang mit permanenterregter Synchronmaschine (PSM) typische Verhalten bei der rekuperativen Fahrzeugverzögerung abgelesen werden.

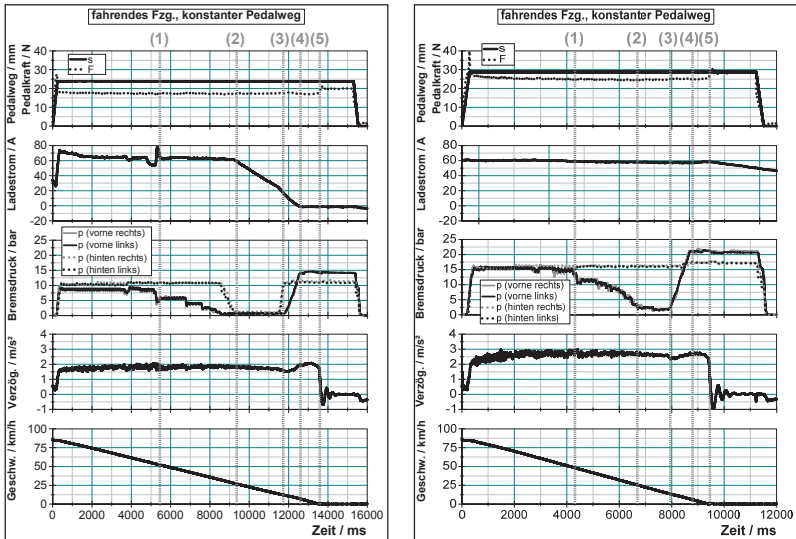


Bild 67: Zeitliche Verläufe der Messgrößen bei unterschiedlichen moderaten Verzögerungen; *Rekuperation* visualisiert über Ladestrom und *Verblendung* visualisiert über Bremsdruck

Ab Zeitpunkt (1), hier bei  $v_{\text{FzG}} \approx 50$  km/h, steigen das Generatormoment und damit die generatorische Bremswirkung signifikant an; der hydraulische Bremsdruck wird entsprechend reduziert. Der Generator befindet sich hier noch im Feldschwächebereich. Die abnehmende Fahrzeuggeschwindigkeit resultiert in einer abnehmenden Generator Drehzahl und diese in dem ansteigenden Moment (Gl. 1). Neben der Generator Drehzahl begrenzt die Generatorleistung das Generatormoment.

$$M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad \text{Gl. 1}$$

Ab Zeitpunkt (2), hier bei  $v_{\text{FzG}} \approx 25$  km/h, läuft der Generator im Grunddrehzahlbereich; der Bedarf an Reibbremsmoment hat in diesem Bereich sein Minimum erreicht. Das maximale Generatormoment wird hier durch die zulässige Stromstärke des Generators begrenzt. Bis zum Zeitpunkt (3), hier bei  $v_{\text{FzG}} \approx 14$  km/h, liegt dieses maximale Generatormoment an. Ab Zeitpunkt (3)

nimmt das Generatormoment wieder ab, da der Wirkungsgrad des Generators ab hier sehr gering wird; der hydraulische Bremsdruck nimmt dementsprechend wieder zu. Bereits bei Zeitpunkt (4), hier bei  $v_{Fzg} \approx 7$  km/h, ist keine generatorische Bremswirkung mehr verfügbar; das Reibbremsmoment erreicht sein Maximum. Das generatorische Bremsmoment wird bewusst bereits vor dem Erreichen des Stillstands (Zeitpunkt (5)) zurückgefahren, um die Fahrzeugverzögerung beim Erreichen des Stillstands alleine mit der Bremsdruckmodulation präziser einstellen zu können. [8], [35]

Um das maximale Rekuperationsvermögen zu ermitteln, wurde das Fahrzeug, fein abgestuft, auf unterschiedlichen Verzögerungsniveaus abgebremst. Der Pedalweg wurde jeweils mit einer Pedalbetätigungsautomatik konstant gehalten. Auf diese Art konnte die Verzögerung ermittelt werden, bei der im Bereich des maximalen Generatormoments (Grunddrehzahlbereich) gerade noch keine Reibbremswirkung<sup>56</sup> zur Erreichung der Zielverzögerung benötigt wird. Aus Bild 67 kann abgelesen werden, dass die maximale Fahrzeugverzögerung, die mit dieser Anlage rekuperativ, also ausschließlich über das Generatormoment, erreicht werden kann, zwischen  $b=2,0$  m/s<sup>2</sup> (linke Darstellung<sup>57</sup>) und  $b=2,5$  m/s<sup>2</sup> (rechte Darstellung<sup>58</sup>) liegen muss.

Wird während des Abbremsvorgangs eine kritische Situation detektiert, die den Eingriff von Fahrdynamikregelsystemen, wie dem ABS, wahrscheinlich werden lässt, wird der generatorische Anteil der Bremswirkung vollständig zurückgenommen („abgeworfen“) und durch einen entsprechend höheren Anteil an Reibbremswirkung kompensiert. In Bild 68 (rechts) ist dieser Effekt bei einem Bremsvorgang mit sehr hoher Verzögerung ( $b > 9$  m/s<sup>2</sup>) zu erkennen. Zum Vergleich ist links im Bild ein Bremsvorgang mit  $b \approx 7,5$  m/s<sup>2</sup> dargestellt, bei dem der generatorische Anteil ohne Unterbrechung mitgenutzt wird. Dieses Phänomen stellt vordergründig ein Effizienzproblem dar (zu geringer bzw. kein Rekuperationsanteil bei Bremsvorgängen an der Haftgrenze der Reifen), welches im Fahralltag auf trockener Straße selten auftritt. Die Belange der Fühlbarkeit bzw. der Akzeptanz sind in den entsprechenden Bremssituationen vermutlich vernachlässigbar.

<sup>56</sup> Der hydraulische Bremsdruck ist in diesem Fall an allen Radbremsen auf ein Minimum reduziert.

<sup>57</sup> Zwischen den Zeitpunkten (2) und (3) (Grunddrehzahlbereich) ist der Bremsdruck an allen Radbremsen maximal reduziert.

<sup>58</sup> Zwischen den Zeitpunkten (2) und (3) (Grunddrehzahlbereich) ist der Bremsdruck an der Vorderachse nahezu maximal reduziert. An der Hinterachse wird der Bremsdruck nicht reduziert.

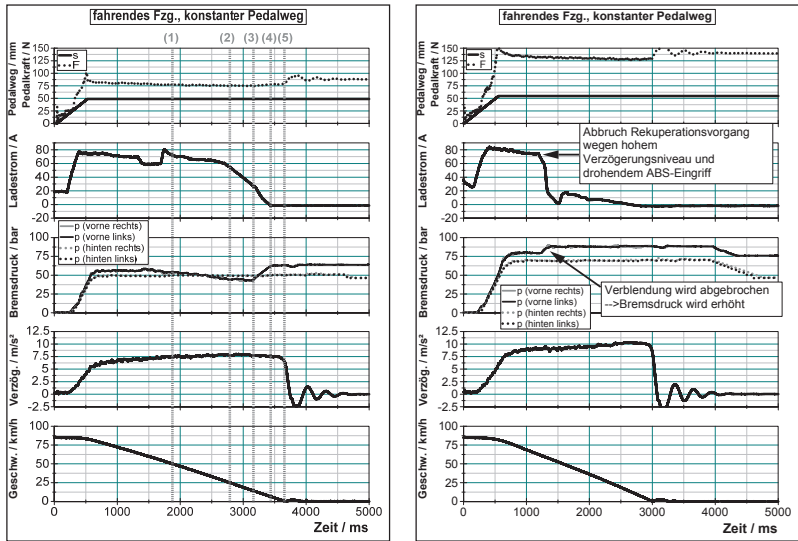


Bild 68: Zeitliche Verläufe der Messgrößen bei unterschiedlichen hohen Verzögerungen; *Rekuperation* visualisiert über Ladestrom und *Verblendung* visualisiert über Bremsdruck

**Verblendung** Während der Verblendung wird nahezu ausschließlich der Bremsdruck an der Vorderachse moduliert (Bild 67 rechts, Bild 68), was bei diesem frontgetriebenen Fahrzeug plausibel erscheint. Erst wenn an der Vorderachse kein bzw. nur noch sehr geringer Bremsdruck anliegt, der Druck dort also nicht weiter reduziert werden kann, wird dieser auch an der Hinterachse bei Bedarf verringert (Bild 67 links, Bild 70).

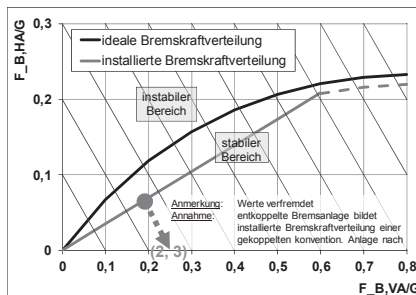


Bild 69: Bremskraftverteilungsdiagramm  
 Szenario: durch *Verblendung* veränderliche Bremskraftverteilung bei angenommener konstanter Abbremsung (hier:  $b=2,5 \text{ m/s}^2$ ) und ausgekuppeltem Antriebsstrang

Die Bremskraftverteilung entfernt sich dann deutlich von der idealen Bremskraftverteilung, liegt aber im stabilen Bereich (Bild 69). Dieser Vorgang findet zudem lediglich bei i. d. R. fahrdynamisch unkritischen niedrigen Verzögerungen<sup>59</sup> statt.

Der Bremsdruck wird an allen Achsen während des Blendens offensichtlich nie vollständig abgebaut (Bild 70) - die Reibbremsen bleiben immer leicht aktiviert. Vermutlich sollen somit die Systemtotzeiten verringert und die Regeldynamik erhöht werden. Bei konstant betätigtem Bremspedal und geringen Fahrzeugverzögerungen (*moderate Abbremsung*) wird die Fahrzeugverzögerung lange sehr konstant eingestellt. Zum Zeitpunkt (3) bricht die Verzögerung etwas ein. Das Generatormoment nimmt hier sehr schnell ab. Der Bremsdruck wird offenbar nicht genügend schnell wieder aufgebaut (Bild 67, S. 65). Anschließend, kurz vor Fahrzeugstillstand, schwingt die Fahrzeugverzögerung etwas über die mittlere Verzögerung hinaus. Diese Unstetigkeiten im Verlauf der Fahrzeugverzögerung sind subjektiv spürbar, wenn gezielt auf diesen Effekt geachtet wird. Im Probandenversuch sind sie jedoch nicht aufgefallen (vgl. auch Kapitel 5.1.3).

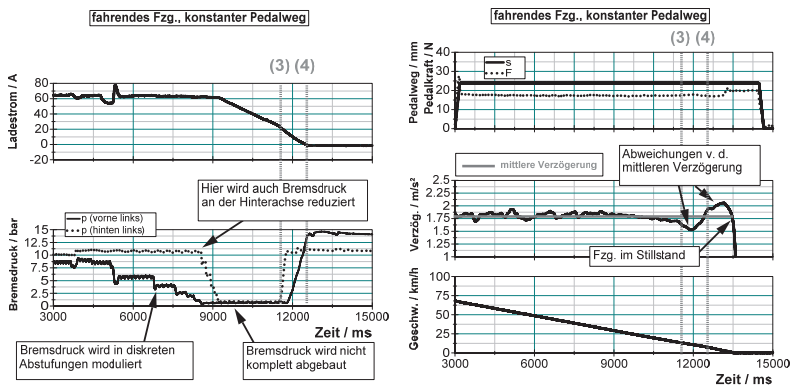


Bild 70: Zeitliche Verläufe der Messgrößen (Detailansicht zu Bild 67 links, S. 65); *Rekuperation* visualisiert über Ladestrom und *Verblendung* visualisiert über Bremsdruck)

#### 4.1.2 Bremsanlage entkoppelt, zentrale Druckmodulation, trockener Pedalcharakteristiksimulator

**Beschreibung der Bremsanlage** Die *entkoppelte Bremsanlage* ist mit einem elektropneumatischen, aktiven BKV ausgeführt. Der BKV kann die Radbremsen lediglich zentral, d. h. gemeinsam, ansteuern. Bei dem Fahrzeug handelt es

<sup>59</sup> Hier:  $b < 2,5 \text{ m/s}^2$



sich um einen heckgetriebenen Mildhybriden (Bild 11, S. 18) in der Antriebskonfiguration Parallelhybrid (Bild A2, S. 134) mit *rekuperativer Bremsanlage*. Die Bremsbetätigung erfolgt über einen *passiven trockenen Pedalcharakteristiksimulator*. Das heißt, im Simulator sind lediglich passive Elemente verbaut. Fluide, z. B. zur Kraftübertragung oder Bedämpfung, sind nicht vorhanden.

**Pedalcharakteristik** Ein trockener Pedalcharakteristiksimulator, der direkt über einen Umlenkehebel am Bremspedal betätigt wird, bestimmt die *Pedalcharakteristik* (ähnlich Bild 71: Pos. 5, Bild 72: Pos. 4). Der Simulator besteht aus einem sequenziell betätigten Paket aus Biegefeder und Elastomerfeder.

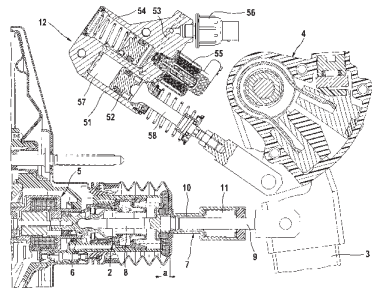
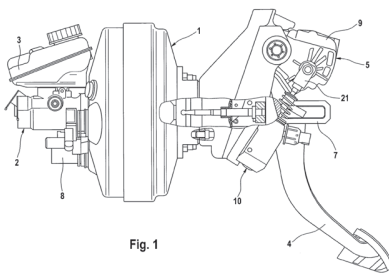


Bild 71: „Betätigungseinheit“ [17]

Bild 72: Pedalcharakteristiksimulator [18]

Auch bei diesem Simulatorprinzip fällt als Erstes auf, dass die *statische Kraft-Hysterese*, mit etwa 5 N über nahezu den kompletten *Lernwegbereich* (Bild 77, S. 73, Bild A14, S. 146), sehr gering ausfällt. Der Simulator enthält auch keine konstruktiven Elemente, mit denen gezielt coulomb'sche Reibung generiert werden könnte (vgl. Kapitel 4.2). Subjektiv fühlt sich die Bremsbetätigung an, „als trete man auf eine elastische Schraubenfeder oder auf einen Gummiball“. Die geringe *statische Kraft-Hysterese* dieser Bremsanlage dürfte einen maßgeblichen Anteil daran haben, dass auch deren Charakteristik als „synthetisch“ eingestuft wird<sup>60</sup>. Untersuchungen zeigten, dass eine zu geringe *statische Kraft-Hysterese* zu einem als „nervös“ empfundenen *Pedalgefühl* führen kann [6]. Weiterhin wird mit dem hier beschriebenen Simulator lediglich eine sehr geringe *dynamische Kraft-Hysterese* erreicht. Das heißt, die Bedienkräfte ändern sich lediglich sehr gering in Abhängigkeit von der Bediengeschwindigkeit. Bis etwa  $v_{\text{Bet}}=400 \text{ mm/s}$  ist sogar so gut wie keine Bedämpfung vorhanden (Bild 78 links, S. 73). Der *Lernwegbereich* ist mit etwa 14 mm relativ kurz. ABS- und ESC-

<sup>60</sup> Vgl. auch Kapitel 5.2.3 → gute Bewertung der Charakteristiken „07-entkoppelte B.A, modifizierte Kraft-Hysterese“ und „08-gekoppelte B.A“

Regeleingriffe haben auch bei diesem System keine Auswirkung auf die Pedalhaptik.

**Bremscharakteristik** Der Bremsdruckaufbau erfolgt zentral durch einen aktiven elektropneumatischen BKV. Das Niveau der Pedalkraft ist, bezogen auf die erreichbare Verzögerung, hoch (Bild 84 links, S. 76) aber noch im Rahmen des Üblichen (Bild 79, S. 74). Beim schnelleren Betätigen und Entlasten des Bremspedals entsteht ein deutlicher und vergleichsweise sehr großer Zeitverzug zwischen Pedalbetätigung und Bremsdruckaufbau (Bild 80, S. 74, Bild 81, S. 75, Fzg. 28 in Bild 87, S. 79). Die Ursachen dafür dürften u. a. in der installierten Dynamik des aktiven BKV und in Latenzzeiten bei der Informationsübermittlung zu suchen sein.

**Rekuperation** Dieses Fahrzeug verfügt ebenfalls über einen Hybridantriebsstrang mit permanenterregter Synchronmaschine (PSM, vgl. Kapitel 4.1.1 → „Rekuperation“).

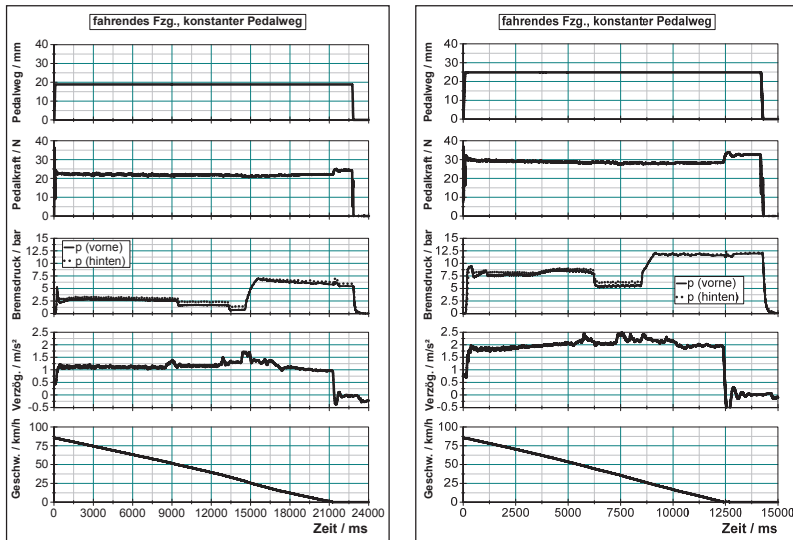


Bild 73: Zeitliche Verläufe der Messgrößen; *Verblendung* visualisiert über Bremsdruck

Die Generatordrehzahl ist neben der Fahrzeuggeschwindigkeit auch abhängig von der jeweils eingelegten Getriebestufe des Automatikgetriebes. Die maximale Fahrzeugverzögerung, die mit dieser Anlage ausschließlich über das Genera-

tormoment herausgefahren werden konnte, liegt bei etwa  $b=1,3-1,5 \text{ m/s}^2$  (Bild 73, linke Darstellung<sup>61</sup>).

**Verblendung** Wie eingangs beschrieben, wird der Bremsdruck bei dieser Anlage zentral gesteuert (Bild 73) - also an allen vier Rädern gleichmäßig reduziert und wieder aufgebaut. Bei diesem heckgetriebenen Fahrzeug kann generatorisch nur die Hinterachse abgebremst werden. So wird die installierte Bremskraftverteilung während der Rekuperationsphasen tendenziell in Richtung des instabilen Bereichs verschoben. Bei sehr geringen Verzögerungen wird dann nahezu ausschließlich über die Hinterachse gebremst (Bild 74).

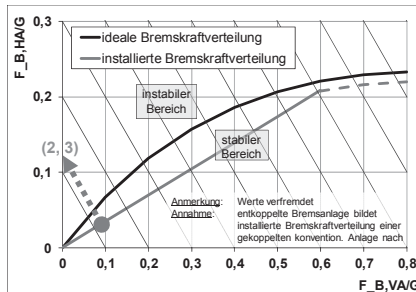


Bild 74: Bremskraftverteilungsdigramm:  
Szenario: durch *Verblendung* veränderliche Bremskraftverteilung bei angenommener konstanter Abbremsung (hier:  $b=1,25 \text{ m/s}^2$ ) und ausgekuppeltem Antriebsstrang

### 4.1.3 Gegenüberstellung der Pedal- und Bremscharakteristiken von entkoppelten und gekoppelten Bremsanlagen

#### Gegenüberstellung 1

Beide hier gegenübergestellten Fahrzeuge der oberen Mittelklasse entstammen der gleichen Baureihe. Das Fahrzeug *Variante 1* wurde serienmäßig mit einer elektrohydraulischen nicht-*rekuperativen entkoppelten* Bremsanlage mit *passivem nassen Pedalcharakteristiksimulator* ausgestattet (vgl. [39]). Die Radbremsen können radindividuell angesteuert werden. Das Fahrzeug verfügt über einen konventionellen Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor. Nach der Modellpflege wurde dieses Fahrzeug serienmäßig mit einer *gekoppelten Bremsanlage* ausgeliefert (*Variante 2*).

**Pedalcharakteristik** Das Pedalwegniveau von *Variante 1 (entkoppelt)* ist deutlich geringer als das von *Variante 2* (Bild 75). Damit geht einher, dass der Kraft-

<sup>61</sup> Zwischen den Zeitpunkten (2) und (3) (Grunddrehzahlbereich) ist der Bremsdruck an beiden Achsen nahezu maximal reduziert.

Weg-Gradient bei *Variante 1* signifikant größer ist. Die *Losbrechkraft* ist bei beiden Varianten mit ca. 18-21 N zu Beginn nahezu identisch.

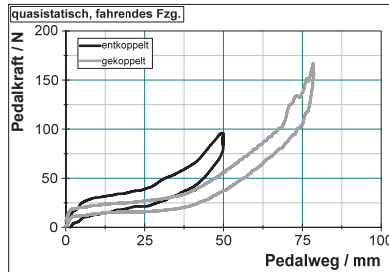


Bild 75: Messung der F-s-Zusammenhänge

**Bremscharakteristik** Beim Vergleich der *Bremscharakteristik* fällt sofort das vergleichsweise geringe Pedalwegniveau bei *Variante 1* (*entkoppelt*) auf (Bild 76 rechts). Dafür ist das Pedalkraftniveau bei *Variante 2* im wichtigen Bereich der *moderaten Abbremsungen* ( $b < 4 \text{ m/s}^2$ ) signifikant geringer als bei *Variante 1* (Bild 76 links). Weiterhin unterscheiden sich beide Varianten im Vorhandensein des sogenannten *Springers* (vgl. auch Abschnitt „Gegenüberstellung 3“ → „Springer“). Während dieser bei der *gekoppelten* Variante deutlich ausgeprägt ist, ist er bei der *entkoppelten* Variante nicht erkennbar. Der *Springer* ergibt sich bei *gekoppelten Bremsanlagen* nicht zwangsweise, sondern wird üblicherweise bewusst konstruktiv erzeugt. Er lässt sich bei *ge-* und bei *entkoppelten* Anlagen realisieren.

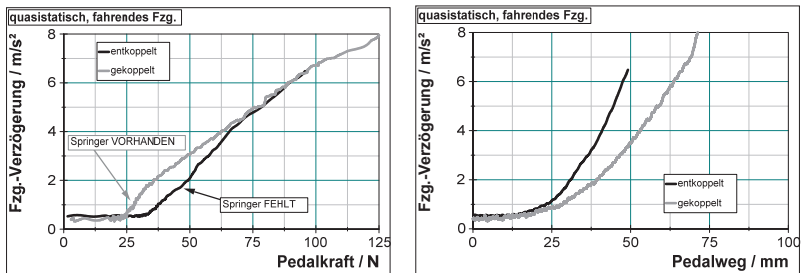


Bild 76: Messung der b-F-Zusammenhänge (links) bzw. b-s-Zusammenhänge (rechts) (nur Betätigung dargestellt)

## Gegenüberstellung 2

Es handelt sich bei beiden hier verglichenen Fahrzeugen um die gleiche Baureihe eines Oberklasse-Fahrzeugs. Das Fahrzeug *Variante 1* wurde mit einer

entkoppelten Bremsanlage mit *passivem trockenem Pedalcharakteristiksimulator* und Rekuperationsmöglichkeit ausgestattet (vgl. Kapitel 4.1.2). Bei Fahrzeug *Variante 2* handelt es sich um eine Ausführung mit *gekoppelter Bremsanlage* und ohne Rekuperationsvermögen.

**Pedalcharakteristik** Die *statische Kraft-Hysterese* ist bei *Variante 1 (entkoppelte Bremsanlage)* deutlich geringer als bei dem Vergleichsfahrzeug mit der *gekoppelten Bremsanlage* (Bild 77, Bild A14, S. 146). Die subjektive Beurteilung für *Variante 1* („nahezu reibungsfrei“, „als wenn man auf eine elastische Schraubenfeder tritt“) deutet darauf hin, dass dieses Hystereseniveau zu niedrig ist.

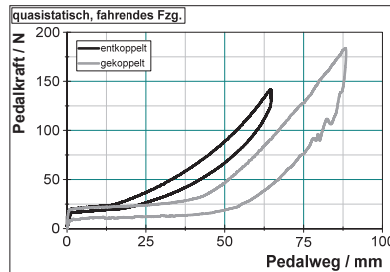


Bild 77: Messung der F-s-Zusammenhänge

Die Auswertung der *dynamischen Kraft-Hysterese* ergibt, dass das Fahrzeug mit *entkoppelter Bremsanlage* noch bis  $v_{\text{Bet}}=400$  mm/s so gut wie keine Bedämpfung aufweist (Bild 78). Das Niveau der Bedämpfung ist beim Vergleichsfahrzeug mit *gekoppelter Bremsanlage* hingegen sehr hoch.

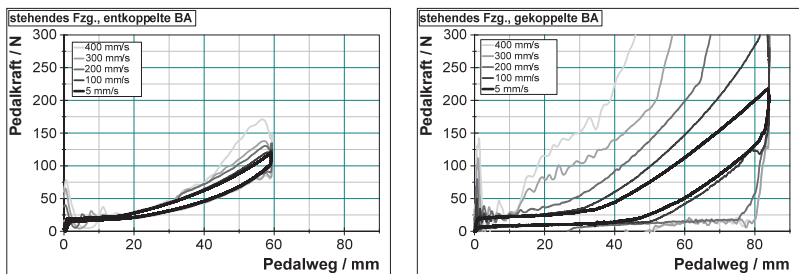


Bild 78: Messung der F-s-Zusammenhänge; unterschiedliche Betätigungsgeschwindigkeiten

**Bremscharakteristik** Das verzögerungsbezogene Pedalkraftniveau ist bei der *entkoppelten Bremsanlage* noch etwas höher als bei der *gekoppelten Bremsanlage* (bis ca.  $b=6$  m/s<sup>2</sup>, Bild 79, Bild 84, S. 76), obwohl dieses Fahrzeug bereits in der *gekoppelten* Ausführung über ein eher hohes Pedalkraftniveau verfügt.

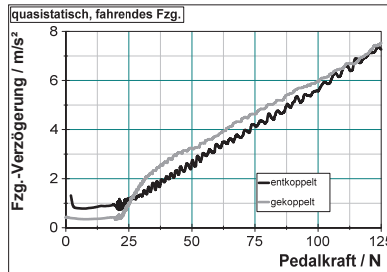


Bild 79: Messung der b-F-Zusammenhänge (nur Betätigung dargestellt)

Das Fahrzeug mit der *entkoppelten Bremsanlage* weist bereits bei  $v_{\text{Bet}} \approx 100 \text{ mm/s}$  eine, bezogen auf den Pedalweg, signifikant größere *Bremsdruck-Hysteresis* als das Vergleichsfahrzeug auf (Bild 80). Das spiegelt sich auch im subjektiven Empfinden wieder („die Fahrzeugverzögerung baut sich beim schnellen Betätigen und Lösen des Bremspedals etwas verzögert auf“).

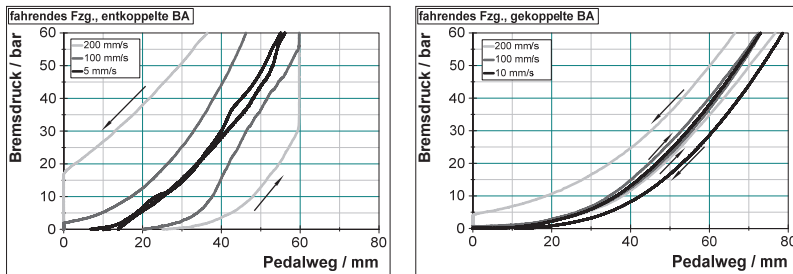


Bild 80: Messung der p-s-Zusammenhänge; unterschiedliche Betätigungsgeschwindigkeiten

Die große *Bremsdruck-Hysteresis* resultiert aus einem hohen Zeitverzug zwischen Pedalweg und Bremsdruck bzw. Fahrzeugverzögerung.

Die in Bild 81 dargestellten Zeitverzüge wurden wie folgt bestimmt: Bei quasistatischer Pedalbetätigung ( $v_{\text{Bet}} = 5\text{-}10 \text{ mm/s}$ ), also ohne signifikante dynamische Einflüsse, wie z. B. hydraulische Widerstände, wurden zuerst die Zusammenhänge zwischen  $s$ ,  $p$  und  $b$ <sup>62</sup> ermittelt, die für die weitere Auswertung als Referenz dienen. Anschließend erfolgte bei Bremsmanövern unter dynamischer Pedalbetätigung für ausgewählte Arbeitspunkte (u. a.  $p = 0 \text{ bar}$  („Totweg“<sup>63</sup>) und  $p = 60 \text{ bar}$ ) eine Auswertung der zeitlichen Verzögerung<sup>63</sup>, mit der der Brems-

<sup>62</sup> Auswertungen zur Fahrzeugverzögerung  $b$  sind hier nicht dargestellt

<sup>63</sup> Latenzzeit

druck bzw. die Fahrzeugverzögerung dem in der quasistatischen Referenzmessung bestimmten zugehörigen Pedalweg jeweils folgen (vgl. Bild 82).

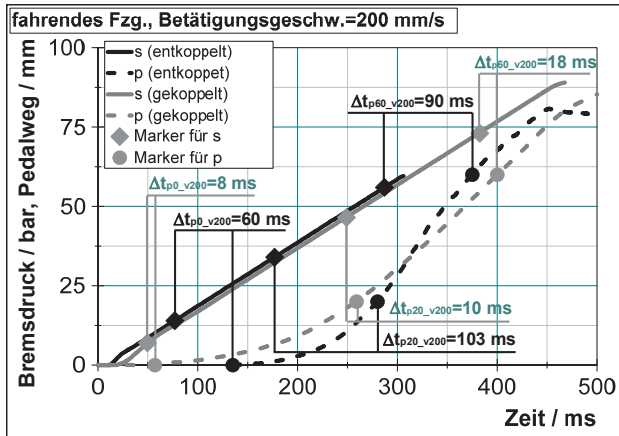


Bild 81: Messung der zeitlichen Verläufe von  $p$  und  $s$ ; Auswertung der Latenzzeiten zwischen  $s$  und  $p$  bei dynamischer Pedalbetätigung im Vergleich zur quasistatischen Pedalbetätigung

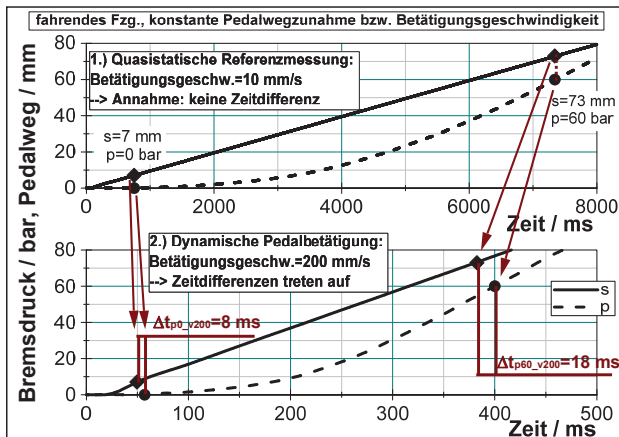


Bild 82: Herleitung: Auswertung der Latenzzeiten zwischen  $s$  und  $p$  bei dynamischen Pedalbetätigungen (am Beispiel des Fahrzeugs mit *gekoppelter* Bremsanlage  $\rightarrow$  Variante 2)

### Gegenüberstellung 3

An dieser Stelle werden unterschiedliche *entkoppelte Bremsanlagen* einander gegenübergestellt und mit ausgewählten *gekoppelten Bremsanlagen* verglichen. Bei

den Varianten „*entkop. BA, radindiv., nasser Sim., Rekup.*“ (vgl. Kapitel 4.1.1), „*entkop. BA, zentral, trockener Sim., Rekup.*“ (vgl. Kapitel 4.1.2) und „*entkop. BA, radindiv., nasser Sim., keine Rekup.*“ (vgl. Kapitel 4.1.3, Abschnitt „Gegenüberstellung 1“) handelt es sich um die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Systeme. In Bild 84 sind für die „*entkop. BA, radindiv., nasser Sim., Rekup.*“ eine *Variante 1 (Var. 1)* und eine *Variante 2 (Var. 2)* dargestellt. Diese Bremsanlage wurde in unterschiedlichen Fahrzeugmodellen verbaut. *Variante 1* repräsentiert einen Mittelklasse-Pkw, wie er in Kapitel 4.1.1 beschrieben wurde, *Variante 2* repräsentiert einen Oberklasse-Pkw.

**Quasistatische Eigenschaften** Das Pedalkraftniveau bei Fahrzeug *entkop. BA, zentral, trockener Sim., Rekup.* wurde für den mittleren Verzögerungsbereich subjektiv als „ziemlich hoch“ beurteilt (Bild 83).

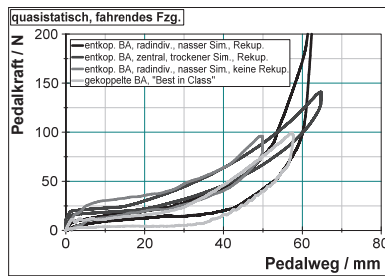


Bild 83: Messung der F-s-Zusammenhänge

In Relation zum Vergleichsfahrzeug (*gekoppelte BA, „Best in Class“*<sup>64</sup>) fällt das zur Verzögerung benötigte Kraftniveau tatsächlich auch deutlich höher aus (Bild 84).

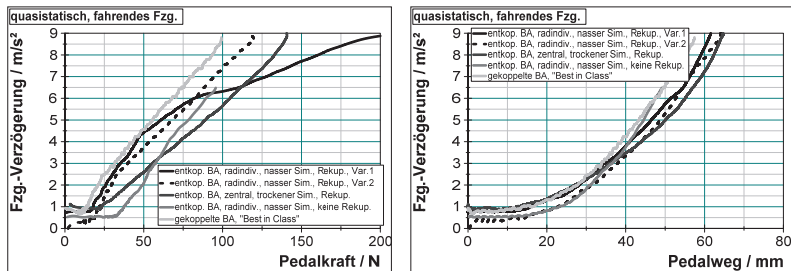


Bild 84: Messung der b-F- und b-s-Zusammenhänge (nur Betätigung dargestellt)

<sup>64</sup> Pkw der Mittelklasse mit, in Fachkreisen anerkannt, sehr guter *Pedal- und Bremscharakteristik*



Beim Fahrzeug *entkop. BA, radindiv., nasser Sim., keine Rekup.* werden im Bereich  $b < 3 \text{ m/s}^2$  noch etwas höhere Pedalkräfte benötigt, was hier jedoch zu keinen auffälligen Subjektivbewertungen geführt hat. Beim Fahrzeug *entkop. BA, radindiv., nasser Sim., Rekup., Var. 1* steigt der Kraftbedarf ab  $b > 6 \text{ m/s}^2$  stark an (bezogen auf  $v_{\text{Bet}} = 20 \text{ mm/s}$ , vgl. Bild 66, S. 64).

**Springer** Nach der Überwindung des *Pedalleerwegs* und der *Ansprechkraft* beginnt der Anstieg der Fahrzeugverzögerung. Im weiteren Verlauf nimmt die Pedalkraft zunächst bei vielen Fahrzeugen mit hohem  $\text{db/dF}$ - und geringem  $\text{dF/ds}$ -Gradienten weiter zu. Dies ist der Bereich des *Springers*<sup>65</sup> (vgl. Bild 3, S. 7). Hier wird eine Erhöhung der Fahrzeugverzögerung nahezu ausschließlich über eine Erhöhung des Pedalwegs bei nur minimal ansteigender Pedalkraft realisiert (überwiegend wegmodulierter Bereich). Daran schließt sich ein Bereich mit geringerem  $\text{db/dF}$ -Gradienten an, der üblicherweise bis zum Aussteuerpunkt näherungsweise linear bleibt. In der Literatur ([14], [80]), aber auch in den Auslegungsabteilungen der Bremsenentwickler, herrscht größtenteils die Meinung vor, dass der *Springer* für eine optimale Pedal- und *Bremscharakteristik* erforderlich ist. Es gibt in der Literatur aber auch Hinweise darauf, dass der *Springer* zur Erreichung dieses Ziels nicht vorhanden sein muss [77]. In dieser Quelle wird vom Autor auf den Widerspruch zu den bisherigen Erkenntnissen hingewiesen.

In Bild 85 ist eine Auswahl an Fahrzeugen hinsichtlich der Ausprägung eines *Springers* gegenübergestellt worden. Links sind die Kennlinien in der Form  $b=f(F)$  und rechts in der Form  $\text{db/dF}=f(b)$  dargestellt. Eine weitere Form der Visualisierung zeigt Bild 86.

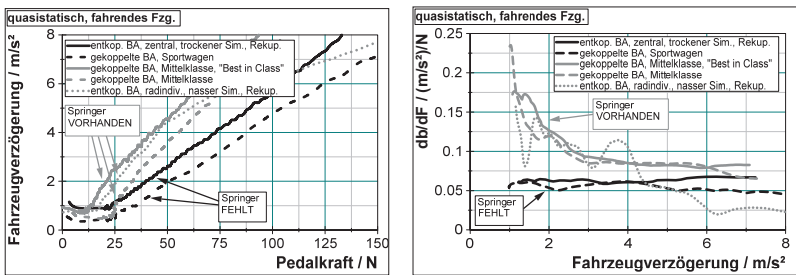


Bild 85: Vergleich unterschiedlicher *Bremscharakteristiken* bezüglich Vorhandensein des *Springers*: Messung der  $b$ - $F$ -Zusammenhänge (links) und  $\text{db/dF}$ -Zusammenhänge (rechts)

<sup>65</sup> Der Begriff des *Springers* ist bezüglich *Pedal-* und *Bremscharakteristik* irreführend, da sich bei einer typischen *moderaten* Bremsbetätigung weder der Bremsdruck noch die Fahrzeugverzögerung im Bereich des *Springers* sprunghaft ändern.

Unter den hier aufgeführten Fahrzeugen ohne erkennbaren *Springer* befindet sich ein Fahrzeug mit *gekoppelter Bremsanlage*<sup>66</sup> und ein Fahrzeug mit *entkoppelter Bremsanlage*<sup>67</sup>. Für den Sportwagen mit *gekoppelter Bremsanlage* („gekoppelte BA, Sportwagen“) wird der Anspruch formuliert, dass dieser als Serienfahrzeug auch tauglich für die Rennstrecke sein soll. Insofern ist die Auslegung der entsprechenden Bremsanlage u. U. speziellen herstellereigenen Anforderungen unterworfen.

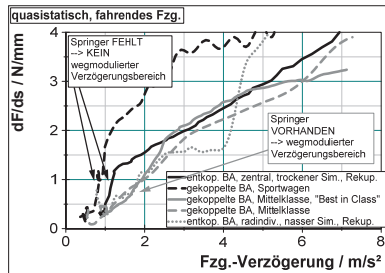


Bild 86: Vergleich unterschiedlicher *Bremscharakteristiken* bezüglich Vorhandensein des *Springers*: Messung der  $dF/ds$ -b-Zusammenhänge

Bei gegebenem  $F$ - $s$ -Zusammenhang<sup>68</sup> äußert sich ein deutlich ausgeprägter *Springer* darin, dass der *Ansprechweg* signifikant kleiner ist als der *Leerweg* (vgl. Bild 3, S. 7). Die in Bild 85 verglichenen Fahrzeuge sind hinsichtlich dieses Kriteriums ausgewertet worden. Die Ergebnisse zeigt Bild A15 (S. 147). Die Fahrzeuge, die bereits in Bild 85 mit „Springer fehlt“ markiert wurden, zeigen nur geringe Differenzen zwischen *Leer-* und *Ansprechweg* ( $\leq 3$  mm). Der nahezu ausschließlich Pedalweg-modulierte Verzögerungsbereich<sup>69</sup> entfällt fast vollständig (Bild 86). Bei den Fahrzeugen mit ausgeprägtem *Springer* liegen die Differenzen zwischen *Leer-* und *Ansprechweg* hingegen bei 13-16 mm.

**Zeitverhalten** Unter den vermessenen Fahrzeugen weisen jene mit *entkoppelter Bremsanlage* signifikant die größten Latenzzeiten zwischen Bremspedalbetätigung und Einsetzen der Bremswirkung auf (Bild 87).

Die Sport Utility Vehicles (SUV), Oberklassefahrzeuge und Nutzkraftwagen (Nkw) mit *gekoppelten Bremsanlagen* finden sich ebenfalls tendenziell im Bereich größerer Latenzzeiten wieder. Nach Aussagen von professionellen Versuchs-

<sup>66</sup> „gekoppelte BA, Sportwagen“: Sportwagen mit anerkannt guter *Pedal-* und *Bremscharakteristik*

<sup>67</sup> „entkop. BA, zentral, trockener Sim., Reкуп.“, vgl. Kapitel 4.1.2

<sup>68</sup> Nach Überwindung der *Losbrechkraft* zunächst geringer  $dF/ds$ -Gradient, anschließend, nach *Leerwegbereich*, Gradient weiter ansteigend, vgl. Bild 3, S. 7

<sup>69</sup> Gekennzeichnet durch sehr geringe  $dF/ds$ -Gradienten im Bereich *moderater* Verzögerungen

fahren sind Werte ab etwa  $\Delta t=30$  ms subjektiv spürbar [80]. Der Großteil der untersuchten Fahrzeuge liegt unterhalb dieser Schwelle. Die Fahrzeuge mit *entkoppelter Bremsanlage* überschreiten sie jedoch deutlich.

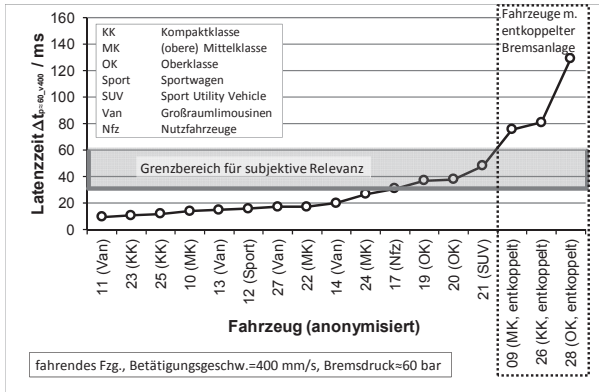


Bild 87: Vergleich unterschiedlicher Kfz-Bremsanlagen hinsichtlich der Latenzzeiten zwischen  $s$  und  $b^{70}$

## 4.2 Synthetische Erzeugung von Pedalcharakteristiken mit Pedalcharakteristiksimulatoren

Analysiert wird ein stellvertretend ausgewählter Pedalcharakteristiksimulator, der in mehreren Serienfahrzeugen mit *entkoppelter Bremsanlage* Verwendung findet. Die im Simulator verbauten Einzelkomponenten werden hinsichtlich ihrer Wirkungsweise und ihres Anteils an der synthetischen Erzeugung der *Pedalcharakteristik* beleuchtet. Bild 89 zeigt die Versuchsanordnung, mit der die Eigenschaften des vom Fahrzeug separierten kompletten Simulators ermittelt wurden.

**Beschreibung des Pedalcharakteristiksimulators** Der Simulator, der u. a. in dem in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Fahrzeug eingesetzt wird, ist *passiv* und *trocken* ausgeführt. D. h., im Simulator sind lediglich passive Elemente verbaut; Fluide, z. B. zur Kraftübertragung oder Bedämpfung, sind nicht vorhanden. Die F-s-Charakteristik resultiert aus dem sequenziell betätigten Paket aus Biegefeder und Elastomerefeder (Bild 88). Die Progression im F-s-Zusammenhang wird primär über die spitz zulaufende geometrische Gestaltung der Elastomerefeder erreicht (Bild 91). Es sind keine konstruktiven Merkmale vorhanden, mit denen sich gezielt eine *statische* oder *dynamische Kraft-Hysterese* erzeugen lässt.

<sup>70</sup> Zur Herleitung der Latenzzeiten: siehe Kapitel 4.1.2, Bild 82, S. 75

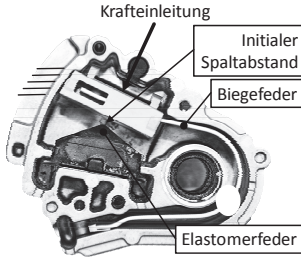


Bild 88: Konstruktiver Aufbau des Pedalcharakteristiksimulators

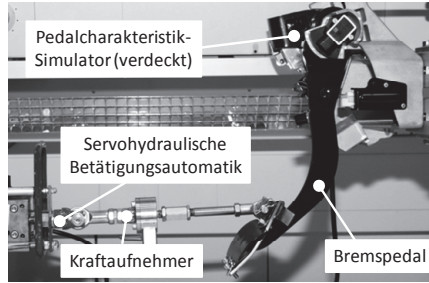


Bild 89: Versuchsanordnung zur Vermessung des Simulators

Der ohnehin sehr geringe Anteil an *dynamischer Kraft-Hysterese* beim im Kapitel 4.1.2 untersuchten Fahrzeug (Bild 90 links) stammt offenbar maßgeblich nicht aus dem Simulator. Andernfalls wäre dieser Hystereseanteil auch in Bild 90 (rechts) zu sehen.

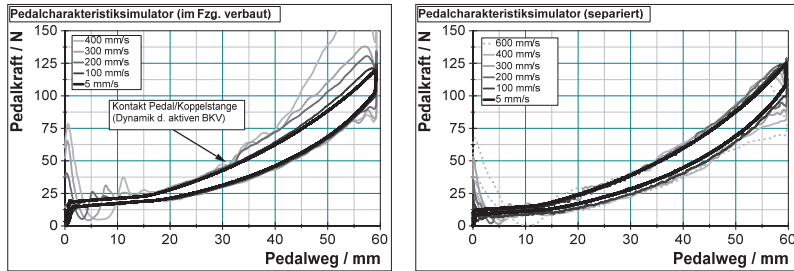


Bild 90: Analyse Simulator im Fahrzeug (links) und separiert (rechts): Messung der F-s-Zusammenhänge; unterschiedliche Betätigungsgeschwindigkeiten

Das Bremspedal ist bei dieser Bremsanlage nicht direkt mit dem BKV gekoppelt. Stattdessen verfügt die Koppel zwischen BKV und Pedal über eine Art Langloch (vgl. Bild 71: Pos. 7, S. 69). Im Fall einer moderaten Pedalbetätigung wird der aktive BKV so angesteuert, dass keine mechanische Kopplung zwischen Pedal und BKV zustande kommt – die Koppel eilt dem Bremspedal zuzusagen etwas voraus. Im Falle eines Fehlers in der Bremsanlage<sup>71</sup> ist nach Überwindung eines initialen Abstands im Langloch der direkte mechanische Durchgriff vom Bremspedal zu den Radbremsen gegeben. Befindet sich die

<sup>71</sup> Die Bremsanlage befände sich dann in der Rückfallebene

Bremsanlage im regulären Betrieb<sup>72</sup> und wird das Bremspedal genügend schnell betätigt ( $v_{\text{Bet}} > 200 \text{ mm/s}$ ), wird der initiale Abstand im Langloch ebenfalls überwunden. Die Gesamtpedalkraft resultiert dann zu einem Teil aus dem Pedalcharakteristiksimulator und zu einem anderen Teil aus der hysteresebehafteten Gegenkraft am BKV. So entsteht eine *dynamische Kraft-Hysterese*.

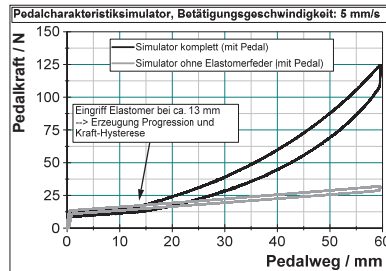


Bild 91: Bremspedalcharakteristiksimulator mit und ohne Elastomerfeder: Messung der F-s-Zusammenhänge

In Bild 91 ist der Einfluss der Elastomerfeder auf die Charakteristik des Simulators dargestellt. Die Kennlinie „Simulator ohne Elastomerfeder (mit Pedal)“ verläuft erwartungsgemäß deutlich flacher, da hier nicht mehr die parallel zur Biegefeder geschaltete Elastomerfeder zum Eingriff kommt<sup>73</sup>. Weiterhin wird deutlich, dass die Elastomerfeder nahezu vollständig für das Entstehen der *statischen Kraft-Hysterese* verantwortlich ist. Der progressive Verlauf der F-s-Kennlinie ist auf die geometrischen Eigenschaften der Elastomerfeder zurückzuführen.

Wie bereits in Bild 90 (rechts) dargestellt, tritt bei moderaten Betätigungs geschwindigkeiten kaum *dynamische Kraft-Hysterese* im Simulator selbst auf. Dies bestätigt sich erneut bei der Vermessung der separierten Elastomerfeder (Bild 93). Die Kurven liegen, bis auf die bei quasistatischer Betätigung ( $v_{\text{Bet}}=0,2 \text{ mm/s}$ , nicht dargestellt:  $v_{\text{Bet}}=0,8 \text{ mm/s}$ ) erzeugten, betätigungsdynamikunabhängig nahezu übereinander. Der bei  $v_{\text{Bet}}=0,2 \text{ mm/s}$  deutlich abweichende Kurvenverlauf ist vermutlich mit dem Relaxationsverhalten (vgl. Bild 94) des viskoelastischen Werkstoffs zu erklären. Die Größenordnung der Relaxationszeit (ca. 10 s, Bild 92, graue Kurve) liegt deutlich unter der Betätigungszeit (ca. 47 s, Bild 92, schwarze Kurve). Somit befindet sich die Elastomerfeder bei der sehr langsamen Betätigung jederzeit deutlich näher am relaxierten Zustand als bei der schnelleren Betätigung.

<sup>72</sup> Die Rückfallebene ist nicht aktiv und der aktive BKV arbeitet wie vorgesehen

<sup>73</sup> Die Elastomerfeder wurde hier aus dem Simulatorgehäuse entfernt

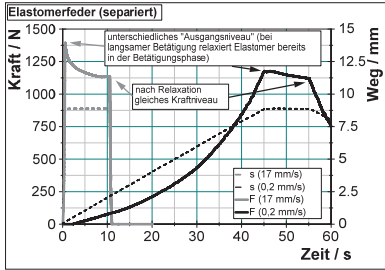


Bild 92: Separierte Elastomerfeder des Bremspedalcharakteristiksimulators: Messung des zeitlichen Verlaufs von F; unterschiedliche Betätigungsge-  
schwindigkeiten

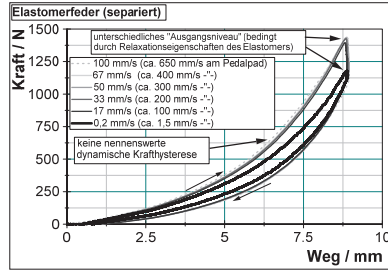


Bild 93: Separierte Elastomerfeder des Bremspedalcharakteristiksimulators: Messung der F-s-Zusammenhänge; unterschiedliche Betätigungsge-  
schwindigkeiten

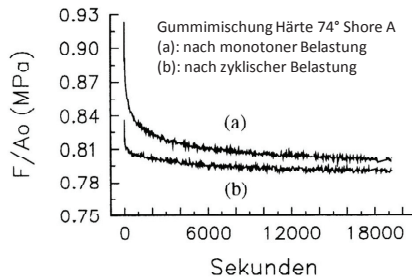


Bild 94: Relaxationsverhalten von Elastomeren; nach [67]

Die physikalisch-geometrischen Eigenschaften des Pedalcharakteristiksimulators wurden mit einem numerischen Verhaltensmodell nachgebildet (Bild 95). Als besonders anspruchsvoll hat sich in diesem Fall die Modellierung des viskoelastischen Verhaltens der Elastomerfeder herausgestellt. Es wurde der Ansatz gewählt, die Elastomerfeder mit einer Parallelschaltung aus einem elastischen Element und mehreren Maxwell-Körpern<sup>74</sup>, nachzubilden (Bild 95: Pos. 6). Die Verwendung von 5 Maxwell-Körpern hat sich hier als guter Kompromiss zwischen Parametrieraufwand und Simulationsgüte erwiesen. Die Parameter der elastischen (Federsteifigkeiten) und viskosen (Dämpfungskoeffizienten) Elemente wurden aufgrund der besonderen geometrischen Gestalt der Elastomerfeder (vgl. Bild 88) kompressionswegabhängig nichtlinear gewählt.

<sup>74</sup> Reihenschaltung eines Hooke-Körpers (elastisch, Feder) und eines Newton-Körpers (viskos, Kolben in zäher Flüssigkeit)

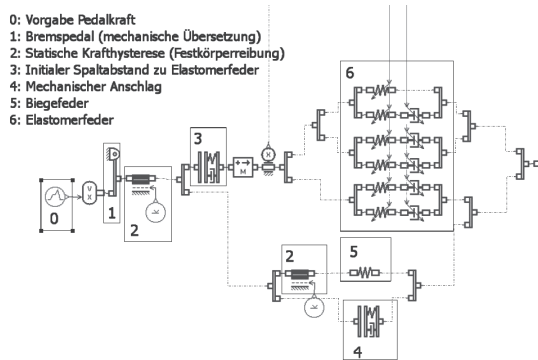


Bild 95: Numerisches Verhaltensmodell des Pedalcharakteristiksimulators (Software: AMESim)

In Bild 96 sind für den vollständigen Simulator und in Bild 97 für die isolierte Elastomerfeder Simulationsergebnisse und Messwerte gegenübergestellt. Es ist, insbesondere in Betätigungsrichtung, eine gute Übereinstimmung der Kurvenverläufe vorhanden.

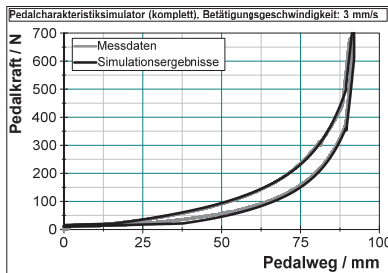


Bild 96: Simulierte Charakteristik des Pedalcharakteristiksimulators: gemessene und simulierte F-s-Zusammenhänge

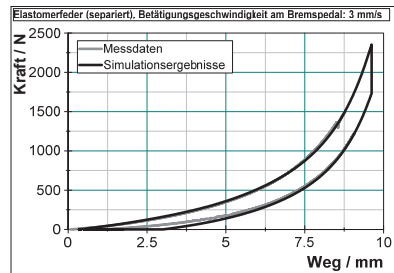


Bild 97: Simulierte Charakteristik der separierten Elastomerfeder: gemessene und simulierte F-s-Zusammenhänge

Eine beispielhafte Darstellung des gerechneten Relaxationsverhaltens zeigt Bild 98. Der *Leerwegbereich*, der Bereich der progressiven Kraftzunahme und das Verhalten am mechanischen Anschlag werden für den kompletten Pedalcharakteristiksimulator sehr gut nachgebildet (Bild 96, Bild 99). Die *Kraft-Hysterese* wird ebenfalls bereits gut wiedergegeben. Während des Lösevorgangs gibt es hier jedoch im Bereich geringer Pedalwege noch Abweichungen (Bild 99 links), die ihre Ursache in der Modellierung der Elastomerfeder haben (Bild 97).

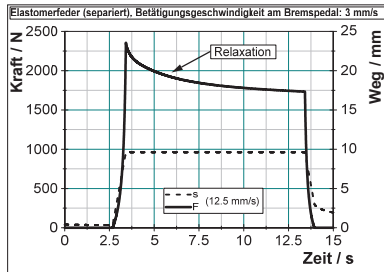


Bild 98: Simuliertes Relaxationsverhalten der separierten Elastomerfeder des Bremspedalcharakteristiksimulators: zeitlicher Verlauf der Kraft  $F$  bei konstantem Kompressionsweg  $s$

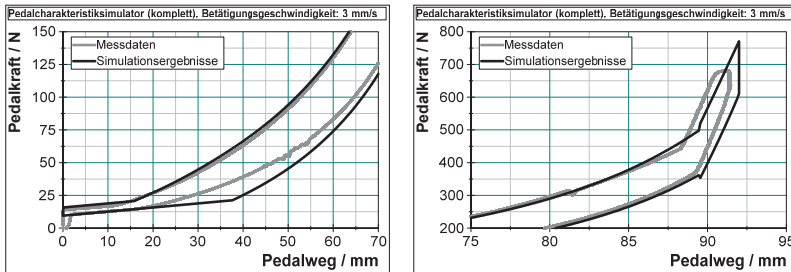


Bild 99: Simulierte Charakteristik des Pedalcharakteristiksimulators: Detailsicht der gemessenen und simulierten  $F$ - $s$ -Zusammenhänge aus Bild 96

Die hier vorgestellte Methodik, bestehend aus experimenteller Analyse und numerische Verhaltenssimulation, ist dazu geeignet, weitergehende Untersuchungen zu konstruktiven und funktionellen Einflüssen auf die *Pedalcharakteristik* von Pedalcharakteristiksimulatoren durchzuführen und Optimierungsmöglichkeiten zu erarbeiten. Empfehlungen für *Pedalcharakteristiken* werden in Kapitel 7 ausgesprochen.



## 5 Probandenfahrversuche zu Fühlbarkeits- und Akzeptanzschwellen

Die von konventionellen *gekoppelten* vakuumverstärkten Bremsanlagen bekannten *Pedal-* und *Bremscharakteristiken* stellen derzeit noch den Maßstab für *entkoppelte* und *rekuperative Bremsanlagen* dar. Werden *gekoppelte Bremsanlagen* mit Systemen zur Rekuperation von Bremsenergie kombiniert, gilt es, das generatorisch erzeugte zusätzliche Bremsmoment hinsichtlich Betrag ( $|M_{\text{gen}}|$ ) und Gradient ( $dM_{\text{gen}}/dt$ ) so zu begrenzen, dass dieses vom Fahrer nicht als störend wahrgenommen wird. Ähnliches gilt für die *entkoppelten Bremsanlagen*. Die dort verwendeten Pedalcharakteristiksimulatoren sind auf eine authentische *Pedalcharakteristik* hin zu optimieren. *Entkoppelte Bremsanlagen* mit Rekuperationsmöglichkeit sind so auszulegen, dass das Zusammenspiel (*Verblenden*) zwischen der durch die Reibbremsanlage erzeugten und der generatorisch erzeugten Bremswirkung harmonisch und für den Fahrer unmerklich abläuft.

Mittels Probandenversuchen wurden gezielt Fühlbarkeits- und Akzeptanzschwellen zu den beschriebenen Problemfeldern untersucht. Die Versuche fanden als Fahrstudie im Realfahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr statt. Diese Art der Versuchsdurchführung ermöglicht einen hohen Grad an externer Validität. Einer möglichst hohen internen Validität wurde Rechnung getragen, indem für die Versuche ein speziell für solche Anwendungen umgerüstetes Fahrzeug (Bild 100, Bild 101) mit variabler *Pedal-* und *Bremscharakteristik* verwendet wurde. Unterschiedliche Charakteristiken<sup>75</sup> konnten so in ein- und demselben Fahrzeug gegenübergestellt werden.

In dem Versuchsfahrzeug wird das in Kapitel 1.2 beschriebene physikalische Ersatzmodell für die *Pedal-* und *Bremscharakteristik* angewendet. Die Charakteristiken lassen sich mithilfe eines speziellen Softwaretools einfach definieren und werden authentisch im Versuchsfahrzeug umgesetzt (vgl. [55]). Diese Authentizität stellte zusammen mit der Nutzbarkeit im öffentlichen Straßenverkehr eine der Hauptanforderungen beim Aufbau des Fahrzeugs dar. Für ein möglichst breites Nutzungsspektrum muss der Zusammenhang der Größen Pedalkraft, Pedalweg und Bremsdruck in einem weiten Bereich veränderbar sein. Diese Forderung beinhaltet auch die Variierbarkeit der *statischen* und *dynamischen Kraft-Hysterese* (Bild 3, S. 7) und der Systemdynamik (Zeitverzüge zwischen Pedalbetätigung und Bremswirkung, vgl. Bild 82, S. 75, Bild 87, S. 79) sowie die Aufprägung haptischer Informationen und Störungen auf die *Pedal-* oder *Bremscharakteristik*. Die Charakteristiken können, auch im fahrenden Fahrzeug, entweder nahezu ohne Zeitverzug komplett gewechselt oder in Echtzeit

---

<sup>75</sup> Vgl. Kapitel 1.2 → „Pedalcharakteristik“, „Bremscharakteristik“

stufenlos (vgl. [11]) manipuliert werden. Bei allen Möglichkeiten, die sich mit diesem Fahrzeug bieten, wurde großer Wert darauf gelegt, dass der Eindruck eines Serienfahrzeugs erhalten bleibt.



Bild 100: Versuchsfahrzeug mit variabler Pedal- und Bremscharakteristik

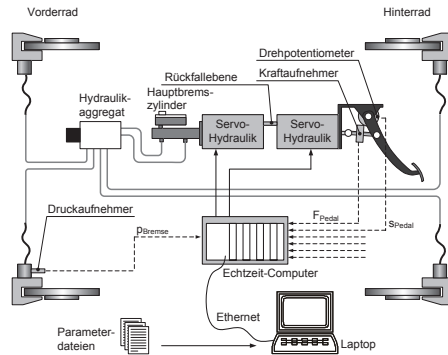


Bild 101: Funktionale Systemarchitektur des Versuchsfahrzeugs; nach [80]

Zur Datengewinnung und Versuchsauswertung wurde ein Mix aus unterschiedlichen Methoden herangezogen: Fragebogen zur Sozialstatistik, Fragebögen und verbale Befragung zur Erfassung des Subjektivurteils, Verhaltensbeobachtung durch den Versuchsbetreuer, nicht sichtbare Datenerfassung (zeitliche Verläufe, bezogene Größen, statistische Auswertung).

## 5.1 Versuchsreihe 1 - „Gekoppelte Bremsanlagen mit Rekuperation: Grundsatzuntersuchungen zu Fühlbarkeitsschwellen“

### 5.1.1 Versuchsdesign

Anhand von künstlich auf die *Bremscharakteristik* aufgeprägten Ereignissen (Störungen) in Form von zusätzlichem Bremsmoment wurden im Rahmen dieser Grundsatzuntersuchungen Effekte nachgebildet, wie sie bei *gekoppelten rekuperativen Bremsanlagen* auftreten können. Die zusätzliche Bremswirkung wurde jeweils erst nach Beginn der Bremsbetätigung aktiviert, sodass sich die *Bremscharakteristik* während des laufenden Bremsvorgangs veränderte. Die Ausprägung der Störungen wurde hinsichtlich *Änderungszeit*<sup>76</sup> und *Änderungsstärke*<sup>77</sup> variiert. So konnten Aussagen darüber gewonnen werden, welche Störungen für

<sup>76</sup> Schnelle oder langsame Änderung

<sup>77</sup> Großes oder kleines, positives oder negatives zusätzliches Bremsmoment

den Menschen gerade noch nicht fühlbar sind. Das Spektrum der angebotenen Störungen wurde bewusst breit gewählt<sup>78</sup>, um erst einmal losgelöst von der praktischen Relevanz der Parameter die Fühlbarkeitsschwellen grundlegend abzu prüfen. Die Versuche wurden mit einer Probandenstichprobe von 8 Personen (Tabelle A2, S. 148) durchgeführt.

Die Fahrversuche fanden in einem Gewerbegebiet mit reduziertem Verkehrsaufkommen statt (Bild A16, S. 149). Diese Variante wurde als Kompromiss zwischen einer möglichst realistischen Alltagsumgebung im öffentlichen Straßenverkehr und einer guten Reproduzierbarkeit bei gleichzeitiger Minimierung des Sicherheitsrisikos bei Bremsversuchen gewählt.

Als Ausgangsbasis wurde die anerkannt sehr gute *Pedal- und Bremscharakteristik* eines Mittelklassefahrzeugs mit konventioneller *gekoppelter Bremsanlage* ausgewählt. Die Störungen wurden jeweils während des Abbremsvorgangs beim Unterschreiten einer definierten Fahrzeuggeschwindigkeit aufgeprägt.

Merkmal	Varianten
Startgeschwindigkeit des Fahrzeugs	ca. 50 km/h
Verzögerungsniveau (vgl. Tabelle A2, S. 148)	„normaler“ Bremsvorgang / moderate Verzögerung "leichter" Bremsvorgang / geringe Verzögerung
Betrag und Vorzeichen der aufgeprägten Bremswirkung	+10 %, +25 %, +50 %, +100 % 0 % -25 %, -50 %
Zeit, bis volle Aufprägung erreicht ist	0,1 s, 0,5 s, 1,0 s, 2,0 s, 5,0 s

Tabelle 6: Variantenübersicht der aufgeprägten Störungen

### 5.1.2 Ablauf

Die unterschiedlichen Störereignisse (vgl. Tabelle 6) wurden in randomisierter Reihenfolge eingespielt. Nachdem der Versuchsleiter dem Probanden mitgeteilt hatte, ob der nächste Bremsvorgang ein „normaler“ Bremsvorgang oder ein „leichter“ Bremsvorgang sein sollte<sup>79</sup>, beschleunigte der Proband das Fahrzeug auf eine Startgeschwindigkeit von etwas über 50 km/h und bremste unter Berücksichtigung des Verkehrsgeschehens bei nächster Gelegenheit das Fahrzeug bis zum Stillstand ab. Nun erfolgte die Abfrage der Bewertung (Tabelle 7).

<sup>78</sup> Sehr kurze und sehr lange Zeitintervalle, sehr geringe und sehr hohe aufgeprägte Verzögerungen

<sup>79</sup> Die verbale Umschreibung der Vorgaben für den „normalen“ und den „leichten“ Bremsvorgang sind in Tabelle A3 (S. 148) dokumentiert. Diese beiden Varianten und deren verbale Umschreibung wurden gewählt, da diese praxisnah und von den Probanden leicht umzusetzen sind.

verbale Bewertung	Wertung	
Brems- / Abbremsvorgang ist <b>auffällig</b> → <i>„ein solches Verhalten der Bremsanlage würde mich stören bzw. irritieren“</i>	„sehr auffällig“	1
	„auffällig“	2
	„leicht auffällig“	3
Brems- / Abbremsvorgang ist <b>unauffällig</b> → <i>„ohne Vorkenntnisse würde mich diese Charakteristik in einem Serienfahrzeug nicht stören“</i>	4	

Tabelle 7: Verbale Umschreibung der Beurteilungsskala für die aufgeprägten Störungen

Eine Bewertung mit „leicht auffällig“ bedeutete dabei, dass ein Effekt zwar spürbar, aber für den Serieneinsatz noch akzeptabel ist. Vermutlich würde man sich im Alltag an einen solchen Effekt schnell gewöhnen und diesen tolerieren. Einen als „auffällig“ bewerteten Effekt würde man im Fahrzeug nicht mehr akzeptieren. Effekte mit der Bewertung „sehr auffällig“ hingegen erschwerten sogar deutlich die sichere Dosierung der Bremswirkung (vgl. Bild 102 links).

### 5.1.3 Ergebnisse

In Tabelle 8 sind für jede Parametervariante jeweils die Mittelwerte der Antworten aller Probanden dargestellt. Es bestätigt sich die Erwartung, dass neben dem Betrag der Störung ( $|z|$ ) auch die Zeit, in der die Störung ihre volle Ausprägung erreicht ( $dz/dt$ ), einen Einfluss darauf hat, ob diese vom Menschen wahrgenommen wird. Weiterhin ist auch das Vorzeichen der Störung relevant ( $sign(z)$ ). Zur Quantifizierung der Fühlbarkeitsschwellen genügt es also nicht, lediglich den Betrag einer potenziellen Störgröße zu benennen.

	<b>1 = sehr auffällig</b>	
Interpretation	<b>4 = unauffällig</b>	(vgl. Tabelle 7)

		„geringe“ Verzögerung					„moderate“ Verzögerung				
		Änderungszeit					Änderungszeit				
		5,0 s	2,0 s	1,0 s	0,5 s	0,1 s	5,0 s	2,0 s	1,0 s	0,5 s	0,1 s
Niveauänderung	+100 % (+1,0 m/s <sup>2</sup> )	3,0	2,4	2,0	2,3	1,3	2,6	1,9	1,5	1,5	1,0
	+50 % (+0,5 m/s <sup>2</sup> )	3,1	2,9	2,7	2,7	2,0	3,5	2,5	2,5	2,5	1,9
	+25 % (+0,25 m/s <sup>2</sup> )	3,7	3,6	3,3	3,3	3,3	3,8	3,5	3,7	3,7	3,7
	+10 % (+0,1 m/s <sup>2</sup> )	3,7	4,0	4,0	3,8	3,8	3,9				
	0 % (+/- 0,0 m/s <sup>2</sup> )	3,9									
	-25 % (-0,25 m/s <sup>2</sup> )	3,8	3,8	3,5	3,3	2,8	4,0	3,3	3,0	2,5	2,0
Niveauänderung	-50 % (-0,5 m/s <sup>2</sup> )	3,7	3,4	2,9	2,6	2,4	3,5	2,6	2,8	2,1	1,8

Tabelle 8: Bewertung der Störungen - Mittelwerte der Subjektivrteile aller Probanden

Je größer der Betrag der Störung und je größer der Gradient ausfällt, mit dem die Störung aufgebracht wird, desto eher bzw. stärker wird diese Ausprägung als störend bewertet. Große Störampplituden sind dann noch akzeptabel, wenn die Änderungszeit der Störung genügend lang ausfällt. Der Fahrer regelt dann

die Störung, womöglich unbewusst, leichter aus. Ein maßgeblicher Einflussfaktor scheint unabhängig von den beiden untersuchten Startverzögerungen die absolute, und nicht die relative, Verzögerungsänderung zu sein. Insgesamt sind die von den Probanden problemlos tolerierten resultierenden Änderungen in der Fahrzeugverzögerung sehr gering (bis etwa  $b = \pm 0,3 \text{ m/s}^2$ ). Im Vergleich dazu liegen die durch Verblendung verursachten Verzögerungsänderungen (Störungen) der in den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 untersuchten Fahrzeugen bei etwa  $\Delta b < 0,5 \text{ m/s}^2$ . Die zugehörige Änderungszeit beträgt etwas mehr als 1 s (vgl. Bild 70, S. 68). Anzumerken ist, dass die Bewertung der Störungen bei konstanter Abbremsung stattgefunden hat. Es ist zu erwarten, dass eine Störung in der Fahrzeugverzögerung, die zeitlich sehr nahe beim Fahrzeugstillstand auftritt<sup>80</sup>, von der durch das Fahrzeugnicken erzeugten Aufbaubewegung zum Teil maskiert wird. Es wären dann stärkere Ausprägungen zulässig.

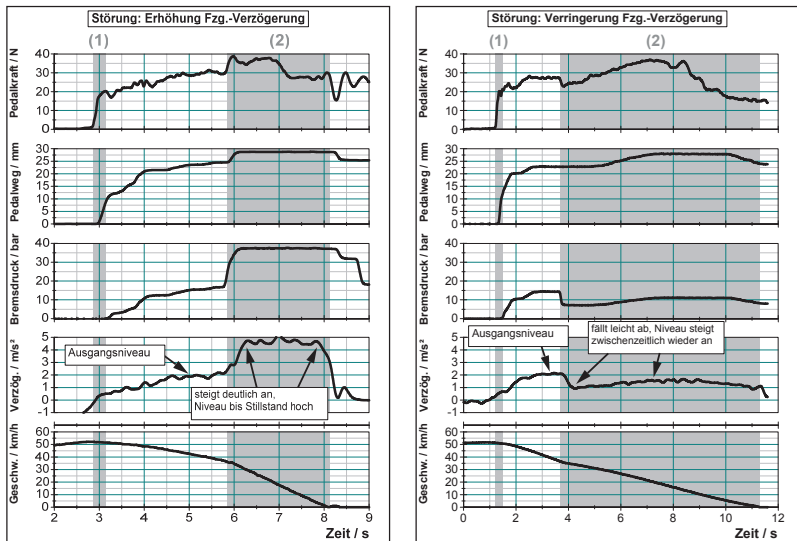


Bild 102: Zeitliche Verläufe unterschiedlicher Messgrößen bei Aufprägung einer Störung in Form der Erhöhung (links) bzw. Verringerung (rechts) der Fahrzeugverzögerung (Änderungszeit  $t = 0,1 \text{ s}$ , Phase (1): Bremsbeginn, Phase (2): Bremsvorgang von Eintritt des Störereignisses bis zum Fahrzeugstillstand)

Eine Störung in Form der Zunahme der Fahrzeugverzögerung wirkt irritierend auf den Fahrer und führt bei deutlicher Ausprägung zum heftigen Überbrem-

<sup>80</sup> So ist es bei den in den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 untersuchten Fahrzeugen der Fall.

sen des Fahrzeugs (Bild 102 links). Die Ursache dafür dürfte in der Trägheitskraftmitkopplung des „bremsenden Beins“ zu suchen sein (vgl. auch [80]). Steht der Fahrer mit dem Fuß bereits auf dem Bremspedal, während das Fahrzeug eine sprungartige Erhöhung der Verzögerung erfährt, führt die Massenträgheit des Bewegungsapparats dazu, dass der Fahrer ungewollt eine ebenfalls sprungartige Erhöhung in der Pedalkraft realisiert. Daraus resultiert wiederum eine weitere Erhöhung in der Fahrzeugverzögerung. Dieser Effekt ist selbstverstärkend und lässt sich offensichtlich vom Fahrer nur schwer kompensieren. Eine Störung in Form einer Reduktion der Fahrzeugverzögerung wirkt tendenziell irritierend, lässt sich aber gut vom Fahrer kompensieren (Bild 102 rechts).

Generell sollte die Aufprägung der Störeffekte so langsam wie möglich erfolgen. Die längste untersuchte Änderungszeit von  $t=5$  s ist sicherlich vor dem Hintergrund einer typischen Bremsdauer und dem Wunsch nach einer hohen Rekuperationsrate für die Praxis nicht relevant. Festzuhalten ist, dass sprungartige Änderungen, die Nahe bei einer Änderungszeit von  $t=0,5$  s liegen, vermieden werden sollten.

## 5.2 Versuchsreihe 2 - „Entkoppelte Bremsanlagen mit und ohne Rekuperation: Akzeptanz von charakteristischen Merkmalen“

Zwei Besonderheiten von Fahrzeugen mit *entkoppelten Bremsanlagen*, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Authentizität der *Pedal-* und *Bremscharakteristik* haben, sind der Pedalararakteristiksimulator und die Verblendung der unterschiedlichen Bremsmomenterzeugungssysteme von *rekuperativen Bremsanlagen* miteinander. Aufgrund der Forderungen nach einfachem, robustem und preiswertem Aufbau des Pedalararakteristiksimulators werden mit derzeitigen Systemen die Eigenschaften einer typischen *Pedalararakteristik* teilweise nur unbefriedigend abgebildet. Artefakte, die beim Verblenden auftreten können, sind möglicherweise Ursachen für unerwünschte Effekte in der *Bremscharakteristik*. Im folgenden Kapitel werden Akzeptanzschwellen zu diesen Problemfeldern abgeprüft und benannt. Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt ist die Akzeptanz von möglichen neuartigen Zusatzfunktionen, die mit konventionellen *gekoppelten* Bremssystemen bisher nicht möglich waren.

### 5.2.1 Versuchsdesign

**Charakteristiken**<sup>81</sup> Ausgangspunkt war die *Pedal- und Bremscharakteristik* des in Kapitel 4.1.1 vorgestellten Fahrzeugs mit *entkoppelter rekuperativer Bremsanlage* (Charakteristik „01a-entkoppelte BA“), welche sich von denen typischer konventioneller gekoppelter Bremsanlagen in mehreren Merkmalen unterscheidet: u. a. sehr geringe *statische Kraft-Hysterese*, sehr geringe *Losbrechkraft*, auffällig großer Gradient  $dF/ds$  im *Leermegbereich*, geringer maximaler Pedalweg. Mit den Charakteristiken 01b... bis 01d... sind unterschiedliche Unstetigkeiten im Verzögerungsverlauf während eines *rekuperativen* Bremsvorgangs abgetestet worden. Die Akzeptanz der Ausnutzung des Bremspedals zur haptischen Informationsvermittlung wurde an einem Beispiel mit Charakteristik „02-entkoppelte BA, F-Sprung“ betrachtet. Für die Untersuchungen zum Einfluss der Pedalcharakteristiksimulators wurden verschiedene auffällige Parameter der *Pedalcharakteristik* jeweils einzeln modifiziert (Charakteristiken 03... bis 07...). Zusätzlich wurde eine typische Charakteristik eines Fahrzeugs mit *gekoppelter Bremsanlage* in den Vergleich einbezogen (Charakteristik „08-gekoppelte BA“). Die Fahrversuche fanden im Stadtverkehr von Ilmenau statt (Bild A17, S. 151). Nachfolgend sind die untersuchten Charakteristiken im Detail beschrieben:

„01a-entkoppelte BA“ Die Charakteristik (Bild 103) wurde basierend auf den Messdaten eines Serien-Hybridfahrzeugs (Kapitel 4.1.1) erstellt und stellt die Ausgangsbasis für die nachfolgend beschriebenen Charakteristiken 01b bis 07 dar.

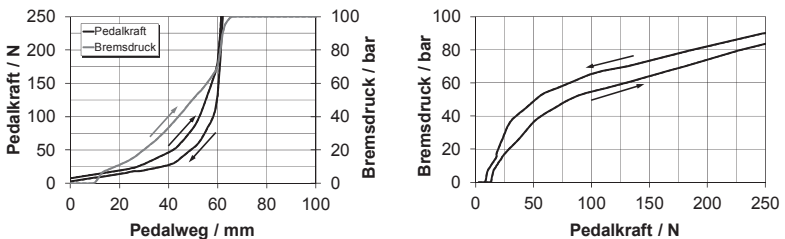


Bild 103: Charakteristik „01a-entkoppelte BA“

<sup>81</sup> Vgl. Kapitel 1.2 → „Pedalcharakteristik“, „Bremscharakteristik“

„01b-entkoppelte BA mit Rekuperation“ Die Charakteristik (vgl. Bild 103) wurde so manipuliert, dass abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit ein zusätzliches Bremsmoment überlagert wurde. Mit dem Verlauf des überlagerten Bremsmoments wurde qualitativ das drehzahlabhängige Generatormoment eines Hybridfahrzeugs nachgebildet. Die maximale resultierende überlagerte Fahrzeugverzögerung lag bei  $0,8 \text{ m/s}^2$  (Bild 104). Auf diese Weise sollte das Bremsverhalten eines Fahrzeugs mit *rekuperativer gekoppelter Bremsanlage* simuliert werden. Mit dieser Charakteristik soll überprüft werden, ob die nicht kompensierte Zusatzverzögerung in dieser Ausprägung vom Fahrer als störend wahrgenommen wird.

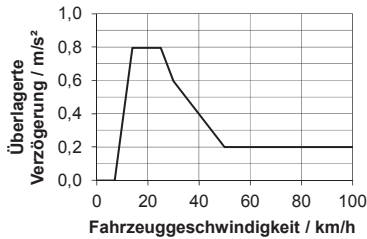


Bild 104: Auf die Basischarakteristik in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit überlagerte Verzögerungswirkung

„01c-entkoppelte BA mit Verblendungsfehler  $+0,8 \text{ m/s}^2$ “ Die Charakteristik (vgl. Bild 103) wurde so manipuliert, dass abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit ein zusätzliches Bremsmoment überlagert wurde. Mit dem Verlauf des überlagerten Bremsmoments soll ein Fehler beim Verblenden zwischen der Reibbremswirkung und der generatorischen Bremswirkung simuliert werden. Die maximale resultierende überlagerte Fahrzeugverzögerung lag bei  $0,8 \text{ m/s}^2$  (Bild 105). Mit dieser Charakteristik soll überprüft werden, in welchem Maße Unstetigkeiten in der Gesamt-Fahrzeugverzögerung vom Fahrer wahrgenommen werden.

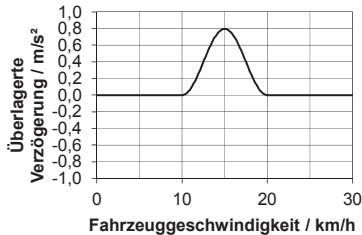


Bild 105: Auf die Basischarakteristik in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit überlagerte Verzögerungswirkung



„01d-entkoppelte BA mit Verblendungsfehler  $-0,8 \text{ m/s}^2$ “ Die Charakteristik (vgl. Bild 103) wurde so manipuliert, dass abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit das Bremsmoment um einen bestimmten Anteil reduziert wurde. Mit dem Verlauf des überlagerten Bremsmoments soll ebenfalls ein Fehler beim Verblenden zwischen der Reibbremswirkung und der generatorischen Bremswirkung simuliert werden. Die Fahrzeugverzögerung wurde so um maximal  $0,8 \text{ m/s}^2$  reduziert (Bild 106).

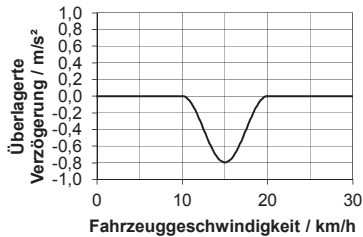


Bild 106: Auf die Basischarakteristik in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit überlagerte Verzögerungswirkung

„02-entkoppelte BA, F-Sprung“ Die Charakteristik (Bild 107) wurde so gestaltet, dass die Pedalkraft nach Überschreitung des *Totwegs* (bei  $s=10 \text{ mm}$ ) nahezu sprunghaft um einen kleinen Betrag erhöht wurde. Das heißt, erst mit dem Einsetzen des Kraftsprungs steigt die Fahrzeugverzögerung signifikant an. Mit dieser Charakteristik soll überprüft werden, ob dem Fahrer auf diese Weise eine haptische Hilfestellung zur besseren Verzögerungsmodulation gegeben werden kann.

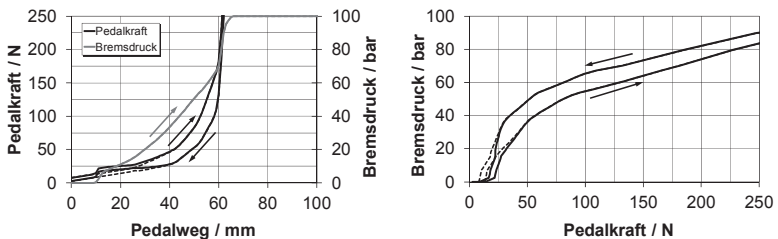


Bild 107: Charakteristik „02-entkoppelte BA, F-Sprung“ (gestrichelte Kurven: Basischarakteristik „01a-entkoppelte BA“)

„03-entkoppelte BA, kürzere Pedalwege“ Die Charakteristik (Bild 108) wurde so angepasst, dass der Pedalweg um 25 % kürzer ausfällt. Entsprechend wurden auch der *Totweg* und der *Leerweg* um 25 % verkürzt. Der Zusammenhang  $b=f(F)$  wurde nicht verändert. Mit dieser Charakteristik soll überprüft werden, wie der Fahrer auf ein noch kürzeres Pedalwegniveau als bei der Basischarakteristik reagiert.

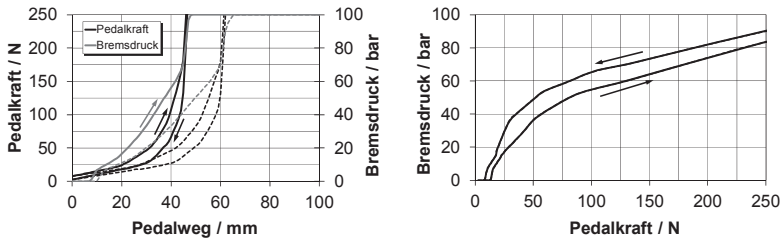


Bild 108: Charakteristik „03-entkoppelte BA, kürzere Pedalwege“  
(gestrichelte Kurven: Basischarakteristik „01a-entkoppelte BA“)

„04-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ Die Charakteristik (Bild 109) wurde so angepasst, dass der Pedalweg um 25 % länger ausfällt. Entsprechend wurden auch der *Totweg* und der *Leerweg* um 25 % verlängert. Der Zusammenhang  $b=f(F)$  wurde nicht verändert. Mit dieser Charakteristik soll überprüft werden, wie der Fahrer auf eine Erhöhung des relativ geringen Pedalwegniveaus der Basischarakteristik reagiert.

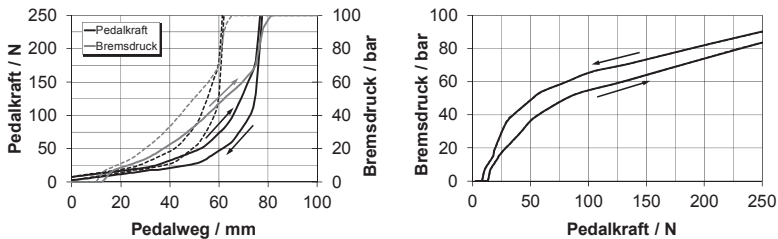


Bild 109: Charakteristik „04-entkoppelte BA, längere Pedalwege“  
(gestrichelte Kurven: Basischarakteristik „01a-entkoppelte BA“)

„05-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ Die Charakteristik (Bild 110) wurde so angepasst, dass der Pedalweg, jedoch nur bezogen auf die Pedalkraft, um 25 % länger ausfällt. Der Zusammenhang  $b=f(s)$  wurde nicht verändert. Entsprechend fiel nun der Gradient  $db/dF$  steiler aus.

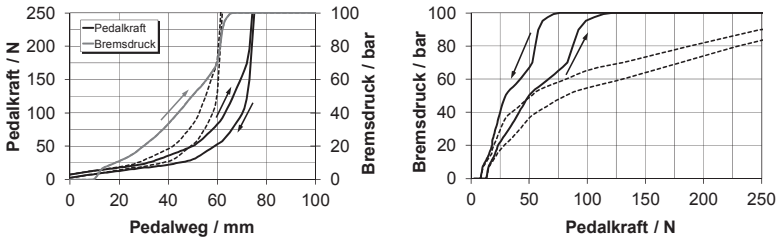


Bild 110: Charakteristik „05-entkoppelte BA, längere Pedalwege“  
(gestrichelte Kurven: Basischarakteristik „01a-entkoppelte BA“)

„06-entkoppelte BA, höhere Losbrechkraft und flacherer Leerwegverlauf“ Die Charakteristik (Bild 111) wurde so angepasst, dass die *Losbrechkraft* von 7 N auf 15 N angehoben wurde. Gleichzeitig wurde im *Leerwegbereich* der Gradient  $dF/ds$  verringert. Der Zusammenhang  $b=f(s)$  wurde nicht verändert. Mit dieser Charakteristik sollte der Einfluss der ungewöhnlich geringen *Losbrechkraft* und des ungewöhnlich steifen *Leerweggradienten* der Basischarakteristik auf die Wertung des Fahrers überprüft werden.

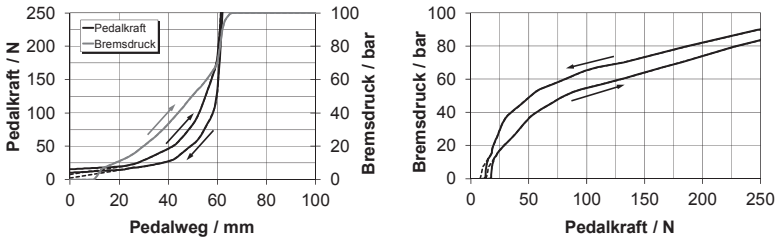


Bild 111: Charakteristik „06-entkoppelte BA, höhere Losbrechkraft und flacherer Leerwegverlauf“  
(gestrichelte Kurven: Basischarakteristik „01a-entkoppelte BA“)

„07-entkoppelte BA, modifizierte Kraft-Hysterese“ Die Charakteristik (Bild 112) wurde so angepasst, dass das Verhältnis zwischen der Pedalkraft „in Betätigungsrichtung“ und dem Betrag der *statischen Kraft-Hysterese* im Zusammenhang  $F=f(s)$  über den kompletten Pedalwegbereich konstant war. Der Zusammenhang zwischen der Pedalkraft „in Betätigungsrichtung“ und dem Pedalweg wurde dabei nicht verändert. Der Zusammenhang  $b=f(s)$  wurde ebenfalls konstant gehalten. Bezüglich Pedalweg und Fahrzeugverzögerung verringerte sich die Pedalkraft zwangsläufig „in Löserichtung“ jeweils signifikant. Mit dieser Charakteristik sollte der Einfluss der ungewöhnlich geringen *statischen Kraft-Hysterese* der Basischarakteristik auf die Wertung des Fahrers überprüft werden.

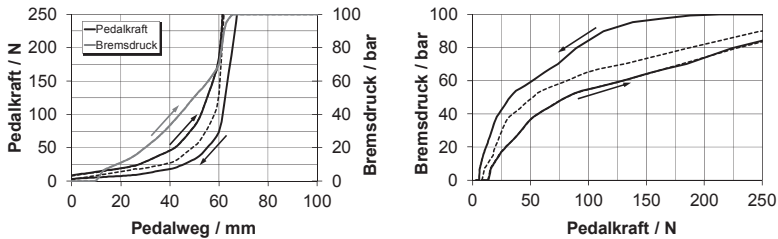


Bild 112: Charakteristik „07-entkoppelte BA, modifizierte Kraft-Hysterese“  
(gestrichelte Kurven: Basischarakteristik „01a-entkoppelte BA“)

„08-gekoppelte BA“ Diese Charakteristik (Bild 113) wurde gewählt, um die originale und die modifizierten Hybridfahrzeug-Charakteristiken mit der Charakteristik einer konventionellen *gekoppelten Bremsanlage* zu vergleichen. Hierfür wurde die Seriencharakteristik eines mit dem verwendeten Versuchsträger vergleichbaren Fahrzeugs gewählt.

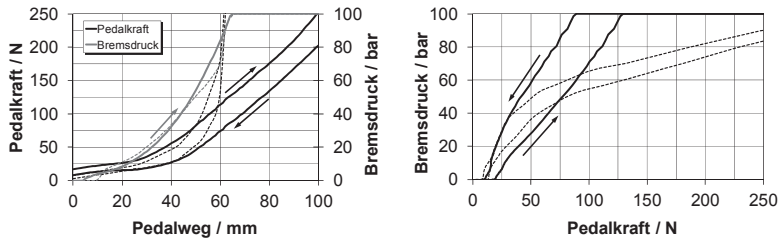


Bild 113: Charakteristik „08-gekoppelte BA“  
(gestrichelte Kurven: Basischarakteristik „01a-entkoppelte BA“)

## 5.2.2 Ablauf

Die Versuche fanden im Stadtverkehr von Ilmenau statt (Bild A17, S. 151). Die Versuchsstrecke umfasste Abschnitte mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h, 50 km/h und 70 km/h sowie Parkiersituationen und hatte eine Länge von ca. 5 km. Mit jeder zu bewertenden Charakteristik war die Versuchsstrecke einmal komplett abzufahren. Anschließend war die soeben gefahrene Charakteristik vom Probanden (Tabelle A4, S. 151) absolut zu bewerten (Bild A18 S. 153). Die Charakteristiken wurden in randomisierter Reihenfolge gefahren.

## 5.2.3 Ergebnisse

**Überblick** Tabelle 9 zeigt die Zusammenfassung der Bewertungen für alle abgeprüften Charakteristiken<sup>82</sup>.

Interpretation	1=sehr schlecht 7=sehr gut		1=hoch/lang 7=gering/kurz		1=s.schl. 0=nein 7=s. gut 1=ja		0=s.schl. 1=s. gut	
	Sicherheit	Komfort	Gesamt.	Kraft.	Weg.	Dosierb.	Akzept.	Normiert
01a-entkoppelte BA	5,8	5,6	5,2	5,0	4,2	5,0	0,5	0,70
01b-entkoppelte BA mit Rekuperation	4,2	3,0	2,4	5,4	4,2	2,4	0,0	0,29
01c-entk. BA m. Verblendungsfehler +0,8 m/s <sup>2</sup>	5,0	4,1	3,4	4,9	4,5	2,9	0,1	0,42
01d-entk. BA m. Verblendungsfehler -0,8 m/s <sup>2</sup>	4,9	4,3	3,9	4,5	4,3	3,8	0,3	0,49
02-entkoppelte BA, F-Sprung	5,8	4,8	5,2	4,0	3,8	4,8	0,4	0,64
03-entkoppelte BA, kürzere Pedalwege	5,8	5,1	5,1	4,3	5,7	4,6	0,5	0,68
04-entkoppelte BA, längere Pedalwege	4,6	3,8	3,6	5,6	2,4	3,4	0,0	0,39
05-entkoppelte BA, längere Pedalwege	5,9	5,6	5,1	5,1	4,4	5,3	0,4	0,67
06-entk. BA, Losbrechkraft und Leerwegverlauf	5,8	5,5	5,2	5,3	4,3	5,0	0,5	0,70
07-entk. BA, modifizierte Kraft-Hysterese	5,8	5,8	5,5	5,1	4,5	5,2	0,6	0,74
08-gekoppelte BA	5,6	5,3	5,3	4,3	3,8	5,3	0,6	0,71

Tabelle 9: Bewertung der Charakteristiken - Mittelwerte der Subjektivurteile aller Probanden

Am besten<sup>83</sup> beurteilt wurden die Charakteristiken:

- „07-entkoppelte BA, modifizierte Kraft-Hysterese“
- „08-gekoppelte BA“
- „01a-entkoppelte BA“
- „06-entkoppelte BA, höhere Losbrechkraft und flacherer Leerwegverlauf“

Ebenso haben auch die folgenden Charakteristiken noch überwiegend das Prädikat „akzeptabel“ bei gleichzeitig gutem Gesamteindruck erhalten:

<sup>82</sup> Das Kriterium „Normiert“ ergibt sich rechnerisch aus den gewichteten Mittelwerten der Einzelkriterien mit folgenden Wichtungsfaktoren: „Sicherheitseindruck“ → 1, „Komforteindruck“ → 1, „Gesamteindruck“ → 2, „Dosierbarkeit“ → 1, „Akzeptanz f. d. eigene Fahrzeug“ → 2. Die Einzelkriterien „Kraftaufwand“ und „Wegniveau“ gehen nicht in die Berechnung des Kriteriums „Normiert“ ein.

<sup>83</sup> Beginnend mit der Charakteristik mit der höchsten Wertung im rechnerisch ermittelten Kriterium „Normiert“ (Tabelle 9)

- „03-entkoppelte BA, kürzere Pedalwege“
- „05-entkoppelte BA, längere Pedalwege“
- „02-entkoppelte BA, F-Sprung“

Eindeutig schlechte Wertungen erhielten folgende Charakteristiken:

- „01d-entkoppelte BA mit Verblendungsfehler  $-0,8 \text{ m/s}^{2c}$ “
- „01c-entkoppelte BA mit Verblendungsfehler  $+0,8 \text{ m/s}^{2c}$ “
- „04-entkoppelte BA, längere Pedalwege“
- „01b-entkoppelte BA mit Rekuperation“

**Kraft-Hysterese** Die Basischarakteristik selbst („01a-entkoppelte BA“) wird bereits vergleichsweise gut bewertet. Die Variante „07-entkoppelte BA, modifizierte Kraft-Hysterese“ erreicht noch etwas bessere Bewertungen. Ein Mindestmaß an statischer Kraft-Hysterese scheint für ein hohes Maß an Komfort- und Sicherheitsempfinden erforderlich zu sein. Die Charakteristik „08-gekoppelte BA“ (Bild 113 links, S. 96) schneidet im Vergleich bei den Kriterien Dosierbarkeit, Gesamtbewertung und Akzeptanz etwas besser als die Basischarakteristik ab. Diese hat mit der ebenfalls sehr guten Charakteristik „07-entkoppelte BA, modifizierte Kraft-Hysterese“ (Bild 112 links, S. 96) den ähnlichen Hystereseverlauf<sup>84</sup> gemein. Die Charakteristiken „07-entkoppelte BA, modifizierte Kraft-Hysterese“ und „08-gekoppelte BA“ unterscheiden sich jedoch signifikant im F-s- und im b-F-Gradienten. So sind bei Charakteristik „08-gekoppelte BA“ deutlich geringere Pedalkräfte notwendig, um hohe Fahrzeugverzögerungen zu realisieren.

**Rekuperation / Verblendungsfehler** Das sehr schlechte Abschneiden der Charakteristik „01b-entkoppelte BA mit Rekuperation“ korreliert mit den Ergebnissen aus den Grundsatzuntersuchungen zu Fühlbarkeitsschwellen (siehe Kap. 5.1.3). Eine Aufprägung von bis zu  $0,8 \text{ m/s}^2$  Fahrzeugverzögerung im Geschwindigkeitsbereich von 8 km/h bis 25 km/h (vgl. Bild 104, S. 92), mit einer kurzen Änderungszeit liegt im Bereich der Störungen, die in Kapitel 5.1.3 als auffällig bzw. sehr auffällig bewertet wurden. Nicht oder kaum spürbar wurde eine solche Aufprägung erst bei einer Änderungszeit von ca. 5 s, welche hier jedoch deutlich unterschritten wurde. Für das schlechte Abschneiden der Charakteristiken „01c-entkoppelte BA mit Verblendungsfehler  $+0,8 \text{ m/s}^{2c}$ “ und „01d-entkoppelte BA mit Verblendungsfehler  $-0,8 \text{ m/s}^{2c}$ “ kann grundsätzlich die gleiche Begründung gegeben werden. Die Charakteristiken, bei denen während der simulierten Rekuperation eine Erhöhung der Fahrzeugverzögerung stattfindet, werden fast ausnahmslos als nicht akzeptabel eingestuft. Dies deckt sich ebenfalls mit den Ergebnissen aus Kapitel 5.1.3.

<sup>84</sup> größere Pedalkraft-Hysterese als bei der Basischarakteristik, Hysterese nimmt zu höheren Pedalwegen hin deutlich zu, vgl. Bild 112 (S. 96) und Bild 113 (S. 96)

**Pedalwegniveau** Die Frage nach dem Pedalwegniveau wird für die Charakteristik „03-entkoppelte BA, kürzere Pedalwege“ (Bild 108, S. 94) mit „kurz“ und für die Charakteristik „04-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ (Bild 109, S. 94) mit „lang“ beantwortet. Diese Beurteilungen waren so zu erwarten. Die Charakteristik „04-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ wird hierbei in der Gesamtbeurteilung ausnahmslos als nicht akzeptabel eingestuft. Im ersten Moment widersprüchlich erscheinend wird die Frage nach dem Pedalwegniveau für die Charakteristik „05-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ (Bild 110, S. 95) neutral mit leichter Tendenz zur Antwort „eher kurz“ beantwortet. Die F-s-Zusammenhänge der Charakteristiken „04-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ und „05-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ sind identisch. Die p-s-Zusammenhänge unterscheiden sich jedoch. Während dieser bei Charakteristik „05-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ der Basischarakteristik „01a-entkoppelte BA“ entspricht, sind bei Charakteristik „04-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ größere Pedalwege zur Fahrzeugverzögerung nötig. Dafür wurde bei Charakteristik „04-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ im Vergleich zur Basischarakteristik der p-F-Zusammenhang unverändert gelassen. Für die Bewertung des Pedalwegniveaus spielt demzufolge primär die mit dem gegebenen Pedalweg erreichbare Fahrzeugverzögerung eine Rolle<sup>85</sup>.

**Pedalkraftaufwand** Die Frage nach dem Pedalkraftaufwand wird für Charakteristik „04-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ tendenziell mit „gering“ beantwortet. Damit ist für diese Charakteristik subjektiv der geringste Kraftaufwand erforderlich. Im Vergleich zur Basischarakteristik fällt der Gradient  $dF/ds$  tatsächlich geringer aus (Bild 109 links, S. 94). Der Gradient  $dp/dF$  ist identisch mit der Basischarakteristik (Bild 109 rechts, S. 94). Die Charakteristik „05-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ verfügt aber über den gleichen geringen  $dF/ds$ -Gradienten und zusätzlich auch noch über ein deutlich geringeres verzögerungsbezogenes Kraftniveau (Bild 110, S. 95). Trotzdem wird der Pedalkraftaufwand hier etwas höher als bei Charakteristik „04-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ beurteilt. Möglicherweise führt das längere verzögerungsbezogene Wegniveau von Charakteristik „04-entkoppelte BA, längere Pedalwege“ zu dieser Wertung.

**Losbrechkraft und Leerweggradient** Im Rahmen dieser Versuchsreihe konnten keine Anhaltspunkte dafür gefunden werden, dass die Erhöhung der *Losbrechkraft* bei gleichzeitiger Absenkung des Leerweggradienten<sup>86</sup> in einer besseren Beurteilung resultiert. Die Bewertungen fallen für die Charakteristiken „06-entkoppelte BA, höhere Losbrechkraft und flacherer Leerwegverlauf“ und die Basischarakteristik nahezu identisch aus. Die einzige signifikante Abweichung be-

---

<sup>85</sup> Siehe Fußnote 4, S. 6.

<sup>86</sup> Gradient  $dF/ds$  im *Leerwegbereich*

trifft die Frage nach dem Pedalkraftniveau. Hier wird der Variante mit der angehobenen *Losbrechkraft* ein etwas geringeres Pedalkraftniveau attestiert. Der Grund hierfür scheint der flachere Leerweggradient (Bild 111 links, S. 95) zu sein.

**Haptische Informationsvermittlung** Die Charakteristik „02-entkoppelte BA, F-Sprung“ wurde etwas schlechter als die Basischarakteristik hinsichtlich Komforteindruck und Dosierbarkeit, in Summe aber immer noch als gut, bewertet. Das Kraftniveau wurde mit neutral beurteilt und wird damit subjektiv etwas höher wahrgenommen als bei der Basischarakteristik. Die Funktion der haptischen Markierung des Beginns des Bremsdruckaufbaus (Bild 107, S. 93) wurde in dieser Versuchsreihe von den Probanden nicht honoriert. Es lässt sich in diesem Rahmen nicht abschließend klären, ob eine solche Funktion generell nicht für den Einsatz im Fahrzeug geeignet ist oder ob lediglich die in dieser Versuchsreihe abgedeckten Verkehrssituationen nicht davon profitieren.



## 6 Gekoppelte Bremsanlagen ohne Rekuperation - MMS und Parameterstabilität

In den Kapiteln 4 („Entkoppelte Bremsanlagen“) und 5 („Probandenfahrversuche zu Fühlbarkeits- und Akzeptanzschwellen“) ist auch auf die veränderliche *Pedal-* und *Bremscharakteristik* bei Fahrzeugen mit *rekuperativen* und *kooperativen Bremsanlagen* eingegangen worden. Beim rekuperativen Bremsen kann es zu Unstetigkeiten im Verzögerungsverlauf kommen. Solche Abweichungen können reproduzierbar bei jedem Bremsvorgang oder aber unterschiedlich zwischen verschiedenen Bremsvorgängen, z. B. abhängig vom Ladezustand (SOC) des Akkumulators, auftreten.

Auch die *Pedal-* und die *Bremscharakteristik* von aktuellen Fahrzeugen mit *gekoppelter* vakuumverstärkter hydraulischer Bremsanlage (Bild 114) stellt keinen statischen Zustand dar. Die Ursachen sind jedoch andere als bei Fahrzeugen mit *rekuperativen* und *kooperativen Bremsanlagen*.

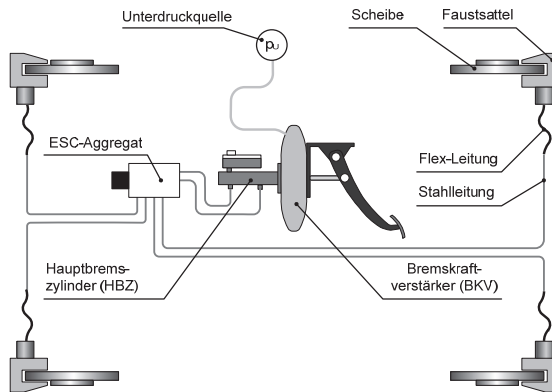


Bild 114: Schematischer Aufbau einer *gekoppelten* vakuumverstärkten hydraulischen Pkw-Bremsanlage; nach [80]

Ausgewählte, praktisch relevante, Eigenschaften der *Pedal-* und *Bremscharakteristik* von Pkws mit *gekoppelter* nicht-*rekuperativer* Bremsanlage bzw. deren Veränderlichkeit sollen in diesem Kapitel analysiert und hier nach folgenden Kriterien unterschieden werden:

Reversibilität

Merkmal	Beschreibung
reversibel	Eigenschaft nimmt nach Wegfall des Änderungsgrunds wieder ihren Ursprungszustand ein Ursache z. B.: temperaturabhängige Viskosität der Bremsflüssigkeit
nicht reversibel	Eigenschaft nimmt nach Wegfall des Änderungsgrunds nicht wieder ihren Ursprungszustand ein Ursache z. B.: Verschleiß von Bremsbelägen und Brems scheiben

Tabelle 10: Definition: Reversibilität der Eigenschaften

Änderungsgeschwindigkeit

Merkmal	Beschreibung
schnelle Vorgänge	Eigenschaftsänderung innerhalb eines Bremsvorgangs oder während weniger aufeinanderfolgender Bremsvorgänge Ursache z. B.: Temperatureinfluss auf Reibwert oder Kompressibilität
langsame Vorgänge	Eigenschaftsänderung über Zeitraum von Jahren (z. B.: Alterung von Kunststoffen) oder mehreren Tausend Kilometern (z. B.: Verschleiß von Bremsbelägen und Brems scheiben)

Tabelle 11: Definition: Änderungsgeschwindigkeit der Eigenschaften

Diese Effekte sind nur schwierig voneinander zu trennen. Eine jeweils isolierte Betrachtung potenzieller Einflussmöglichkeiten erscheint daher hilfreich. Nachfolgend wird exemplarisch an einem  $V_{an}^{87}$  experimentell analysiert, welcher Art - qualitativ wie quantitativ - die *schnellen* Eigenschaftsänderungen und welche die Ursachen dafür sind. Sofern nicht anders angegeben, wurden die Messungen unter Zuhilfenahme einer Pedalbetätigungsautomatik [72], [80] durchgeführt. Die Bremsanlage wurde während der Messungen nicht baulich verändert. Lediglich die Bremsbeläge wurden variiert, indem ein Teil der Untersuchungen mit neuen<sup>88</sup> und ein Teil mit teilverschlissenen<sup>89</sup> Belägen durchgeführt wurde. Die Ergebnisse geben Hinweise darauf, wie groß die Abweichungen von der konstruktiv vorgesehenen *Pedal-* und *Bremscharakteristik* im täglichen Fahrbetrieb ausfallen können. Einflüsse von Fertigungstoleranzen und von Alterungseffekten wurden nicht betrachtet.

<sup>87</sup> Serienmäßig ausgerüstet mit vier Fauntsattel-Scheibenbremsen

<sup>88</sup> Unmittelbar vor der Durchführung der Messreihe wurden die vorhandenen Bremsbeläge gegen einen Satz neuer Bremsbeläge getauscht. Im Verlauf der Messreihe „neue Beläge“ wurden diese Beläge jedoch nicht erneut ersetzt, sodass sich der Zustand der Beläge während der Durchführung veränderte (u. a. „Einlaufen“ der Reibpaarungen Scheibe/Belag aufeinander, leichter Verschleiß der Beläge).

<sup>89</sup> Die teilverschlissenen Beläge hatten an der Vorderachse bereits etwa 28 % und an der Hinterachse etwa 37 % ihrer ursprünglichen Belagdicke eingebüßt. An der Vorderachse betrug die Belagdicke noch etwa 8,6 mm von ursprünglich 12 mm, an der Hinterachse noch etwa 5,9 mm von ursprünglich 9,3 mm.

In Bild 115 (links) sind ausgewählte p-s-Zusammenhänge des untersuchten Fahrzeugs dargestellt. Die Messkurven wurden im Laufe eines umfangreichen Prüfprogramms<sup>90</sup> zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgezeichnet. Die dargestellten Kurvenverläufe wurden allesamt unter vergleichbaren Referenzbedingungen aufgenommen<sup>91</sup>. Trotzdem unterscheiden sie sich deutlich voneinander. In Bild 115 (rechts) sind die zugehörigen p-F-Zusammenhänge dargestellt, die im Gegensatz dazu nahezu identische Verläufe aufweisen.

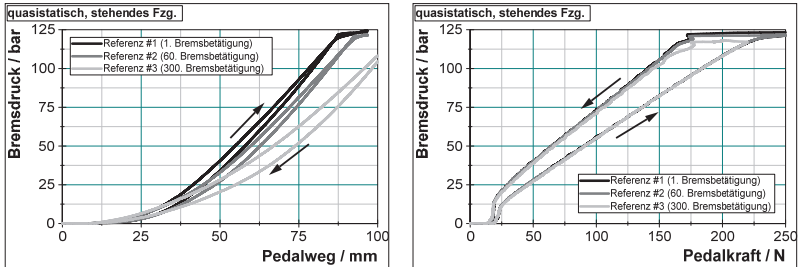


Bild 115: Links: Messung der p-s-Zusammenhänge, rechts: Messung der p-F-Zusammenhänge; zu unterschiedlichen Zeitpunkten eines umfangreichen Prüfprogramms unter vergleichbaren Bedingungen aufgezeichnete Referenzmessungen

In den nachfolgenden Abschnitten werden ausgewählte Effekte am Beispiel dieser Bremsanlage untersucht.

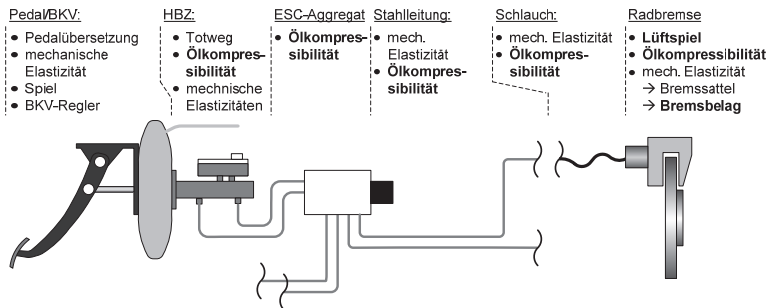
## 6.1 Einflüsse auf den Pedalweg (p-s-Zusammenhang)

### Problembeschreibung

Die Baugruppen der Bremsanlage (Bild 116) sind elastisch und nicht spielfrei. Deshalb ist der Druckaufbau an der Radbremse immer mit einer Volumenaufnahme verbunden. Zusätzlicher Bremsflüssigkeitsbedarf resultiert in zusätzlichem Pedalweg.

<sup>90</sup> Insgesamt >300 unterschiedliche Abbremsvorgänge

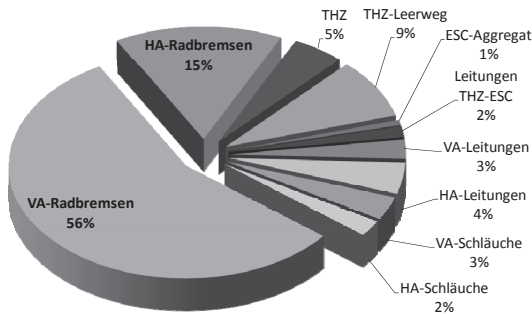
<sup>91</sup> Stehendes Fahrzeug, gleiche Pedalwege und Betätigungsgeschwindigkeiten, Oberflächentemperatur der Bremsscheiben <100 °C



**Fett hervorgehoben:** Parameteränderung während eines Bremsvorgangs oder während weniger aufeinanderfolgender Bremsvorgänge wahrscheinlich

Bild 116: Einflussparameter der Volumenaufnahme; nach [80]

Treten Veränderungen am p-s-Zusammenhang der untersuchten Bremsanlage auf, so müssen sich eine oder mehrere der in Bild 116 dargestellten Einflussparameter (Elastizitäten oder Spiele) verändert haben. In Bild 117 ist die Verteilung der Anteile der Volumenaufnahme für die Bremsanlage eines Kleintransporters<sup>92</sup> dargestellt.



**Fett hervorgehoben:** Parameteränderung während eines Bremsvorgangs oder während weniger aufeinanderfolgender Bremsvorgänge wahrscheinlich

Bild 117: Gemessene Volumenaufnahme<sup>93</sup> einer Transporter-Bremsanlage, Szenario „stehendes Fahrzeug“, am Arbeitspunkt  $p=100$  bar (entspricht etwa  $b=9$  m/s<sup>2</sup> im abgebremsten Fahrzeug)

<sup>92</sup> Fahrzeugklasse N2 nach EG-Richtlinie 70/156/EWG (Nutzfahrzeug mit zulässigem Gesamtgewicht bis zu 12 t)

<sup>93</sup> Am stationären Bremskomponentenprüfstand wurde zuerst die Volumenaufnahme des Komplettsystems, exklusive Spritzwandsteifigkeit, ermittelt. Für die weiteren Messungen wurden sukzessive die einzelnen Bremskomponenten entfernt. Die Volumenaufnahmen der Einzelkomponenten wurden anschließend durch Differenzbildung berechnet.

Die Eigenschaften der fett markierten Baugruppen (Radbremsten inklusive Bremsbeläge und Lüftspiele) können sich typischerweise während eines Bremsvorgangs oder während weniger aufeinanderfolgender Bremsvorgänge ändern - sind also nach Tabelle 11 (S. 102) als vom Typ *schnelle* Vorgänge einzuordnen. Die fett markierten Baugruppen sind in diesem Beispiel<sup>94</sup> für mehr als 70 % der Volumenaufnahme verantwortlich. Eine Änderung an deren Eigenschaften<sup>95</sup> wäre also mit hoher Wahrscheinlichkeit als Änderung im p-s-Zusammenhang der *Bremscharakteristik* messbar.

## Einflüsse

**Konditionierung der Bremsanlage** Zu Beginn jeder Messreihe wurde die Bremsanlage einer Konditionierungsroutine unterzogen. Im Fall der neuen Bremsbeläge dient die Konditionierung dem geometrischen<sup>96</sup> und thermischen Einlauf. In allen anderen Fällen soll durch die Konditionierung ein definierter Ausgangszustand der Bremsanlage generiert werden. Die Konditionieroutine bestand aus 20 Abbremsvorgängen von  $v_{Fzg} \approx 80$  km/h auf 30 km/h mit  $b \approx 0,3$  g. Die Temperatur der Bremsanlage wurde während der kompletten Konditionierprozedur bei  $T_{Scheibe} < 200$  °C gehalten. Ähnliche Routinen sind auch bei Fahrzeugherstellern und Bremszulieferern üblich.

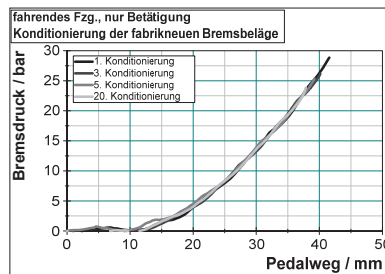


Bild 118: Messung der p-s-Zusammenhänge (nur Betätigung dargestellt)

Wie zu erwarten war, geht vom Einlaufverhalten der Reibpartner (Beläge, Scheibe) kein signifikanter Einfluss auf die Gradienten im p-s-Zusammenhang aus. Die Kompressibilitäten in der Bremsanlage ändern sich also nicht nennenswert. Lediglich der Einfluss unterschiedlicher Lüftspiele zwischen Brems-

<sup>94</sup> Der Anteil der VA-Radbremsten an der Gesamtvolumenaufnahme fällt in diesem Beispiel (Transporter-Bremsanlage) vergleichsweise hoch aus. Ursache sind die für diese Fahrzeugkategorie typischen großen Radbremsen (Radbremskolben) bei gleichzeitig hohen Spannkraften an der Vorderachse. Bei typischen Pkw-Bremsanlagen liegt der Anteil der Volumenaufnahme der Radbremsen an der Gesamtvolumenaufnahme aber immer noch bei etwa 50 % (vgl. [80]).

<sup>95</sup> Steifigkeiten oder Spiele

<sup>96</sup> Anpassung der Oberflächen von Bremsbelag und -scheibe aneinander

belag und Brems­scheibe war messbar. Hier zeichnete sich jedoch kein eindeutiges Bild ab. Für die Darstellung in Bild 118 wurden diese Effekte, die sich in einer Parallelverschiebung der Kurven entlang der „Pedalweg-Achse“ äußern, herausgerechnet.

**Temperatur der Reibpartner** Die folgenden Darstellungen illustrieren den Einfluss der Temperaturen an der Radbremse auf die *Pedal-* und *Bremscharakteristik*. Bei den zugrunde liegenden Fahrmanövern handelt es sich um *Vollbremsungen* mit hoher Betätigungsgeschwindigkeit und -intensität, vergleichbar mit dem AMS-Test<sup>97</sup>. Die Radbremsen werden bei diesen Fahrmanövern sehr stark thermisch beansprucht. Zwischen dem 10. und dem 11. Bremsvorgang wurde solange eine Pause eingefügt, bis die Bremsanlage wieder in etwa auf die Starttemperatur vor der 1. Abbremsung abgekühlt war. Der 1. und der 11. Bremsvorgang wurden bei annähernd kalter Bremse begonnen (Temperatur vor Bremsbeginn:  $T_{\text{Scheibe}} \approx 80 \text{ °C}$  bzw.  $130 \text{ °C}$ ).

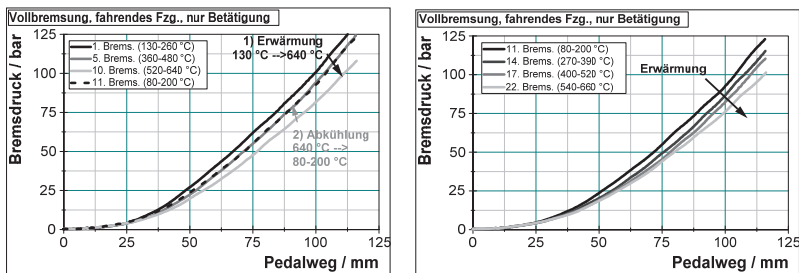


Bild 119: Messung der p-s-Zusammenhänge: Einfluss der Bremsentemperatur beim Bremsmanöver *Vollbremsung* (nur Betätigung dargestellt, Temperatur gemessen an der Vorderachse)

Bezogen auf den Bremsdruck  $p=100 \text{ bar}$  erhöht sich der aufzubringende Pedalweg mit steigender Temperatur um bis zu 12 % (Bild 119 rechts). Nach der Abkühlphase zwischen Bremsvorgang 10 und 11 wird jedoch nicht wieder das Anfangsniveau von Bremsvorgang 1 erreicht (Bild 119 links). Dieser Effekt ist zumindest nicht vollständig reversibel (vgl. Tabelle 10, S. 102).

Die Änderung des erforderlichen Pedalwegs und damit des erforderlichen Volumens an Bremsflüssigkeit bei Erhöhung der Temperatur der Radbremse resultiert nicht aus einem längeren *Ansprechweg*<sup>98</sup>, sondern aus der Änderung des Gradienten  $dp/ds$ . Daraus lässt sich schlussfolgern, dass für die Charakteristikänderung eine veränderliche Kompressibilität bzw. veränderliche Steifigkeiten

<sup>97</sup> Siehe Fußnote 47, S. 51.

<sup>98</sup> Vgl. Bild 3, S. 7

in der Bremsanlage, vermutlich in der Bremsbelagmatrix, verantwortlich ist. KK- und HK-Prüfstandtests<sup>99</sup> mit vergleichbaren Bremsbelägen zeigten Unterschiede in der Kompressibilität in axialer Richtung von bis zu 60  $\mu\text{m}$  (bezogen auf  $\Delta p=95 \text{ bar}$ ). D. h., bei gegebener in tangentialer Richtung in den Belag eingebrachter Kraft lässt sich der heiße Belag um 60  $\mu\text{m}$  mehr komprimieren als der kalte Belag. Umgerechnet auf den Pedalweg der untersuchten Bremsanlage ergäbe das im Vergleich zur kalten Bremse eine Verlängerung des Pedalwegs bei  $T_{\text{Belag}}=400 \text{ }^\circ\text{C}$  um ca.  $s=6 \text{ mm}$ . Bei der in Bild 119 (links) dargestellten Messung beträgt die Verlängerung des Pedalwegs bei einer Temperaturerhöhung von der kalten Bremse („1. Brems.“) auf  $T_{\text{Scheibe,VA,Beginn}} \approx 360 \text{ }^\circ\text{C}$  („5. Brems.“) etwa  $s=4 \text{ mm}$ ; bei der in Bild 119 (rechts) dargestellten Messung bei einer Temperaturerhöhung von der kalten Bremse („11. Brems.“) auf  $T_{\text{Scheibe,VA,Beginn}} \approx 400 \text{ }^\circ\text{C}$  („17. Brems.“) etwa  $s=6 \text{ mm}$ . Die Kompressions-tests am Prüfstand decken sich sehr gut mit den Fahrversuchstest.

Die Tatsache, dass die Steifigkeit der Bremsanlage beim 11. Bremsvorgang geringer ausfällt als beim 1. Bremsvorgang lässt sich möglicherweise damit erklären, dass bei den dem 11. Bremsvorgang vorausgegangenen Abbremsungen mit sehr hohen Brems Scheibentemperaturen oberflächennahe organische Anteile der Belagmatrix verbrannt sind. Dieser Annahme folgend wäre der Bremsbelag nahe der Oberfläche zu einem bestimmten Grad porös (Fehlstellen durch verbrannte organische Anteile) und somit kompressibler geworden.

„Historie“ des Bremsbelags Entscheidend für die Ausprägung der p-s-Charakteristik sind nicht alleine der aktuelle Bremsvorgang, sondern auch die unmittelbar vorhergegangenen Bremsvorgänge.

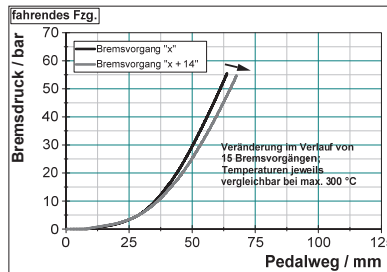


Bild 120: Messung der p-s-Zusammenhänge: Einfluss der Anzahl der Bremsvorgänge beim Bremsmanöver *langsame Bremsbetätigung* (nur Betätigung dargestellt)

<sup>99</sup> Prüfstandtest, bei denen die axiale Kompressibilität der Bremsbeläge bei Raumtemperatur (KK  $\rightarrow$  Kaltkompression) bzw. im Heißzustand (HK  $\rightarrow$  Heißkompression,  $T_{\text{Belag}}=400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ermittelt wird.

In Bild 120 sind die Messkurven des ersten und letzten Bremsvorgangs eines Blocks von 15 vergleichbaren, unmittelbar nacheinander ausgeführten, Bremsungen dargestellt. Die Temperaturen an der Brems Scheibe waren mit  $T_{\text{Scheibe}} \approx 200\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C}$  je Bremsvorgang verhältnismäßig konstant und moderat. Bezogen auf den Bremsdruck  $p=50\text{ bar}$  erhöht sich der aufzubringende Pedalweg im Verlauf der Messungen um bis zu 7 %. Die Wegänderung resultiert auch hier nicht aus einem längeren *Ansprechweg*<sup>100</sup>, sondern aus der Änderung des Gradienten  $dp/ds$ . Auch hier sind vermutlich eine veränderliche Kompressibilität bzw. veränderliche Steifigkeiten - wahrscheinlich in der Belagmatrix - für die Veränderungen verantwortlich.

Eine mögliche Ursache für dieses Phänomen ist in der Tatsache zu suchen, dass sich die radnahen Komponenten der Bremsanlage (Bremsbelag, Bremsattel, Bremsflüssigkeit) nur mit einer vergleichsweise hohen Zeitkonstante durchheizen. Während also die mittlere Temperatur der Brems Scheibe bei allen betrachteten Bremsvorgängen näherungsweise konstant geblieben ist, sind die Bremsbeläge zunächst nur an der der Brems Scheibe zugewandten Oberfläche heiß. Diese isolierende Eigenschaft des Bremsbelags ist gewollt, da es das Ziel sein muss, die bei der Reibung entstehende Temperatur möglichst von der Bremsflüssigkeit und den Dichtmanschetten fernzuhalten. Der nur oberflächennah heiße Bremsbelag wird eine andere, vermutlich höhere, Steifigkeit aufweisen als der nach mehreren aufeinanderfolgenden Bremsmanövern durchgängig heiße Bremsbelag.

## 6.2 Einflüsse auf die Pedalkraft (p-F-Zusammenhang)

### Problembeschreibung

Der Zusammenhang zwischen Pedalkraft und Bremsdruck wird nahezu ausschließlich von der mechanischen Übersetzung im Pedalwerk, von der Verstärkungscharakteristik des BKV und von den Kolbenflächen im THZ bestimmt. Weiterhin müssen noch Wirkungsgradverluste durch Reibung und Rückstellfedern im Pedalwerk, im BKV und im THZ berücksichtigt werden. Es ist nicht zu vermuten, dass diese Zusammenhänge *schnellen* Veränderungen im Sinne der Tabelle 11 unterworfen sind. Nachfolgend wird dies überprüft.

### Einflussbetrachtung

**Temperatur der Reibpartner** Die Oberflächentemperatur der Brems Scheibe hat erwartungsgemäß keinen signifikanten Einfluss auf den p-F-Zusammenhang (Bild 121).

---

<sup>100</sup> Vgl. Bild 3, S. 7



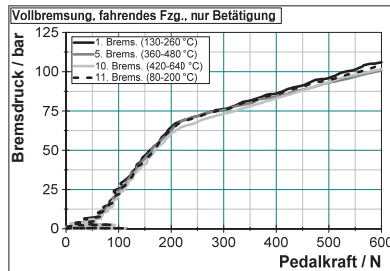


Bild 121: Messung der p-F-Zusammenhänge: Einfluss der Bremsentemperatur beim Bremsmanöver *Vollbremsung* (nur Betätigung dargestellt, Temperatur gemessen an der Vorderachse)

„**Historie**“ des Bremsbelags Auch mehrere vergleichbare, unmittelbar nacheinander ausgeführte, Bremsvorgänge ( $T_{\text{Scheibe,VA}} \approx 200\text{-}350\text{ °C}$ ) verändern den p-F-Zusammenhang nicht signifikant (Bild 122).

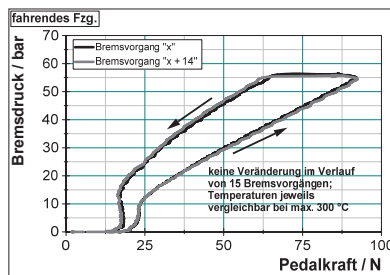


Bild 122: Messung der p-F-Zusammenhänge: Einfluss der Anzahl der Bremsvorgänge beim Bremsmanöver *langsame Bremsbetätigung*

### 6.3 Einflüsse auf die Fahrzeugverzögerung (p-b-Zusammenhang)

#### Problembeschreibung

Der Bremsdruck  $p$  wird an den Bremskolben der Faustsattel-Scheibenbremsen in eine mechanische Spannkraft  $F_{\text{Sp}}$  umgesetzt, die die Bremsbeläge gegen den Reibpartner (in diesem Fall eine Bremsscheibe) drückt. Unter Vernachlässigung von Reib- und Rückstellkräften<sup>101</sup> gilt:

$$F_{\text{Sp}} = p \cdot A_K \quad \text{Gl. 2}$$

<sup>101</sup> Insbesondere der Rückstellkräfte der die Bremskolben abdichtenden elastisch verformbaren Dichtringe

Das sich einstellende Bremsmoment  $M$  ist abhängig von der Spannkraft  $F_{sp}$ , dem Reibwert  $\mu$  zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe und dem mittleren Reibradius  $r_m$ .

$$M = 2 \cdot \mu \cdot F_{sp} \cdot r_m \quad \text{Gl. 3}$$

Das Bremsmoment wird über die Felge auf den Reifen übertragen. In Abhängigkeit vom Kraftschlussbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn und von den Radlasten stellt sich die Fahrzeugverzögerung in Fahrzeuggängsrichtung ein.

Von den hier aufgeführten Parametern mit Einfluss auf den p-b-Zusammenhang ändern sich innerhalb einer Abbremsung oder während weniger aufeinanderfolgender Bremsvorgänge mit großer Wahrscheinlichkeit folgende:

- Reibwert  $\mu$  zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe
- mittlerer Reibradius  $r_m$
- Kraftschlussbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn in Fahrzeuggängsrichtung

Der Kraftschlussbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn sollen hier nicht näher untersucht werden. Dieser ist beim Bremsvorgang eine Funktion des Bremschlupfs zwischen Reifen und Fahrbahn und weiterhin abhängig vom Reifen und von der Fahrbahnoberfläche. Der mittlere Reibradius  $r_m$  ist grundsätzlich konstruktiv vorgegeben<sup>102</sup>, kann aber in gewissen Grenzen, auch innerhalb einer Radumdrehung, variieren. Gründe hierfür sind z. B. ungleichmäßig anliegende Bremsbeläge und über den Bremsscheibenumfang und die Bremsbelagfläche verteilt unterschiedliche Reibwerte. Für die folgenden Betrachtungen soll der mittlere Reibradius  $r_m$  als konstant angenommen werden. Auf Änderungen des mittleren Reibradius zurückzuführende Änderungen werden so vereinfachend dem Reibwert  $\mu$  zugerechnet. In der industriellen Praxis wird diese Vorgehensweise mangels praxistauglicher Möglichkeiten zur Bestimmung des tatsächlichen Reibradiuses  $r_m$  häufig gewählt.

## Einflüsse

**Konditionierung der Bremsanlage - neue Beläge** Bei den neuen Bremsbelägen ist ein deutlicher Einlaufvorgang während der ersten Bremsvorgänge messbar. Bild 123 zeigt den Effekt der unterschiedlichen, sich einstellenden, Reibwerte  $\mu$  zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe anhand der sich ändernden db/dp-Gradienten des abgebremsten Fahrzeugs. Bild 124 zeigt, dass der

<sup>102</sup> Geometrische Orte des Bremskolbens und des Bremsbelags in Relation zur Bremsscheibe

Effekt des größer werdenden Reibwerts mit einer vergleichbaren Bremsanlage am Schwungmassenprüfstand qualitativ reproduzierbar ist.

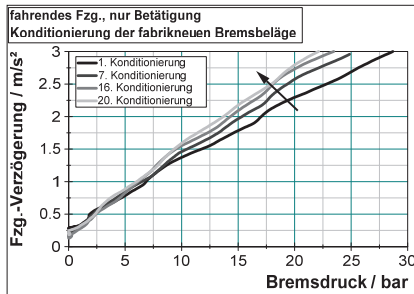


Bild 123: Messung der b-p-Zusammenhänge: Einfluss der Konditionierungsroutine (nur Betätigung dargestellt)

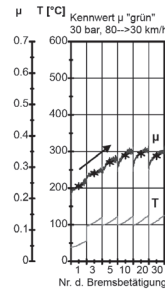


Bild 124: Kennwertermittlung  $\mu$  Grün nach AK Master-Prozedur (vergleichbar mit Konditionierungsroutine)

Während des Einlaufvorgangs muss sich zunächst die sogenannte Reibschicht aus dem organisch gebundenen Reibwerkstoff ausbilden. Im reibflächennahen Bereich verändert sich dabei der Reibwerkstoff chemisch und physikalisch. Zusätzlich kommt es zu einer Werkstoffübertragung von dem metallischen Reibkörper in den organisch gebundenen Reibwerkstoff. [51]

**Konditionierung der Bremsanlage - teilverschlissene Beläge** Der b-p-Zusammenhang ändert sich während der Konditionerroutine (geringe Verzögerung und Bremsscheibentemperatur) nicht signifikant (Bild 125). Es herrscht offenbar bereits ein stabiler Zustand in der Reibschicht vor. D. h., Auf- und Abbau der Reibschicht stehen im Gleichgewicht [51].

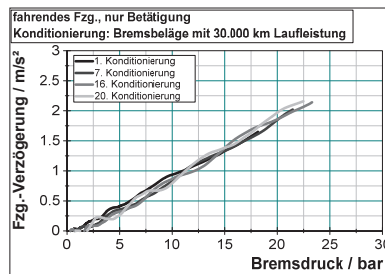


Bild 125: Messung der b-p-Zusammenhänge: Einfluss der Konditionierungsroutine (nur Betätigung dargestellt)

**Temperatur der Reibpartner** Unter Temperatureinfluss (Erhöhung der Bremsentemperatur auf bis zu  $T_{\text{Scheibe,VA}} \approx 400 \text{ °C}$ ) steigt der Reibwert beim

untersuchten Fahrzeug zunächst an, was sich in der Erhöhung des Gradienten  $db/dp$  äußert (Bild 126: „11. Brems.“, „14. Brems.“). Es baut sich offensichtlich während des Bremsprozesses eine Reibschicht auf [51]. Bei etwa 400-500 °C Brems Scheibentemperatur herrscht in der Reibschicht der untersuchten Bremsanlage vermutlich ein stabiler Zustand (Bild 126: „14. Brems.“, „17. Brems.“); „[...] d. h. daß der Aufbau und der Abbau der Schicht über der gesamten Bremszeit im Gleichgewicht stehen [...]“ [51]. Der Reibwert bleibt annähernd konstant. Mit weiterer Erhöhung der Temperatur auf  $T_{Scheibe,VA} > 600$  °C (Bild 126: „22. Brems.“) sinkt das Reibwertniveau wieder nahezu auf das Anfangsniveau ab. „[...] Daraus läßt sich schließen, daß in dieser Phase höchster Belastung der Verschleiß des Reibwerkstoffs so groß ist, daß sich keine funktionstüchtige Reibschicht mehr bilden kann [...]“ [51]. In [16] und [50] wird dieses Verhalten bestätigt.

In Bild 127 sind für die gleichen Bremsmanöver die b-s-Zusammenhänge dargestellt. Bild 119 (rechts, S. 106) zeigt die dazugehörigen p-s-Zusammenhänge. Bild 127 ist zu entnehmen, dass sich für die hier dargestellte Situation die Effekte von veränderlicher Volumenaufnahme und veränderlichem Reibwert bis zu  $T_{Scheibe,VA} \approx 400$  °C („11. Brems.“, „14. Brems.“, „17. Brems.“) aufzuheben scheinen. Die b-s-Zusammenhänge bleiben nahezu konstant. Erst, wenn der Reibwert oberhalb 400 °C Scheibentemperatur („22. Brems.“) wieder abfällt, addieren sich beide Effekte und der zur Fahrzeugverzögerung erforderliche Pedalweg steigt signifikant an.

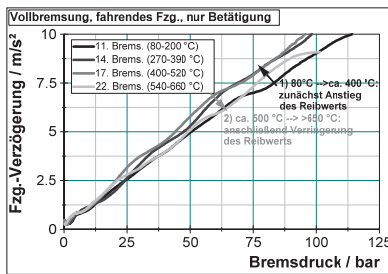


Bild 126: Messung der b-p-Zusammenhänge: Einfluss der Bremsentemperatur beim Bremsmanöver *Vollbremsung* (nur Betätigung dargestellt, Temperatur gemessen an der Vorderachse)

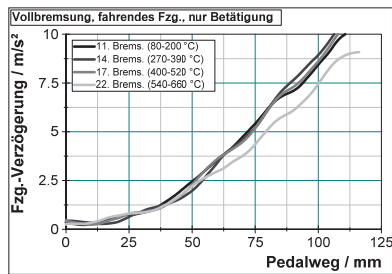


Bild 127: Messung der b-s-Zusammenhänge: Einfluss der Bremsentemperatur beim Bremsmanöver *Vollbremsung* (nur Betätigung dargestellt, Temperatur gemessen an der Vorderachse)

## 7 Empfehlungen für die Auslegung von entkoppelten Bremsanlagen

Aus den in den vorangegangenen Kapiteln zusammengetragenen Erkenntnissen sollen in diesem Kapitel Empfehlungen für die Auslegung von Bremsanlagen abgeleitet werden. Die Empfehlungen sind grundsätzlich allgemeingültig für die MMS der *Betriebs-Bremsanlagen* von Pkw, werden aber hinsichtlich Relevanz und konzeptioneller Details mit Schwerpunkt auf *entkoppelte Bremsanlagen*, aber auch auf *rekuperative* und *kooperative Bremsanlagen* formuliert. Eine exakte und allgemeine quantitative Bezifferung gestaltet sich schwierig, weshalb die Empfehlungen in qualitativer Form und vergleichend zu den Merkmalen der untersuchten Bremsanlagen ausgesprochen werden. Die im Folgenden verwendeten Kenngrößen der *Pedal-* und *Bremscharakteristik* sind in Bild 3 (S. 7) definiert.

### Forderungen, den Pedalcharakteristiksimulator betreffend

Die nachfolgend aufgeführten Forderungen betreffen die Gestaltung der *Pedalcharakteristik*<sup>103</sup>. Sie sind im Fall von *entkoppelten Bremsanlagen* über die Gestaltung des Pedalcharakteristiksimulators zu realisieren. Im Fall eines passiven Simulators besteht der Anspruch also in der geschickten Auswahl und Abstimmung von ausschließlich passiven Konstruktionselementen, wie z. B. Schraubenfedern, Elastomerfedern oder hydraulischen Widerständen.

**Statische Kraft-Hysterese** Eine offensichtliche Schwachstelle bei der Pedalcharakteristiksimulation ist die Erzeugung einer authentischen, genügend großen und langzeitstabilen *statischen Kraft-Hysterese* mit ausnahmslos passiven Konstruktionselementen (passive Simulatoren). Grundsätzlich ist eine geringe *Hysterese* wünschenswert. Probandenversuche mit einem Fahrzeug (vgl. Kapitel 5, vgl. Bild 101, S. 86), bei dem sehr geringe *Hysteresen* nachgebildet werden können, haben aber gezeigt, dass ein Mindestmaß erforderlich ist. *Pedalcharakteristiken*, die über eine zu geringe *statische Kraft-Hysterese* verfügen, werden als „synthetisch“ (Kapitel 4.1.1, Kapitel 4.1.2, Kapitel 5.2.3) oder „nervös“ [6] wahrgenommen. Das Maß an erforderlicher minimaler *Hysterese* steigt offenbar mit höheren Pedalkräften und damit i. d. R. auch mit höheren Pedalwegen an.

**Dynamische Kraft-Hysterese** Ebenso wie der *statische* sollte auch der *dynamische Kraft-Hystereseanteil* tendenziell gering ausfallen, aber ebenfalls ein Mindestmaß nicht unterschreiten. Eine Erhöhung der erforderlichen Betätigungskraft in Abhängigkeit von der Betätigungsgeschwindigkeit dient der Kompensation

---

<sup>103</sup> Vgl. Kapitel 1.2 → „Pedalcharakteristik“

von dynamischen Störungen, wie sie durch die Massenträgheit des Bewegungsapparats<sup>104</sup> oder unwillkürliches Muskelzittern<sup>105</sup> in die Bremsanlage eingebracht werden können. Bei typischen *gekoppelten Bremsanlagen* setzt sich der *dynamische Kraft-Hystereseeanteil* zusammen aus einem Anteil, der proportional ist zu der Betätigungsgeschwindigkeit  $v_{\text{Bet}}$ , und einem Anteil, der proportional ist zu  $v_{\text{Bet}}^2$ . Passive Charakteristiksimulatoren aktueller *entkoppelter Bremsanlagen* ahmen diese Eigenschaft jedoch häufig gar nicht nach oder erzeugen mit einfachen hydraulischen Bauteilen lediglich den Anteil, der proportional zu  $v_{\text{Bet}}^2$  ist. Während die vollständige Vernachlässigung der *dynamischen Kraft-Hysteresee* dazu führt, dass die *Pedalcharakteristik* generell zu gering bedämpft ist (vgl. Kapitel 4.1.2), führt der zweite Ansatz lediglich zu einem unbefriedigenden Kompromiss aus zu geringer Bedämpfung bei niedrigen  $v_{\text{Bet}}$  und zu hoher Bedämpfung bei hohen  $v_{\text{Bet}}$ .

Es wird nicht empfohlen, lediglich einen der beiden Hystereseeanteile (*statisch / dynamisch*) bei der Nachbildung zu berücksichtigen. Möglicherweise lässt sich ein zufriedenstellender Kompromiss finden, wenn man bei Vernachlässigung des  $v_{\text{Bet}}$ -proportionalen *Kraft-Hystereseeanteils* sicherstellt, dass ein angemessen großer *statischer Kraft-Hystereseeanteil* und ein darauf abgestimmter  $v_{\text{Bet}}^2$ -proportionaler *Kraft-Hystereseeanteils* vorhanden sind. So kann der  $v_{\text{Bet}}^2$ -proportionale *Kraft-Hystereseeanteils* für höhere  $v_{\text{Bet}}$  abgestimmt werden, während bei geringen  $v_{\text{Bet}}$  der *statische Anteil* ein Mindestmaß an *Kraft-Hysteresee* sicherstellt.

**Losbrechkraft** Bei einigen der untersuchten Fahrzeuge mit Pedalcharakteristiksimulator lag die *Losbrechkraft* lediglich in der Größenordnung von etwa  $F=5$  N (Kapitel 4.1.1). Für Fahrzeuge mit *gekoppelter Bremsanlage* liegt dieser Wert in der Größenordnung von 15-25 N. Auch, wenn hier in der Praxis ein eher geringer Wert angestrebt wird, erscheint eine *Losbrechkraft* von  $F=5$  N als zu gering. In Situationen, in denen der Fuß gerade erst auf das Bremspedal aufgesetzt wurde, z. B. nach dem Umsetzen vom Fahr- auf das Bremspedal, dient ein Mindestmaß an *Losbrechkraft* dem Fahrer dazu, den Kontakt mit dem Bremspedal sicher und intuitiv zu registrieren. Eine zu geringe *Losbrechkraft* kann also in einer verminderten Dosierbarkeit der Bremsanlage im Moment des Bremsbeginns führen.

**F-s-Verlauf** In vielen der bekannten Pedalcharakteristiksimulatoren wird der progressive F-s-Verlauf über die serielle Zusammenschaltung von elastischen Elementen, häufig sind das Schraubenfedern, realisiert. Trotz vorhandener

<sup>104</sup> Fahrzeugbewegungen, verursacht z. B. durch Fahrbahnunebenheiten, führen zu Relativbewegungen zwischen Bewegungsapparat und Fahrzeug

<sup>105</sup> Nicht-pathologischer physiologischer Tremor

Bemühungen, die dabei auftretenden Unstetigkeiten im F-s-Verlauf zu verschleifen - z. B. durch Zwischenschaltung von Elastomerfedern - besteht die Gefahr, dass kein harmonischer F-s-Verlauf gelingt (vgl. Kapitel 4.1.1). Diese auf den ersten Blick kaum zu identifizierenden Unstetigkeiten (Bild 62, S. 63) können sehr wohl bei der Pedalbetätigung spürbar und störend sein. Ebenso verhält es sich mit mechanisch harten „Endanschlägen“, die den maximalen Pedalweg limitieren. Diese Phänomene sind besonders kritisch zu betrachten, da *entkoppelte Bremsanlagen* meistens in Fahrzeugen mit Hybridantrieb oder reinem Elektroantrieb verbaut werden. Hier fehlen in vielen oder sogar in allen Bremsituationen das permanente Vibrieren und die Geräuschkulisse des Verbrennungsmotors. Damit entfällt die Maskierung kleinerer Störungen (Vibrationen, Unstetigkeiten, Geräusche), die bei der Bremsbetätigung auftreten können. All diese Eigenschaften sind dazu geeignet, eine *Pedalcharakteristik* „synthetisch“ oder zumindest auffällig erscheinen zu lassen.

### **Forderungen, die Erzeugung der Bremswirkung betreffend**

Die nachfolgend aufgeführten Forderungen betreffen die Anteile der *entkoppelten Bremsanlage*, die für die Erzeugung der Bremswirkung und damit die Ausprägung der *Bremscharakteristik*<sup>106</sup> zuständig sind. Das Spektrum reicht dabei von der Abstimmung der Software (Zielcharakteristik), über Laufzeiten von Informationen (Bus-Totzeiten) bis hin zur Dynamik von Aktuatoren (Pumpen, Strömungswiderstände, Elektromotoren ...).

**Zeitverhalten** Wie unter Kapitel 4.1.3 im Abschnitt „Zeitverhalten“ dargestellt, sind die Latenzzeiten zwischen Bremsbetätigung und Einsetzen der Bremswirkung bei den untersuchten Fahrzeugen mit *entkoppelter Bremsanlage* auffällig groß im Vergleich zur Mehrzahl der untersuchten Fahrzeuge mit *gekoppelter Bremsanlage*. Die Latenzzeiten, die nach der hier angewendeten Auswertemethode bei  $\Delta t_{p=60, v=400} \approx 80$  ms und darüber lagen, scheinen subjektiv grenzwertig zu sein. Hohe Zeitdifferenzen resultieren in großen *dynamischen Bremsdruck-Hysteresen* (Bild 80 links, S. 74). Vermutlich liegt die Ursache für solche Latenzzeiten bei *entkoppelten Bremsanlagen* in Totzeiten bei der Signalverarbeitung (Zyklusfrequenzen auf Steuergeräten) und der Informationsübertragung (Bus-Totzeiten), bei der Überwindung von Lüftspielen und beim Anlauf der Aktuatoriketelemente (Aufbau der Bremswirkung).

**Verblendung** Handelt es sich bei einer *entkoppelten Bremsanlage* um eine *kooperative Bremsanlage*, wird dringend empfohlen, die Bremswirkung der beiden Bremsmomenterzeugungssysteme so miteinander zu *verblenden*, dass das Gesamtmoment dem vom Fahrer abgeforderten Gesamt-Sollmoment entspricht.

---

<sup>106</sup> Vgl. Kapitel 1.2 → „Bremscharakteristik“

Die Bremswirkung muss konsistent und für den Fahrer jederzeit reproduzierbar sein. Während des Bremsvorgangs darf sich die Bremswirkung nicht unerwartet ändern. Hinweise zu Fühlbarkeitsschwellen liefert Kapitel 5.1.3 und in Teilen auch Kapitel 5.2.3. Bei Fahrzeugen mit Heckantrieb, die über eine *entkoppelte Bremsanlage* verfügen, bei der der Bremsdruck lediglich zentral moduliert werden kann, ist das maximale generatorische Bremsmoment zu limitieren (Empfehlung: rein generatorisch erzielbare Verzögerungswirkung  $b < 2 \text{ m/s}^2$ ). Bei zu hoher oder alleiniger Bremswirkung an der Hinterachse stellt sich eine instabile Bremskraftverteilung ein, was zu kritischen Fahrzuständen führen kann. Diese Einschränkung hat ebenfalls Gültigkeit für *gekoppelte rekuperative Bremsanlagen* mit Heckantrieb.

### **Forderungen, die sowohl den Pedalcharakteristiksimulator als auch die Erzeugung der Bremswirkung betreffen**

**dF/ds-Gradient im Bereich des Pedalleerwegs; Vorhandensein eines Springers** Der sogenannte „*Springer*“ bezeichnet die Eigenschaft vieler Bremsanlagen, nach Überwindung des Pedalleerwegs im Bereich niedriger Fahrzeugverzögerungen zunächst eine Erhöhung der Fahrzeugverzögerung nahezu ausschließlich über eine Erhöhung des Pedalwegs bei nur minimal ansteigender Pedalkraft zu realisieren (vgl. Kapitel 4.1.3 → „Gegenüberstellung 3“ → „*Springer*“). Diese bei geringen Abbremsungen überwiegend pedalwegmodulierte Verzögerung scheint aus ergonomischer Sicht vorteilhaft zu sein (vgl. Kapitel 3.1.3 → „Muskelaktivitäten“ → „Einfluss der Bremssituation“). Der subjektive Eindruck bestätigt diese Vermutung. Für die Auslegung von *entkoppelten Bremsanlagen* wird die Realisierung eines *Springers* klar empfohlen. Der Gradient  $dF/ds$  sollte im Bereich *moderater* Fahrzeugverzögerungen ein Höchstmaß nicht überschreiten („Pedalweg-modulierter Verzögerungsbereich“). In Bild 86 (S. 78) sind die Gradientenverläufe für verschiedene Fahrzeuge gegenübergestellt. Das Fahrzeug „*entkop. BA, zentral, trockener Sim., Rekup.*“ ist in diesem Zusammenhang bereits als grenzwertig zu bezeichnen. Die *Pedalcharakteristik* dieses Fahrzeugs wurde im Probandenversuch als „synthetisch“ bezeichnet, woran möglicherweise auch dieser ungewöhnlich hohe Gradient einen Anteil hatte.

**Pedalwegniveau** Das Pedalwegniveau des in Kapitel 4.1.1 vorgestellten Fahrzeugs („*entkop. BA, radindiv., nasser Sim., Rekup.*“) ist sehr gering (max. möglicher Pedalweg  $s \approx 62 \text{ mm}$ ). Hinzu kommt, dass sich das Pedal auch bei abgestelltem Fahrzeug („ausgeschaltete Zündung“) problemlos und ohne erhöhten Kraftaufwand bis zum Anschlag durchtreten lässt. Beides ist zwar etwas ungewöhnlich im Vergleich mit *gekoppelten Bremsanlagen*, aber nach kurzer Eingewöhnung unauffällig. Da der Mensch gerade bei niedrigen Fahrzeugverzögerungen die Bremswirkung sehr gut über den Pedalweg dosieren kann, muss es eine untere



Grenze für das Pedalwegniveau geben. Eigene Versuche zur rein kraftmodulierten Bremsbetätigung ohne bzw. nahezu ohne Pedalwegmodulation bestätigen diese Vermutung. Mit solchen „wegarmen“ oder „weglosen“ *Bremscharakteristiken* ließ sich das Fahrzeug nie gleichzeitig gut dosiert<sup>107</sup> und komfortabel<sup>108</sup> anhalten. Ein anzustrebender Wert für den maximalen Pedalweg, bei dem unter voller Fahrzeugbeladung und hoher thermischer Beanspruchung der Bremsanlage noch eine Vollverzögerung möglich sein muss, liegt vermutlich in der Größenordnung des bei aufgesetzter Ferse vom Fußballen bequem zu überstreichenden Kreisbogensegments (vgl. Kapitel 3.1.3).

### **Forderungen, die den Fahrerarbeitsplatz betreffen**

Wie bereits in Kapitel 3.1.3 dargestellt, genügt es nicht, lediglich die *Pedal-* und *Bremscharakteristik* zu optimieren. Vielmehr muss der komplette Fahrerarbeitsplatz optimal an den Fahrer anpassbar sein. In Bezug auf die Bremsanlage betrifft diese Forderung primär die Erreichbarkeit des Bedienelements (Bremspedal) bei gleichzeitig sichergestellter Bewegungsfreiheit für das bremsende Bein und der Möglichkeit der Abstützung des Fahrers an der Rückenlehne (vgl. Probandin *W05* in Kapitel 3.1.3 → „Abstütz- und Bedienkräfte“ → „Abstützkräfte“).

---

<sup>107</sup> Der Gradient  $db/dF$  darf nicht zu groß ausfallen. Diese Forderung resultiert bei „wegarmen“ oder „weglosen“ *Bremscharakteristiken* in einem zu hohen Kraftniveau bei hohen Fahrzeugverzögerungen.

<sup>108</sup> Das Kraftniveau darf insgesamt nicht zu hoch ausfallen.

## 8 Zusammenfassung

**Bedienergonomie** Mit einem interdisziplinären Untersuchungsansatz wurde ein Werkzeug zur ganzheitlichen und detaillierten Analyse von Fahrer, Fahrerarbeitsplatz und Fahrzeug geschaffen. Für Grundsatzuntersuchungen des Bremsbetätigungsverganges wurde eine stationäre Versuchsumgebung entwickelt, mit der der Fahrerarbeitsplatz schnell variiert und die Betätigungsabläufe, aufgeschlüsselt nach Bewegungsabläufen, Bedienkräften und Muskelaktivitäten, umfassend erfasst werden können. Probandenstudien haben gezeigt, dass die Versuchspersonen vorgegebene Betätigungsabläufe zwar interindividuell verschieden, aber intraindividuell sehr reproduzierbar umgesetzt haben. Die Probandin, welche die Gruppe der kleinen Frauen<sup>109</sup> repräsentiert hat, betätigte das Bremspedal deutlich anders als der Proband, der die Gruppe der großen Männer<sup>110</sup> repräsentiert hat. In kritischen Fahrsituationen konnten die ergonomischen Gegebenheiten für die kleine Probandin so ungünstig werden, dass diese in Realsituationen negative Auswirkungen auf die Fahrzeugbeherrschbarkeit und damit auf die Fahrsicherheit haben würden. Als Ursachen konnten die fehlenden Verstellmöglichkeiten der Pedalposition sowie der Länge der Oberschenkelauflage ausgemacht werden. Es wurde aufgezeigt, dass die ergonomischen Gegebenheiten von aktuellen Serienfahrzeugen und deren mangelhaften Anpassungsmöglichkeiten für eine statistisch relevante Bevölkerungsgruppe von besonders großen und kleinen Menschen zu signifikanten Einschränkungen bezüglich Fahrzeugbeherrschung und Fahrkomfort führen können.

Während bei Bremsmanövern mit *moderater Abbremsung* die Fahrzeugverzögerung moduliert bzw. eingeregelt werden muss, findet bei *Notbremsungen* mit sehr hoher Verzögerung oder bei nachgestellten Bremsmanövern in stehenden Fahrzeugen ein deutlich anderer Betätigungsablauf statt. Die Analyse der am Betätigungsvorgang beteiligten Muskeln und Muskelgruppen zeigt entsprechend, dass bei *Notbremsungen* und nachgestellten Bremsmanövern im stehenden Fahrzeug andere Muskeln maßgeblich beteiligt sind als bei *Ziel- und Anpassungsbremsungen*. In Abhängigkeit von Kondition und Trainingsstatus der Muskulatur müssen Fahrer für vergleichbare *Fußkräfte* unterschiedlich starke Muskelaktivitäten aufbringen. Die vom Fahrer aufbringbare Betätigungskraft und das jeweilige Aktivitätsniveau der an diesem Vorgang beteiligten Muskeln sind abhängig von der Innenraumgestaltung des Fahrzeugs, wie ein Vergleich mit unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten (Sportwagen, Limousine, Nutzfahrzeug) zeigte.

---

<sup>109</sup> 5. Perzentil der Frauen

<sup>110</sup> 95. Perzentil der Männer

Untersuchungen zu Gewöhnungsvorgängen unter psychologischen Aspekten haben gezeigt, dass sich Probanden an *Pedal-* und *Bremscharakteristiken*, die nicht völlig synthetisch<sup>111</sup> gestaltet sind, nach eigener Aussage i. d. R. unerwartet schnell adaptieren.

**Entkoppelte Bremsanlagen** Anhand repräsentativer Beispiele wurden die spezifischen bremspedalgefühlrelevanten Besonderheiten von *entkoppelten Bremsanlagen* mit Pedalcharakteristiksimulatoren und Rekuperationsmöglichkeit (Bremsenergierückgewinnung) experimentell analysiert. Dafür wurde eine eigens zu diesem Zweck entwickelte Pedalbetätigungsautomatik [72], [80] eingesetzt. Die Pedalcharakteristiksimulation gelingt mit aktuellen Seriensimulatoren bisher noch nicht vollkommen überzeugend. Für eine positive authentische Wahrnehmung der Bremsbetätigung ist ein Mindestmaß an *statischer* und *dynamischer Kraft-Hysterese* erforderlich. Diese wirkt unterstützend bei der Fußstabilisierung und -entlastung. Fehlende oder ungenügende *Kraft-Hysteresen* sind in der Regel darauf zurückzuführen, dass diese mit dem jeweils gewählten konstruktiven Ansatz nicht realisierbar sind. Die von der restlichen Bremsanlage isolierte experimentelle und simulative Analyse eines ausgewählten repräsentativen Pedalcharakteristiksimulators bestätigte diese Erkenntnisse. Weiterhin sind messtechnisch nur schwer fassbare geringe Unstetigkeiten im Kraft-Weg-Verlauf aufgefallen, die bei einer der untersuchten Bremsanlagen prinzipbedingt erschienen und subjektiv irritierend wirkten. Weitere Besonderheiten, wie auffällig niedrige *Losbrechkräfte*, hohe  $dF/ds$ -Gradienten im *Leernwegbereich* oder geringe Pedalwegniveaus wurden vermutlich bewusst so realisiert. Störungen im *Verzögerungsverlauf* der *kooperativen Bremsanlagen*, die durch den Verblendungsvorgang hervorgerufen wurden, konnten messtechnisch ermittelt werden, waren subjektiv jedoch kaum auffällig. Hervorstechend bei den untersuchten Fahrzeugen mit *entkoppelter Bremsanlage* war, dass die Latenzzeiten zwischen Bremspedalbetätigung und Einsetzen der Bremswirkung im Vergleich mit Fahrzeugen mit *gekoppelter Bremsanlage* auffällig groß waren. Es ist anzunehmen, dass Totzeiten, bedingt durch Signallauf- und Signalverarbeitungszeiten und das Ansprechverhalten von Aktuatoren, dafür verantwortlich sind. Ein weiteres Augenmerk ist auf die *Bremscharakteristik* zu richten. Das Einsetzen der Fahrzeugverzögerung muss auf den Verlauf von Pedalkraft und Pedalweg abgestimmt sein. Ebenso muss der Anstieg der Fahrzeugverzögerung zur weiter zunehmenden Pedalbetätigung - also der Betätigungsaufwand zur Bremswirkung - passen.

---

<sup>111</sup> Eine *Pedal-* und *Bremscharakteristik*, die sehr stark von einer üblichen Charakteristik (vgl. Bild 3, S. 7) abweicht; Sehr synthetisch in diesem Sinne ist z. B. eine Charakteristik mit extrem kurzen Pedalwegen, bei der nahezu kaum Pedalwegmodulation möglich ist und die Bremswirkung nahezu ausschließlich über eine Pedalkraftmodulation eingestellt werden muss.

**Gekoppelte Bremsanlagen ohne Rekuperation - MMS und Parameterstabilität** Eine gezielte Vermessung des Spektrums von *Pedal-* und *Bremscharakteristiken* bei einem Fahrzeug mit *gekoppelter* vakuumverstärkter hydraulischer Bremsanlage zeigte die Bandbreite an Variationen, der die *Pedal-* und *Bremscharakteristik* einer solchen Bremsanlage im Fahrbetrieb unterliegt. Die Charakteristiken stellen auch hier keinen statischen Zustand dar. Die Ursachen sind jedoch andere als bei Fahrzeugen mit *rekuperativen* und *kooperativen Bremsanlagen*. Die Quantität der Veränderungen wurde ermittelt und Ursachen wurden benannt. Anzumerken ist, dass über die untersuchten Parameter hinaus Toleranzlagen bei der Fertigung und die Alterung von Komponenten Einfluss auf die *Pedal-* und *Bremscharakteristik* haben. Die eingesetzte Methodik ist dazu geeignet, die Sensitivität der *Pedal-* und *Bremscharakteristik* bezüglich dieser Faktoren zu bestimmen. In Summe ist festzuhalten, dass für die Bremsanlagenauslegung nicht ausschließlich Nominalkennwerte berücksichtigt werden sollten, sondern vielmehr Toleranzbänder, die diesen unterschiedlichen Einflüssen gerecht werden.

**Probandenfahrversuche zu Fühlbarkeits- und Akzeptanzschwellen** Im Rahmen von Probandenfahrversuchen und unter Nutzung eines speziellen Versuchsfahrzeugs mit variabler *Pedal-* und *Bremscharakteristik* wurden Grundsatzuntersuchungen zu Fühlbarkeits- und Akzeptanzschwellen des Menschen durchgeführt. Der erwarteten Bremswirkung überlagerte Zusatzverzögerungen wurden umso eher und umso stärker als störend empfunden, je größer der Betrag und der Gradient ausfielen, mit dem diese aufgebracht wurden. Eine Zunahme der Fahrzeugverzögerung wirkte sich eher negativ auf die Bewertung aus als eine Abnahme. Die problemlos vom Fahrer tolerierte Zusatzverzögerung ist mit etwa  $\pm 0,3 \text{ m/s}^2$  relativ gering. Generell sollte die Aufprägung von Störeffekten, insofern diese sich nicht generell vermeiden lassen, so langsam wie möglich erfolgen. Weitere Untersuchungen wurden zum Einfluss von *Kraft-Hysterese*, *Pedalwegniveau*, *Pedalkraftaufwand*, *Losbrechkraft* und *Leermweggradient*, haptischer Informationsvermittlung, *Rekuperation* und *Verblendungsfehlern* auf die Akzeptanz durch den Fahrer durchgeführt. Es bestätigte sich, dass ein Mindestmaß an *Kraft-Hysterese* vorteilhaft für ein positives und authentisches *Pedalgefühl* ist. Für die Bewertung des *Pedalwegniveaus* schien primär die mit einem gegebenen *Pedalweg* erreichbare Fahrzeugverzögerung und weniger der F-s-Zusammenhang ausschlaggebend zu sein.

**Empfehlungen für die Auslegung von entkoppelten Bremsanlagen** Die gesammelten Erkenntnisse dieser Arbeit wurden zusammengeführt in Empfehlungen für die Auslegung von Bremsanlagen - mit Schwerpunkt auf den *entkoppelten Bremsanlagen*. Den *Pedalcharakteristiksimulator* betreffend wurden Forderungen zur *statischen* und *dynamischen Kraft-Hysterese*, zur *Losbrechkraft* und zum F-

s-Verlauf, die Erzeugung der Bremswirkung betreffend Forderungen zum Zeitverhalten und zur *Verblendung* aufgestellt. Weitere Anmerkungen betreffen den  $dF/ds$ -Gradienten im Bereich des *Pedalleerwegs*, das Vorhandensein eines *Springers*, das Pedalwegniveau allgemein und die Ergonomie des Fahrer Arbeitsplatzes.

## 9 Ausblick

**Objektivierung von Pedal- und Bremscharakteristik** Fertigungstoleranzen und alterungsbedingte Eigenschaftsänderungen bei Bremsenkomponenten haben Einfluss auf die *Pedal-* und *Bremscharakteristik*. Gezielte Untersuchungen können vertieft Aufschluss über qualitative und quantitative Einflüsse auf und die Relevanz dieser Effekte für die *Pedal-* und *Bremscharakteristik* liefern.

**Ergonomische Gestaltung von Pedal- und Bremscharakteristik** Die MMS der Bremsanlage und die Bremsanlage selbst werden heute vorrangig so ausgelegt, dass einerseits Anforderungen an die objektive Wirksamkeit (gesetzliche Anforderungen, Leistungstests ...) und andererseits vermeintliche Anforderungen der Fahrer (gute Bedienbarkeit, ein z. B. sportliches oder komfortables *Pedalgefühl* ...) möglichst gut erfüllt werden. Bisher noch unzureichend bekannt ist, wie eine geeignete Ausgestaltung der MMS den ungeübten Fahrer gezielt in ungewohnten kritischen Situationen unterstützen kann. So wird z. B. ein Großteil der Normalfahrer vermutlich durch den progressiven Anstieg der F-s-Kennlinie bei starker Pedalbetätigung und die ungewohnte Pedalhaptik bei einem ABS-Regeleingriff davon abgehalten, das Bremspedal so stark zu betätigen, dass die maximal mögliche Fahrzeugverzögerung in einer Gefahrensituation ausgenutzt wird. Eine diesbezüglich besser geeignete MMS sollte keine Nachteile für die alltägliche Bremsbetätigung und Fahrzeugbeherrschung mit sich bringen. Eine detaillierte Betrachtung dieser Problematik könnte einen wertvollen Beitrag für die Vermeidung von Unfällen oder die Minderung deren Schwere liefern. Völlig neue Chancen tun sich mit den Pedalcharakteristiksimulatoren von *entkoppelten Bremsanlagen* auf. Grundsätzlich besteht hier die Möglichkeit, qualitativ wie quantitativ, im Vergleich zu *gekoppelten Bremsanlagen*, völlig andersgeartete Charakteristiken zu realisieren. Zur Beurteilung, ob und in welcher Form von solchen neuen Charakteristiken Vorteile zu erwarten sind, bedarf es noch umfangreicher Forschungstätigkeiten.

**Ergonomische Gestaltung der Pedalerie** Forschungsbedarf besteht ebenfalls auf dem Gebiet der alternativen Bremspedal designs (vgl. Bild 20<sup>112</sup>, S. 23, Bild 21<sup>113</sup>, S. 24). Bei einem stehend angeordneten Bremspedal, bei dem, im Gegensatz zum typischen stehend angeordneten Fahrpedal, kein vollflächiger Kontakt zwischen Fuß und Pedal vorhanden wäre, könnten sich aus ergonomischer Sicht Vorteile ergeben. Das Pedalpad wird auf einer ähnlichen Bewegungstrajektorie um die Pedallagerung herumbewegt, wie der Fußballen um die abgestützte Ferse. Bei entsprechender Ausgestaltung wird so die Gleitbewe-

---

<sup>112</sup> Kombiniertes Fahr- und Bremspedal

<sup>113</sup> Stehendes Bremspedal

gung zwischen Fahrerfuß und Pedalpad minimiert. Erste Untersuchungen zum sogenannten Stufensprung<sup>114</sup> wurden durchgeführt. Auslegungsziele sind aber noch nicht abschließend geklärt. Die Pedalerie von *gekoppelten Bremsanlagen* ist typischerweise so ausgelegt, dass ein Stufensprung von einigen Zentimetern vorhanden ist, was bedeutet, dass das Bremspedal weiter in Richtung Fahrersitz ragt als das Fahrpedal. Maßgebliche Ursache sind Anforderungen hinsichtlich verfügbarem Bremspedalweg in Extremsituationen<sup>115</sup>. So ist beim Umsetzen vom Fahr- auf das Bremspedal nicht nur eine Fußbewegung entlang der y-Richtung des Fahrzeugkoordinatensystems erforderlich, sondern zusätzlich auch in Richtung Fahrersitz. Dadurch kann der Umsetzvorgang einige Millisekunden länger dauern als ohne Stufensprung. Zur Verdeutlichung eines möglichen Sicherheitsgewinns sei daran erinnert, dass das Fahrzeug bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h ungebremst ca. 2,8 m in lediglich 100 ms zurücklegt. Die Möglichkeiten, die im Rahmen dieser Arbeit geschaffen wurden, sollten zu weiteren gezielten Untersuchungen herangezogen werden.

**Individualisierbarkeit / Personalisierbarkeit der Pedal- und Bremscharakteristik** Aus ergonomischer Sicht erscheint es sinnvoll, das Pedalwegniveau an die Körpergröße (z. B. Länge von Ober- und Unterschenkel, realisierbare Gelenkwinkel) und das Pedalkraftniveau an die Ausprägung der Skelettmuskulatur<sup>116</sup> des jeweiligen Fahrers anpassen zu können. Heute ist es für einige Fahrzeugmerkmale bereits üblich, diese an die Vorlieben des Fahrers nach eher sportlicher oder komfortabler Ausprägung anpassen zu können. Eine Anpassbarkeit von Bedienelementen im Pkw an die physiologischen Fähigkeiten des Fahrers ist jedoch noch nicht bekannt. Das in Kapitel 5 vorgestellte Fahrzeuge (Bild 100, Bild 101, S. 86) mit variabler *Pedal-* und *Bremscharakteristik* und die in Kapitel 3.1 vorgestellte stationäre Versuchsumgebung (Bild 23, S. 29) mit anpassbaren Bedienelement-Betätigungscharakteristiken sind prinzipiell dazu geeignet, entsprechende Untersuchungen durchzuführen. Eine weitere Fragestellung betrifft die Gestaltungsfreiheit, die man dem Fahrer einräumt. Sollte er die Möglichkeit haben, eine MMS in Grenzen frei und stufenlos manipulieren zu können oder sollte er lediglich aus einer Anzahl vorgegebener Parametersätze wählen dürfen? Ist es überhaupt zielführend, dem Fahrer die Möglichkeit anzubieten, eigenständig die MMS ändern zu können oder sollte lediglich eine einzelne, möglichst geeignete, Ausprägung angestrebt werden? Denkbar wären Schnittstelleneigenschaften, die adaptiv an die aktuellen Gegebenheiten angepasst werden. Relativ leicht lassen sich Individualisierungsmöglichkeiten um-

---

<sup>114</sup> Siehe Fußnote 25, S. 30.

<sup>115</sup> Hohe Verzögerungsanforderungen bei hohen Bremsentemperaturen → Fading, Bremsflüssigkeitsausstoßvolumen

<sup>116</sup> „Physische Stärke“

setzen, wenn diese lediglich von einem Softwarecode abhängig sind. Es sind Konzepte vorstellbar, nach denen ein Fahrzeug, welches relativ preiswert in einer Grundkonfiguration erworben wird, anschließend mit weiteren Funktionalitäten ausgestattet werden kann, die erst nach deren Erwerb am Fahrzeug freigeschaltet werden. Eine solche Option könnte zukünftig auch die Möglichkeit sein, eine individualisierbare MMS<sup>117</sup> anzubieten. Eine andere Möglichkeit wäre der Erwerb einer speziellen MMS-Gestaltung („sportlich“, „komfortabel“, automatische bzw. adaptive Funktionalitäten). Ähnliche Konzepte sind heute z. B. in der Telekommunikationsbranche üblich und in Grenzen auch in der Fahrzeugtechnik vorstellbar.

**Bedienergonomie** Ein Gebiet, welches noch deutliches Potenzial zur Erhöhung der Fahrsicherheit bereithält, ist die Erkennung des Fahrers und seiner Position im Fahrzeug. Gelänge es, die physiologischen Gegebenheiten (Körpermaße, physische Stärke) des Fahrers zuverlässig zu ermitteln, könnte ein Assistenzsystem Warnungen bei nicht geeigneter Konfiguration des Fahrzeuginnenraums (z. B. falsche Einstellung des Fahrersitzes oder des Lenkrads) in Verbindung mit Empfehlungen ausgeben oder die entsprechenden Einstellungen gleich automatisch vornehmen. Erfahrung und Training wirken sich deutlich auf die Fahrzeugbeherrschung aus. I. d. R. werden die MMS der Bremsanlage von Menschen ausgelegt, getestet und beurteilt, die sich beruflich mit diesem Thema beschäftigen und häufig sogar professionelle Testfahrer sind. Für einen ungeübten Fahrer ist es hingegen nicht selbstverständlich, dass er in einem Gefahrenfall eine Fahrzeugbremsanlage bis zur Vollverzögerung betätigen kann. Ein sportlich ambitionierter Fahrer legt andere Maßstäbe an die MMS an als ein Durchschnittsfahrer, der eventuell die Bremse mit geringem Kraftaufwand betätigen möchte. Beide Fahrertypen werden zudem unterschiedliche Fahrmanöver zur Beurteilung der MMS heranziehen. Wie der Fahrer die *Pedalcharakteristik* wahrnimmt, ist maßgeblich auch von dessen Trainings- oder Gewöhnungsgrad abhängig. So kommt es vor, dass die MMS eines Fahrzeugs, das man gerade zum ersten Mal fährt, völlig anders wahrgenommen werden, als wenn man bereits einige Bremsmanöver mit diesem Fahrzeug absolviert hat oder wiederum bereits seit langer Zeit regelmäßig mit diesem Fahrzeug fährt. Vor diesem Hintergrund erscheint es vielversprechend, die Zusammenhänge zwischen Psychologie und Physiologie weitergehend gezielt zu untersuchen. Zu der in Kapitel 3.2 bearbeiteten Fragestellung nach dem Gewöhnungsverhalten erscheinen Bemühungen sinnvoll, den Gewöhnungsvorgang anhand objektiver Analysen der Betätigungsvorgänge im fahrenden Fahr-

---

<sup>117</sup> Die *Bremscharakteristik* ließe sich softwarebasiert in weiten Bereichen leicht ändern. Für die *Pedalcharakteristik* wäre dieser Anspruch nur mit weitaus größerem Aufwand realisieren. Heutige *Pedalcharakteristiksimulatoren* bestehen i. d. R. ausschließlich aus passiven Bauteilen. Für eine aktive Manipulation müssten zusätzlich kostenintensive aktive Bauteile vorgesehen werden.



zeug zu analysieren. Möglicherweise werden so Diskrepanzen zwischen der Selbsteinschätzung der Probanden und objektiven, noch zu erarbeitenden, Kriterien offenbar.

**Entkoppelte Bremsanlagen** Erste Analysen haben gezeigt, dass aktuelle *entkoppelte Bremsanlagen* unter anderem Auffälligkeiten im Zeitverhalten<sup>118</sup> zeigen. Ein erster Ansatz zur Quantifizierung der Latenzzeiten wurde vorgestellt. In weiterführenden Untersuchungen gilt es, geeignete Kriterien zur Quantifizierung und Qualifizierung des Zeitverhaltens zu finden. Offengeblieben sind z. B. folgende Fragestellungen: Welches ist ein geeignetes Maß zur Bestimmung der Pedalbetätigung<sup>119</sup> (F oder s bzw. eine Kombination aus beiden)? Welches ist ein geeignetes Maß zur Bestimmung der Anlagen- bzw. Fahrzeugreaktion<sup>120</sup> (z. B. p, M, b)? Welchen Anteil haben Totzeiten, welchen Anteil Verzögerungszeiten bei den unterschiedlichen Bremsystemkonzepten? Wie wirken diese sich jeweils auf die Subjektivbeurteilung aus? Welche sind bei den unterschiedlichen Bremsystemkonzepten die maßgeblichen Ursachen für Latenzzeiten? Welches Optimierungspotenzial steckt in der Softwarearchitektur?

---

<sup>118</sup> Vergleichsweise große Latenzzeiten zwischen Pedalbetätigung und Bremswirkung, vgl. Bild 87, S. 79

<sup>119</sup> Unabhängige Variable

<sup>120</sup> Abhängige Variable

## Literaturverzeichnis

- [1] Advics Co., 2004. Hydraulikbremsgerät. Patent #DE 103 60 984 A1. 2004.
- [2] Armbruster, D. und Hennings, S., 2011. Porsche GT3 R Hybrid - Technologieträger und rollendes Labor. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*. 2011-05 (2011).
- [3] Augsburg, J., 2006. *Bremspedalgefühl - eine empirische Untersuchung zur subjektiven Bewertung der Bremspedalcharakteristik*. Diplomarbeit. TU Dresden.
- [4] Augsburg, K., 1985. *Ein Beitrag zur experimentellen Ermittlung und analytischen Nachbildung des Zeitverhaltens von speziellen NKW-Bremsanlagen*. Dissertation. TU Dresden.
- [5] Augsburg, K. und Sendler, J., 2006. Eine komplexe Methode zur Bewertung des Bremspedalgefühls. *Subjektive Fabreindrücke sichtbar machen III : Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und -komponenten*. K. Becker, hrsg. Expert-Verlag. 17–49.
- [6] Augsburg, K. und Trutschel, R., 2002. Entwicklungswerkzeuge zur objektiven Beschreibung des Bremspedalgefühls. *XXII. Internationales My-Symposium – Bremsenfachtagung*. B. Breuer, hrsg. VDI-Verlag.
- [7] Auto Motor und Sport, 2010. Eis Zapfen. *Auto Motor und Sport*. 1/2011 (Dez. 2010), 142–147.
- [8] Babel, G., 2009. *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik*. Vieweg+Teubner.
- [9] Bady, R. und Biermann, J., 1998. Hybridantriebe - Strukturvarianten, Betriebsstrategien sowie deren Vor- und Nachteile. (Esslingen, 1998).
- [10] Basmajian, J.V. und De Luca, C.J., 1985. *Muscles alive : their functions revealed by electromyography*. Williams & Wilkins.
- [11] Biedermann, T., 2006. *Realisierung einer aktiven Beeinflussung der Bremspedalcharakteristik eines elektro-hydraulischen Brake-by-Wire-Systems*. Diplomarbeit. TU Ilmenau.
- [12] Bill, K.-H., 2005. Elektronische Bremsanlagen.
- [13] Bill, K.-H., 1999. Forschungsansätze und Werkzeuge zur experimentellen Untersuchung von „Bremspedalgefühl“ mit Blick auf kommende Brake-by-Wire-Systeme. *XVIII. Internationales My-Symposium – Bremsenfachtagung*. B. Breuer, hrsg. VDI-Verlag.
- [14] Braess, H.-H. und Seiffert, U., 2007. *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg.
- [15] Breuer, B., 2006. *Bremsenhandbuch : Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fabrdynamik*. Vieweg.

- [16] Burckhardt, M. und Reimpell, J., 1991. *Fahrwerktechnik : Bremsdynamik und Pkw-Bremsanlagen. Bremsvorgang, Bremsstabilität, Kräfte, Fahrzeug-, Fahrbahn- und Reifeneinfluss, Bremsanlagen: Einzelteile, Auslegung, Berechnung und Volumenhaushalt, Anhängerbetrieb und Anhängerbremsen*. Vogel.
- [17] Continental Teves AG & Co. OHG, 2007. Betätigungseinheit für eine Kraftfahrzeugbremsanlage. Patent #DE 10 2007 010 513 A1. Nov. 22, 2007.
- [18] Continental Teves AG & Co. OHG, 2008. Verfahren zur Überwachung der Funktionsfähigkeit einer Bremsbetätigungseinheit. Patent #DE 10 2007 016 754 A1. Aug. 21, 2008.
- [19] Dairou, V., Priez, A., Sieffermann, J.-M. und Danzart, M., 2003. 2003-01-0598 An Original Method to Predict Brake Feel: A Combination of Design of Experiments and Sensory Science. *S.A.E. transactions*. 112, (2003), 735–741.
- [20] Deinzer, R., 2007. *Allgemeine Grundlagen wissenschaftlichen Arbeitens in der Medizin: Ein Leitfaden für die empirische Promotion und Habilitation*. Kohlhammer.
- [21] Duval-Destin, M., Kropf, T., Abadie, V. und Fausten, M., 2011. Auswirkungen eines Elektroantriebs auf das Bremssystem. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*. 113, 9 (2011), 638–643.
- [22] Ebert, D.G. und Kaatz, R.A., 1994. *Objective characterization of vehicle brake feel*. Society of Automotive Engineers.
- [23] FAKRA im DIN e. V. hrsg., 1991. DIN 70000, Ausgabe: 1991, Straßenfahrzeuge, Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe.
- [24] Fetzer, J., 2011. Umbruch in der etablierten Wertschöpfungskette. *Elektronik und Automobil - Technologies to Watch - Beilage der VDI Nachrichten*. September 2011 (2011), 12–14.
- [25] FNErg im DIN e. V. hrsg., 1978. DIN 33402, Teil 1, Ausgabe: 1978, Körpermaße des Menschen, Begriffe, Messverfahren.
- [26] FNErg im DIN e. V. hrsg., 2005. DIN 33402, Teil 2, Ausgabe: 2005, Ergonomie - Körpermaße des Menschen, Werte.
- [27] FOCUS Online - Fahrbericht Opel Ampera, 2011. [http://www.focus.de/auto/fahrberichte/tid-21995/fahrbericht-opel-ampera-antrieb-und-fahrverhalten\\_aid\\_618830.html](http://www.focus.de/auto/fahrberichte/tid-21995/fahrbericht-opel-ampera-antrieb-und-fahrverhalten_aid_618830.html). Abgerufen: 2012-01-10.
- [28] Gökten, A.G., 1987. Optimale Bremspedal-Kraft-Weg-Charakteristiken bei Pkw-Bremsanlagen. *Automobil-Industrie*. 2 (1987).

- [29] Gossen, F. und Grahl, M., 1999. Vergleich von Brennstoffzellen- und weiteren zukünftigen Antrieben hinsichtlich Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit. (Okt. 1999).
- [30] Graham-Rowe, D., 2002. Combined accelerator and brake pedal could save lives. *New Scientist*. 34 (01. 2002), 175.
- [31] Grunwald, M. und Beyer, L., 2001. *Der bewegte Sinn : Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung*. Birkhäuser.
- [32] Grzesik, A., 2009. *Physiologiebasierte Simulation des Bremsverhaltens von Fahrzeugführern*. Dissertation. TU Ilmenau.
- [33] Henneman, E., 1985. The size-principle: a deterministic output emerges from a set of probabilistic connections. *The Journal of experimental biology*. 115, (1985), 105–12.
- [34] Hoheisel, J., 2011. Brake Systems for New Powertrain Concepts. *Automobil Elektronik Kongress* (Ludwigsburg, Juni. 2011).
- [35] Hybrid-Autos - Wirkungsgrad der Synchronmaschine, <http://www.hybrid-autos.info/Technik/E-Maschinen/wirkungsgrad-pmsm.html>. Abgerufen: 2011-02-20.
- [36] Hybrid-SUV von Lexus und VW im Test, 2010. <http://www.autozeitung.de/auto-vergleichstest/hybrid-suv-von-lexus-und-vw-im-test/fabrdynamik-umwelt-kosten>. Abgerufen: 2010-09-22.
- [37] Jahn, M., 1980. Größen und Wirkungen an der hydraulischen Betätigungsanlage für Kraftfahrzeugbremsen. *Kraftfahrzeugtechnik*. 5 (1980).
- [38] Jürgensohn, T., 1997. *Hybride Fabrermodelle*. Pro-Universitate-Verl.
- [39] Kant, B., 2010. Elektrohydraulische Bremse SBC. *Bremsen und Bremsregelsysteme*. Vieweg+Teubner. 150–153.
- [40] Kappelmann, P., 2005. Dimensionslose Kennzahlen zur Beschreibung des Bremspedalgeföhls. (Renningen, 2005), 376–392.
- [41] Kappelmann, P., 2006. *Rechnergestützte Auslegung von PKW-Bremsanlagen unter Berücksichtigung des Pedalgeföhls*. Dissertation. Universität Stuttgart.
- [42] Kliffken, M.G., Beck, M., Ehret, C. und Stawiarski, R., 2009. Kosten bremsen und Umwelt schonen mit hydraulischem Hybridantrieb. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*. ATZ offhighway - März 2009 (2009), 36–46.
- [43] Kolodziej, A., 2009. *Daten zum Verkehr - Ausgabe 2009*. KOMAG mbH.
- [44] Konrad, P., 2005. EMG-Fibel - Eine praxisorientierte Einführung in die kinesiologische Elektromyographie.

- [45] Kowalski, M.F. und Ebert, D.G., 1993. *Establishing brake design parameters for customer satisfaction*. Society of Automotive Engineers.
- [46] Leber, M., 1997. *Radbremse mit mechatronischer Kennwertregelung - Untersuchung von Betriebsverhalten und Fabreranbindungsproblematik hinsichtlich Brake-by-Wire-Systemen*. Dissertation. TU Darmstadt.
- [47] Lohse, G. und Irlinger, F., 1996. CAE-gestützter Entwurf einer Bremspedalkinematik mit variabler Übersetzung. *VDI-Berichte*.
- [48] Mitschke, M., Syta, S., Goektan, A., Czinczel, A. und Braun, H., 1987. *Anthropometrische Optimierung von Pkw-Bremsen. Teil I und II*.
- [49] Modellpflege und Hybrid für die S-Klasse, 2009. <http://www.auto-motor-und-sport.de/fahrberichte/mercedes-s-400-hybrid-1327530.html>. Abgerufen: 2010-02-15.
- [50] Müller, M., 2007. *Zur Topographie- und Grenzschichtdynamik in Bremsystemen*. Dissertation. TU Braunschweig.
- [51] Musiol, F., 1994. *Erklärung der Vorgänge in der Kontaktzone von trockenlaufenden Reibpaarungen über gesetzmäßig auftretende Phänomene im Reibprozeß*. Dissertation. TU Berlin.
- [52] Neudorfer, H., Binder, A. und Wicker, N., 2006. Analyse von unterschiedlichen Fahrzyklen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*. 123, 7-8 (2006), 7–8.
- [53] Newcomb, T.P., 1981. Driver behaviour during braking. (1981).
- [54] Nilsson, R., 2002. Evaluation of a combined brake-accelerator pedal. *Accident; analysis and prevention*. 34, 2 (2002), 175–183.
- [55] Noack, C., 2005. *Algorithmen- und Softwareentwicklung für einen elektro-hydraulischen Haptiksimulator in einem Pkw-Prototypen*. Diplomarbeit. TU Ilmenau.
- [56] Openstreetmap, [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org).
- [57] Pooock, G.K., West, A.E., Toben, T.J. und Sullivan, J.P., 1973. A combined accelerator-brake pedal. *Ergonomics*. 16, 6 (1973), 845–8.
- [58] Raste, T. und Eckert, A., 2010. Brake Torque Blending and Recuperation Strategy. (Wiesbaden, Mai. 2010).
- [59] Rausch, J., Siebertz, K., Christensen, S.T. und Rasmussen, J., 2006. Simulation des menschlichen Bewegungsapparates zur Innenraumgestaltung von Fahrzeugen. *VDI-Berichte*. 1967, (2006), 1027–1048.
- [60] Reif, K., 2010. Bremsysteme im Personenkraftwagen. *Bremsen und Bremsregelsysteme*. Vieweg+Teubner. 36–47.

- [61] Robert Bosch GmbH, 2008. Bremshebelanordnung. Patent #DE 10 2007 009 563 A1. Aug. 28, 2008.
- [62] Robert Bosch GmbH, 2009. Pedalwegsimulator. Patent #WO 2009/003835 A3. Jan. 8, 2009.
- [63] Sacher, H., 2009. *Gesamtheitliche Analyse des Bedienverhaltens von Fahrzeugfunktionen in der täglichen Nutzung*. Dissertation. TU München.
- [64] Sailer, U., 2002. Aussagen zum Pedalgefühl im rechnergestützten Auslegungsprozess und in der Applikation von Pkw-Bremsanlagen. *bremst.tech* (München, 2002).
- [65] Sarris, V. und Reiß, S., 2005. *Kurzer Leitfaden der Experimentalpsychologie*. Pearson Studium.
- [66] Schumann, N.P., Sendler, J., Grassme, R., Fetter, R., Augsburg, K. und Scholle, H.C., 2008. Die muskuläre Beanspruchung bei Bremsmanövern im PKW. *Prävention von arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren und Erkrankungen 14. Erfurter Tage*. R. Grieshaber, M. Staderler, und H.C. Scholle, hrsg. Bussert & Staderler. 447–457.
- [67] Sedlan, K. und Haupt, P., 1999. Nichtlineare Viskoelastizität von gummiartigen Werkstoffen. *Technische Mechanik*. 19, 4 (1999), 269–278.
- [68] Sendler, J., 2003. *Planung, Durchführung und Interpretation von Subjektiv-Objektiv-Untersuchungen zum Bremskomfort und zur Bremsicherheit*. Projektarbeit. TU Ilmenau.
- [69] Sendler, J., Augsburg, K., Fetter, R. und Auler, F., 2006. Analyse des Gewöhnungsverhaltens von Normalfahrern in Bezug auf die Bremspedalcharakteristik. *brake.tech* (München, 2006).
- [70] Sendler, J., Augsburg, K., Scholle, H.C. und Schumann, N.P., 2008. Analyse der physiologischen Aspekte des Betätigungsverhaltens beim Bremsen. *brake.tech* (München, 2008).
- [71] Sendler, J., Augsburg, K., Schumann, N.P., Trutschel, R. und Scholle, H.C., 2008. F2008-02-040 A Novel Method for Objectifying the Physiological Stress of the Car Driver While Braking. *FISITA 2008 World Automotive Congress* (München, 2008).
- [72] Sendler, J., Trutschel, R. und Augsburg, K., 2004. Eine neuartige Methode zur objektiven Analyse der Bremspedalgefühlcharakteristik. *bremst.tech* (München, 2004).
- [73] Sendler, J., Trutschel, R., Augsburg, K., Schumann, N.P. und Scholle, H.C., 2009. Bewertungs- und Entwicklungsmethoden zur Pedal- und Bremscharakteristik. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*. 111, 7/8 (2009), 568–574.

- [74] Siebertz, K. und Rausch, J., 2008. F2008-12-082 The Anybody Car Driver Model, A CAE Tool to Evaluate Comfort. *FISITA 2008 World Automotive Congress* (München, 2008).
- [75] Speed, A., 2010. Braking feel, a human centred approach. (Wiesbaden, Mai. 2010).
- [76] Stäger, A., 1950. *Kreisell als Energiespeicher beim Gyrobus*.
- [77] Straub, T. und Suginaka, R., 2002. Bremspedalgefühl – Gegenüberstellung von objektiven Messwerten, subjektiven Fahreindrücken eines konventionellen Bremssystems und einer Brake-by-Wire-Bremsanlage. *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen: Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und -komponenten*. K. Becker, hrsg. Expert-Verlag.
- [78] Tewes, U. und Wildgrube, K., 1992. *Psychologie-Lexikon*. R. Oldenbourg Verlag.
- [79] Tillmann, B. und Töndury, G. hrsg., 1998. *Anatomie des Menschen*. Thieme.
- [80] Trutschel, R., 2007. *Analytische und experimentelle Untersuchung der Mensch-Maschine-Schnittstellen von PKW-Bremsanlagen*. Dissertation. TU Ilmenau.
- [81] Trutschel, R. und Augsburg, K., 2003. Simulationsmodell einer Pkw-Bremsanlage zur Identifikation und Optimierung des statischen und dynamischen Systemverhaltens. (Graz, 2003).
- [82] TÜV SÜD GRUPPE - TÜV SÜD: Normangaben bei Reichweiten von E-Cars nicht ausreichend, 2010. [http://www.tuev-sued.de/tuev\\_sued\\_konzern/presse/pressearchiv/tuev\\_sued\\_normangaben\\_bei\\_reichweiten\\_von\\_e-cars\\_nicht\\_ausreichend?dtree=1](http://www.tuev-sued.de/tuev_sued_konzern/presse/pressearchiv/tuev_sued_normangaben_bei_reichweiten_von_e-cars_nicht_ausreichend?dtree=1). Abgerufen: 2011-01-10.
- [83] Volkmann, M., 2009. *Konzeption von Bedienelementen für einen Pkw-Ergonomieprüfstand*. Bachelorarbeit. TU Ilmenau.
- [84] Volkmann, M., 2010. *Messung und Auswertung von Betätigungsabläufen in einem Pkw-Ergonomieprüfstand*. Projektseminar. TU Ilmenau.
- [85] Ward's Automotive Group, *Ward's motor vehicle facts & figures 2008 : documenting the performance and impact of the U.S. auto industry*. Ward's Automotive Group.
- [86] Wedekind, N., 2009. *Konzeption eines Pkw-Ergonomieprüfstands*. Diplomarbeit. TU Ilmenau.
- [87] Wehner, T., 2010. *Untersuchung von Einflussparametern auf das Bremspedalgefühl*. Projektseminar. TU Ilmenau.
- [88] Wenninger, G., 2001. *Lexikon der Psychologie : in fünf Bänden*. Spektrum.

- [89] Winner, H. und Heuss, O., 2005. X-by-Wire Betätigungselemente – Überblick und Ausblick. *Cockpits für Straßenfahrzeuge der Zukunft: Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug*, Technische Universität Darmstadt, 8./9. März 2005. H. Winner und R. Bruder, hrsg. ergonomia Verlag.

#### Patentanmeldung:

Sendler, J., Volkmann, M. und Augsburg, K., 2011. Vorrichtung und Verfahren zur Simulation der Pedalcharakteristik einer entkoppelten Kraftfahrzeugbremsanlage. Patent #DE 10 2010 025 252 A1.

#### Studentische Arbeiten, die im Rahmen des Dissertationsthemas betreut wurden (Auswahl):

- Auler, F., 2007. *Analyse des Gewöhnungsverhaltens von Normalfahrern in Bezug auf die Bremspedalcharakteristik*. Diplomarbeit. TU Ilmenau.
- Bechmann, B., 2007. *Ermittlung der physikalischen Parameter von Komponenten einer Nutzfahrzeugbremsanlage*. Projektarbeit. TU Ilmenau.
- Bender, M., 2010. *Untersuchungen zum Einfluss moderner aktueller und zukünftiger Bremsanlagenkonzepte auf das Bremspedalgefühl*. Projektseminar. TU Ilmenau.
- Biedermann, T., 2006. *Realisierung einer aktiven Beeinflussung der Bremspedalcharakteristik eines elektro-hydraulischen Brake-by-Wire-Systems*. Diplomarbeit. TU Ilmenau.
- Hampl, S., 2006. *Entwicklung eines Bremsroboters*. Studienarbeit. TU Ilmenau.
- Herre, E., 2006. *Analyse einer Bremsanlage und Parametrierung eines Bremsensystemmodells*. Diplomarbeit. TU Ilmenau.
- Löhr, T., 2008. *Marktrecherche über entkoppelte Brems-Systeme für den Einsatz in einem Hybrid-Fahrzeug*. Projektarbeit. TU Ilmenau.
- Löhr, T., 2009. *Optimierte Pedalcharakteristik für ein Brake-by-wire-System*. Diplomarbeit. TU Ilmenau.
- Misselwitz, J., 2007. *Konzeption einer Messumgebung zur Bestimmung der Fahrerbeanspruchung beim Bremsvorgang*. Diplomarbeit. TU Ilmenau.
- Nitsch, A., 2005. *Werkzeug zur Messung und Analyse der Bremspedalcharakteristik von Pkw's*. Projektarbeit. TU Ilmenau.
- Noack, C., 2005. *Algorithmen- und Softwareentwicklung für einen elektro-hydraulischen Haptiksimulator in einem Pkw-Prototypen*. Diplomarbeit. TU Ilmenau.



- Sternkopf, A., 2007. *Erarbeitung konstruktiver Konzepte für aktive und passive Pedalcharakteristiksimitatoren*. Projektarbeit. TU Ilmenau.
- Volkman, M., 2009. *Konzeption von Bedienelementen für einen Pkw-Ergonomieprüfstand*. Bachelorarbeit. TU Ilmenau.
- Volkman, M., 2010. *Messung und Auswertung von Betätigungsabläufen in einem Pkw-Ergonomieprüfstand*. Projektseminar. TU Ilmenau.
- Wedekind, N., 2009. *Konzeption eines Pkw-Ergonomieprüfstands*. Diplomarbeit. TU Ilmenau.
- Wehner, T., 2010. *Untersuchung von Einflussparametern auf das Bremspedalgefühl*. Projektseminar. TU Ilmenau.

## Anhang

### A.1 Ausgewählte hybrid-elektrische Antriebskonfigurationen

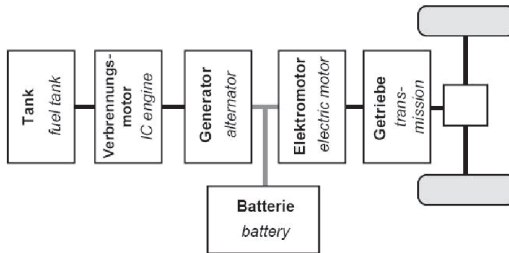


Bild A1: Serieller Hybridantrieb [9]

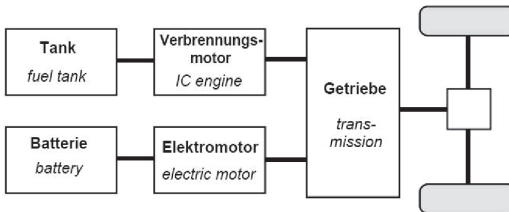


Bild A2: Paralleler Hybridantrieb [9]

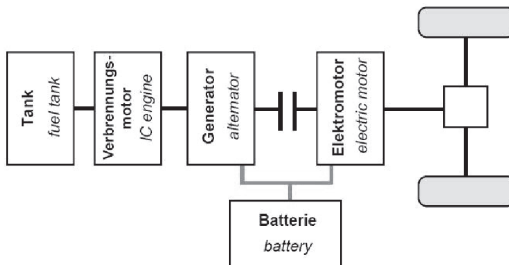


Bild A3: Leistungsverzweigter Hybridantrieb [9]

## A.2 Stationäre Versuche: Vorversuche mit einem modifizierten Pkw



Bild A4: Versuchsumgebung zur experimentellen Analyse von Betätigungsabläufen

### A.3 Stationäre Versuchsumgebung: verbale Umschreibung der Bremsmanöverborgaben

Vorgabe	verbale Umschreibung
<i>moderater Bremsvorgang</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alltagssituation, moderate <i>Zielbremsung</i></li> <li>• „Stellen Sie sich vor, Sie müssen an einer roten Ampel halten und vor Ihnen sind schon einige Fahrzeuge zum Stehen gekommen!“</li> </ul>
<i>Vollbremsung</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Stellen Sie sich eine Notsituation vor, in der Sie das Fahrzeug schnellstmöglich bis zum Stillstand abbremsen müssen!“</li> </ul>

Tabelle A1: Verbale Umschreibung der Bremsmanöverborgaben

## A.4 Stationäre Versuchsumgebung: Bewegungstrajektorien des Malleolus lateralis der Fibula des rechten Beins

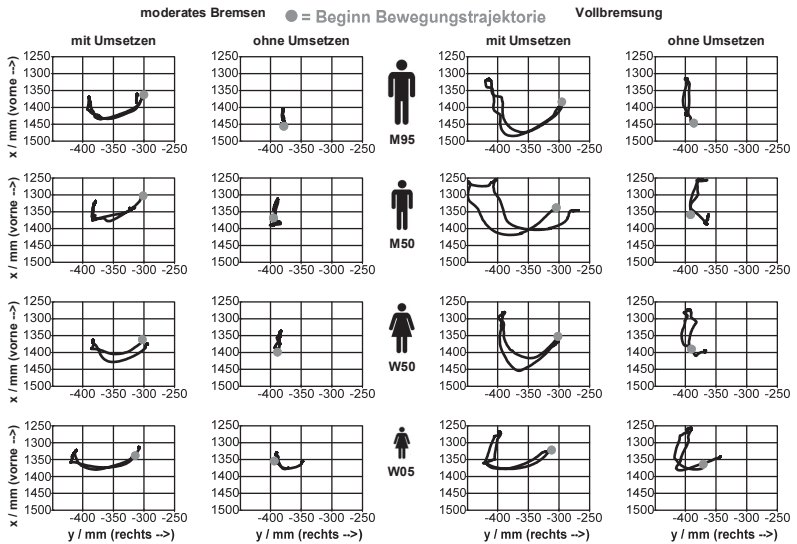


Bild A5: Bewegungstrajektorien des Malleolus lateralis der Fibula des rechten Beins (x-y-Ebene, Blick von oben, Van)

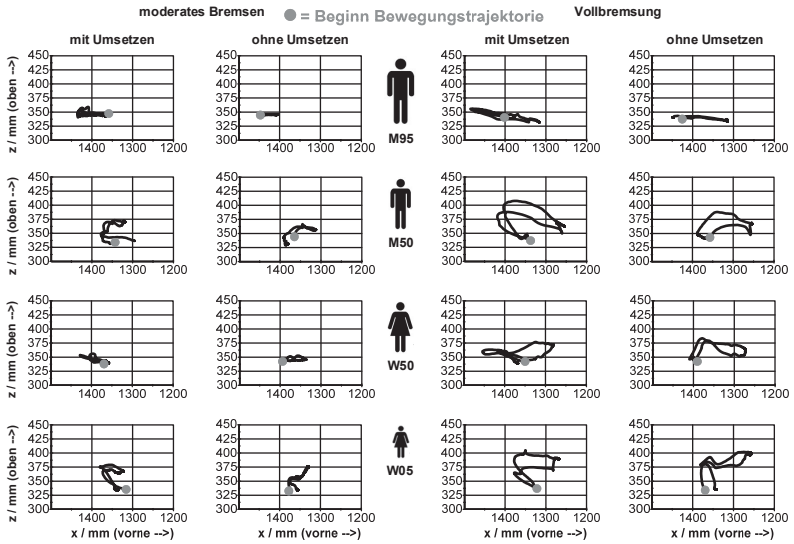


Bild A6: Bewegungstrajektorien des Malleolus lateralis der Fibula (vgl. Bild 36, S. 37) des rechten Beins  
 (x-z-Ebene, Blick von rechts, Van)

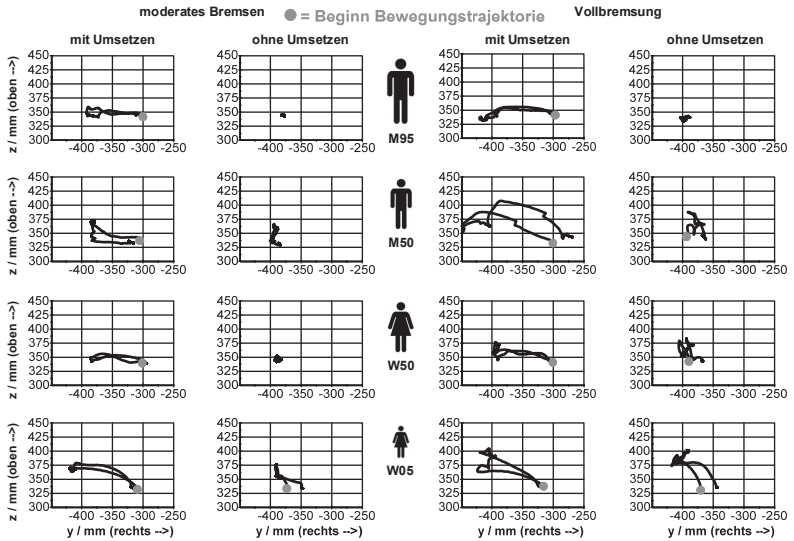
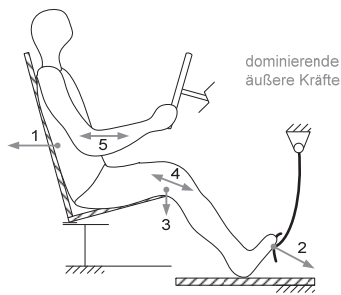


Bild A7: Bewegungstrajektorien des Malleolus lateralis der Fibula (vgl. Bild 36, S. 37) des rechten Beins  
 (y-z-Ebene, Blick von hinten, Van)

### A.5 Stationäre Versuchsumgebung: Schematische Darstellung der ergonomischen Gegebenheiten bei einer Vollbremsung



- Oberkörper drückt gegen die Rückenlehne (1)
- rechter Oberschenkel drückt bei Pedalbetätigung (2) gegen die Vorderkante der Sitzfläche (3), da das Bein gestreckt wird (4)
- Abstützung des Körpers typischerweise zwischen Lenkrad und Rückenlehne, Arme werden gestreckt (5)

Bild A8: Schematische Darstellung der typischen ergonomischen Gegebenheiten in einem Pkw bei einer *Vollbremsung*; [84]



## A.6 Anatomische Positionen ausgewählter Elektrodenmesspunkte der Elektromyografie (EMG)

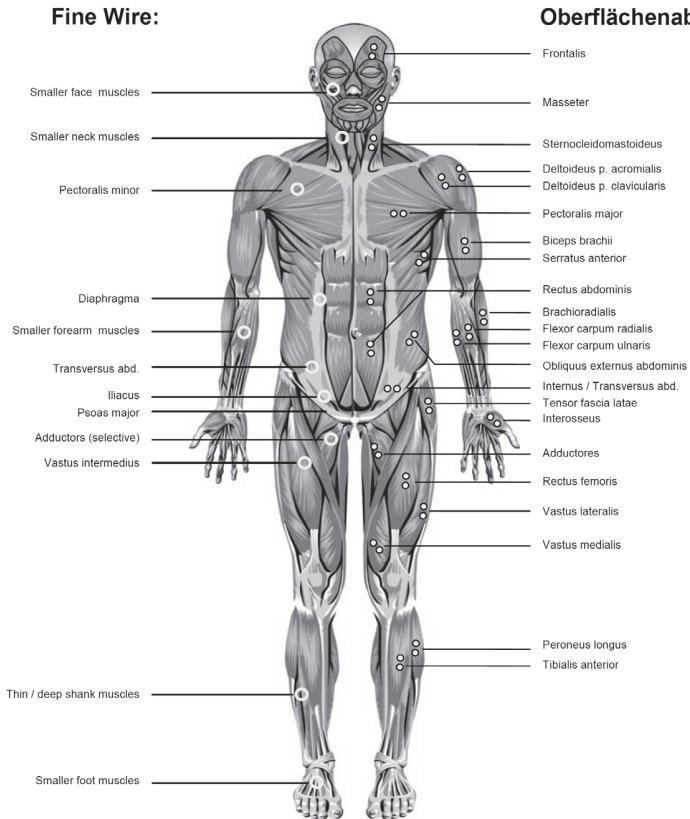


Bild A9: Anatomische Positionen ausgewählter Elektrodenmesspunkte - Vorderansicht, links: Messpunkte für tiefliegende Muskeln, rechts: Messpunkte für Oberflächenmuskeln [44]

## Fine Wire:

## Oberflächenableitung:

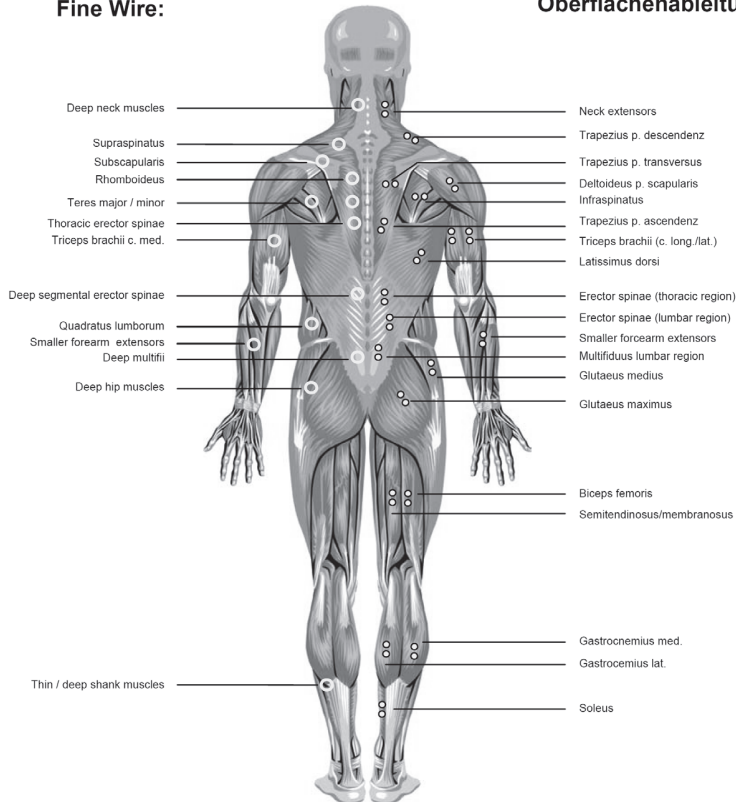
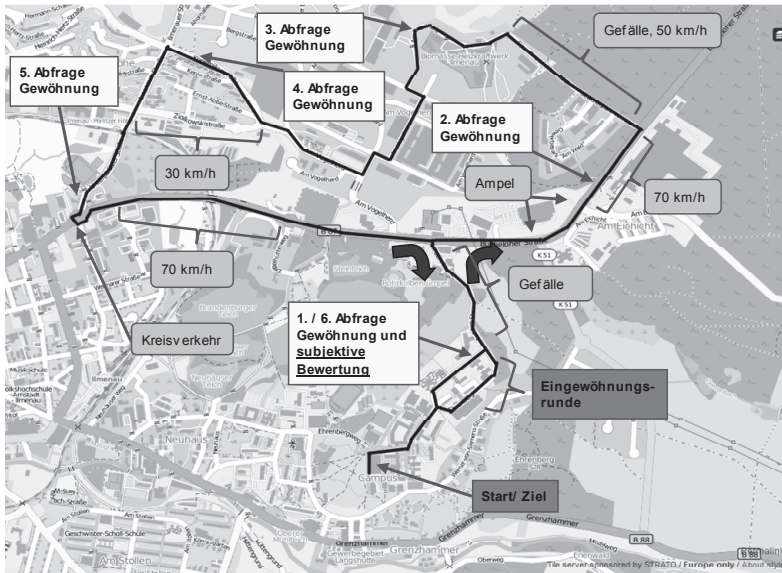


Bild A10: Anatomische Positionen ausgewählter Elektrodenmesspunkte - Rückansicht, links: Messpunkte für tiefliegende Muskeln, rechts: Messpunkte für Oberflächenmuskeln [44]

## A.7 Probandenversuch Gewöhnungsvorgänge: Versuchsdesign



Karte hergestellt aus OpenStreetMap-Daten | Lizenz: Ceative Commons BY-SA 2.0

Bild A11: Versuchsstrecke Gewöhnungsvorgänge *Stadtverkehr Ilmenau*, nach[3]; Kartenmaterial aus [56]



Bild A12: Versuchsstrecke Gewöhnungsvorgänge *Verkehrsruher Bereich*; nach [69]; Kartenmaterial aus [56]

## A.8 Probandenversuch Gewöhnungsvorgänge - Stadtverkehr: Befragungsergebnisse

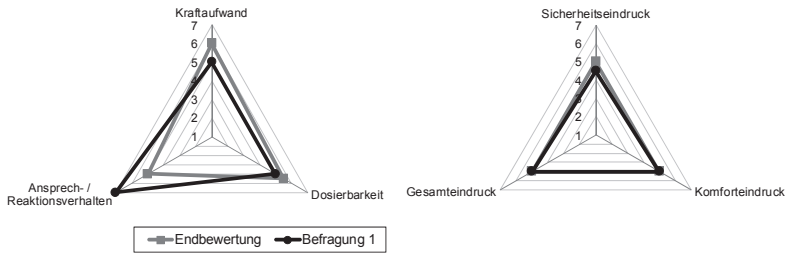


Bild A13: Vergleich Befragung 1 und Endbewertung bei *Charakteristik 1* (7=gut, 1=schlecht); nach [69]

### A.9 Experimentelle Analyse von Fahrzeugen mit entkoppelten Bremsanlagen: Gegenüberstellung 2: Look-up-Tables der virtuellen Pedal- und Bremscharakteristik

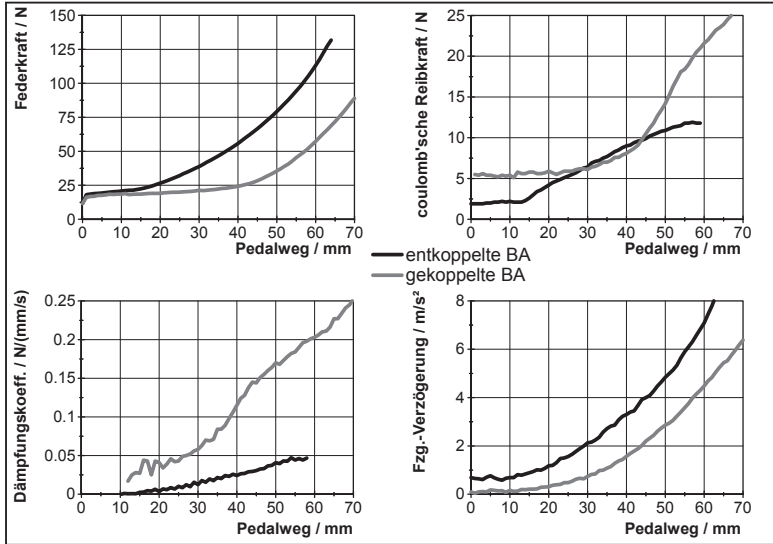


Bild A14: Look-up-Tables der virtuellen Pedal- und Bremscharakteristik (fahrendes Fzg., vgl. Kapitel 1.2 → „Physikalisches Ersatzmodell für die Pedal- und Bremscharakteristik“)

Als besonders kritisch, im Sinne von *synthetischem Empfinden*, wird eingeschätzt, dass die Niveaus der coulomb'schen Reibkraft und des Dämpfungskoeffizientenverlaufs, und damit der *statischen* und der *dynamischen Kraft-Hysterese*, bei der *entkoppelten Bremsanlage* deutlich niedriger ausfallen als bei der *gekoppelten Bremsanlage*.

## A.10 Experimentelle Analyse von Fahrzeugen mit entkoppelten Bremsanlagen: Gegenüberstellung 3: Zusammenhang Ansprechweg, Leerweg und Springer

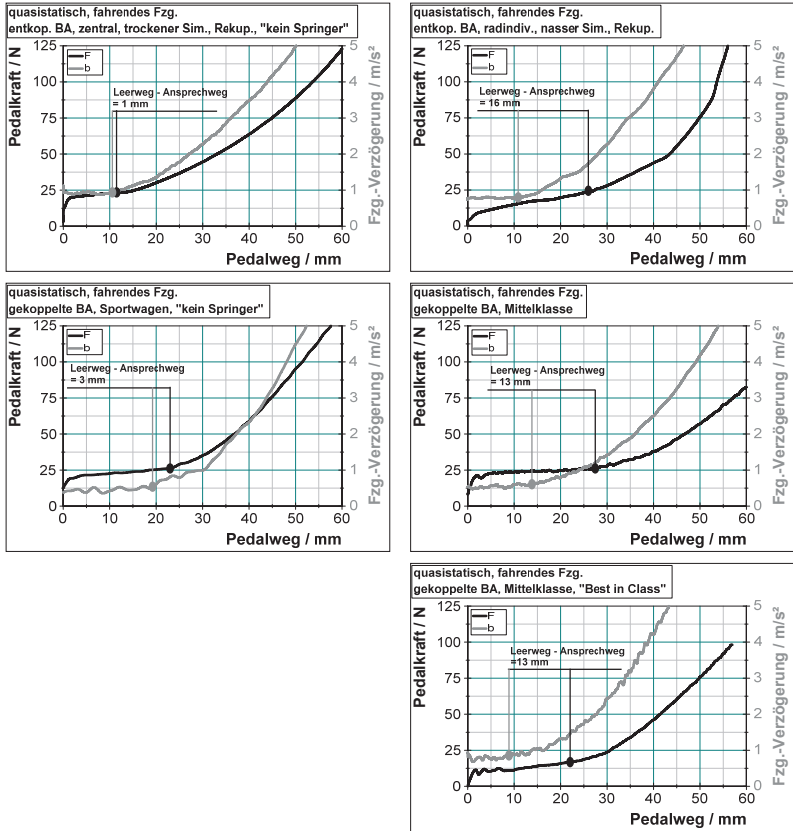


Bild A15: Vergleich von *Pedal-* und *Bremscharakteristiken* ohne (links) bzw. mit (rechts) ausgeprägtem *Springer* hinsichtlich Differenz zwischen *Ansprech-* und *Leerweg*: F-s- bzw. b-s-Zusammenhänge

### A.11 Probandenversuch Versuchsreihe 1 - „Gekoppelte Bremsanlagen mit Rekuperation: Grundsatzuntersuchungen zu Fühlbarkeitsschwellen“: Versuchsdesign

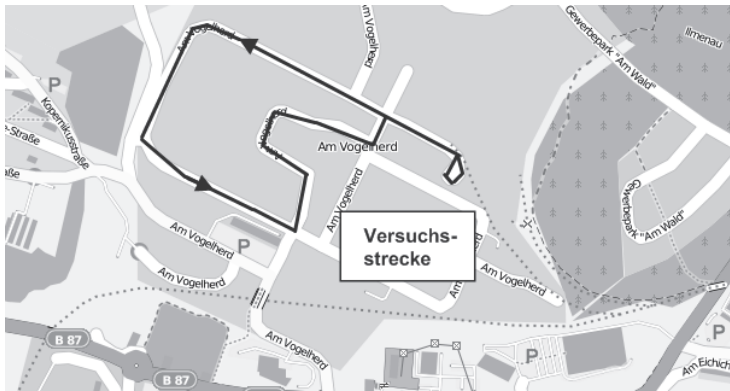
Merkmal	Mittelwert	Median	Sonstiges
Anzahl			8 männlich 0 weiblich
Alter	24,6 Jahre	24,0 Jahre	
Gewicht	79 kg	79 kg	
Körperhöhe	179 cm	181 cm	
Fahrleistung	14500 km / Jahr	17500 km / Jahr	
besitzt eigenen Pkw			ja: 5 nein: 3
Fahrhäufigkeit	ca. 4x / Woche	> 5x / Woche	
Einstellung zum Auto	fährt gern oder sehr gern Auto	fährt gern oder sehr gern Auto	

Tabelle A2: Probandenkollektiv

Vorgabe	verbale Umschreibung
„normaler“ Bremsvorgang	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alltagssituation, moderate Zielbremsung</li> <li>„Stellen Sie sich vor, Sie müssen an einer roten Ampel halten und vor Ihnen sind schon einige Fahrzeuge zum Stehen gekommen!“</li> </ul>
„leichter“ Bremsvorgang	<ul style="list-style-type: none"> <li>deutlich geringere Verzögerung als beim „normalen“ Bremsvorgang</li> <li>„Bremsen Sie das Fahrzeug bis zum Stillstand ab! Betätigen Sie dabei das Bremspedal bewusst mit sehr geringer Betätigungskraft so, dass die erzeugte Fahrzeugverzögerung gerade so wahrnehmbar ist!“</li> </ul>

Tabelle A3: Verbale Umschreibung der Bremsmanöverborgaben





Karte hergestellt aus OpenStreetMap-Daten | Lizenz: Ceative Commons BY-SA 2.0

Bild A16: Versuchsstrecke Gewerbegebiet "Am Vogelherd"; Kartenmaterial aus [56]

Folgende Vorinformationen wurden den Probanden einige Tage vor den Versuchen zur Verfügung gestellt:

*Alle Fahrzeughersteller unternehmen große Anstrengungen, um die Kundenakzeptanz ihrer Produkte zu verbessern. Erfolgte dies früher oft über die Optimierung einzelner technischer Parameter, ist es heute zunehmend der subjektive Eindruck, der den Charakter eines Fahrzeuges und den Verkaufserfolg bestimmt. Eine zielgerichtete Fahrzeugentwicklung erfordert daher detaillierte Kenntnisse über die Wechselwirkung zwischen Fahrer und Fahrzeug.*

*Für systematische Untersuchungen dieser Problematik auf dem Gebiet der Bremspedalhap- tik steht dem FG Kraftfahrzeugtechnik ein Forschungsfahrzeug zur Verfügung. Dabei handelt es sich um einen präparierten Pkw, dessen Bremspedalcharakteristik verändert werden kann.*

*Im Rahmen dieser Untersuchungen bewegen Sie das Fahrzeug im öffentlichen Straßenver- kehr. Sie durchfahren einen Stadtkurs durch Ilmenau. Weiterhin gehören Überlandfahrten zum Versuchsprogramm. Sie haben die Aufgabe, verschiedene Abstimmungen der Brems- anlage gegeneinander zu vergleichen und zu bewerten. Die Fahrt wird voraussichtlich auf dem TU-Campus beginnen und wieder enden. Die Ausrüstung des Fahrzeuges ermöglicht die Aufzeichnung und statistische Auswertung wichtiger Fahrzeuggrößen. Neben Ihnen sitzt ein Betreuer, der Ihnen Streckeninformationen sowie Hinweise zum Ablauf gibt.*

*Bewegen Sie das Fahrzeug in derselben Weise, in der Sie auch Ihr Privatfahrzeug unter Einhaltung der StVO bewegen würden. Es wird nicht erwartet, die Fahrstrecke in mög- lichst kurzer Zeit zu durchfahren oder anderweitig „faberisches Können“ zu beweisen. Setzen Sie sich nicht unter Druck, geben Sie an die Aufgabe gelassen heran! Die Ergeb- nisse werden vom Fahrzeughersteller und dem Systemlieferanten ernst genommen.*

*Das FG KFT bedankt sich im Voraus für Ihre Teilnahme und wünscht bei der Durch- führung viel Spaß.*

*Hinweis:*

*Es wird darum gebeten, vor dem Abschluss der Versuche keine weiteren Informationen sowie Wertungen an Ihnen nachfolgende Teilnehmer weiterzugeben.*



Folgende Vorinformationen wurden den Probanden einige Tage vor den Versuchen zur Verfügung gestellt:

*Alle Fahrzeughersteller unternehmen große Anstrengungen, um die Kundenakzeptanz ihrer Produkte zu verbessern. Erfolgte dies früher oft über die Optimierung einzelner technischer Parameter, ist es heute zunehmend der subjektive Eindruck, der den Charakter eines Fahrzeuges und den Verkaufserfolg bestimmt. Eine zielgerichtete Fahrzeugentwicklung erfordert daher detaillierte Kenntnisse über die Wechselwirkung zwischen Fahrer und Fahrzeug.*

*Für systematische Untersuchungen dieser Problematik auf dem Gebiet der Bremscharakteristik steht dem FG Kraftfahrzeugtechnik ein Forschungsfahrzeug zur Verfügung. Dabei handelt es sich um einen präparierten Pkw, dessen Bremscharakteristik verändert werden kann.*

*Zur Steigerung der Energieeffizienz von Kraftfahrzeugen werden zukünftig vermehrt Lösungen zur Rückgewinnung von Bremsenergie entwickelt und eingesetzt. In einigen Fahrzeugen ist dies bereits heute Serienstand. Beim Rückgewinnen (Rekuprieren) entsteht ein Bremsanteil, welcher sich bei konventionellen Bremsanlagen ohne Zusatzmaßnahmen zum Anteil der bekannten Reibungsbremsen addiert. Diese Überlagerung ist jedoch nur in begrenztem Maße zulässig, da die Gefahr besteht, dass der Fahrer die Überlagerung (unangenehm) wahrnimmt. Die Grenzen sollen hier herausgearbeitet werden.*

*Im Rahmen dieser Untersuchungen bewegen Sie das Fahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr.*

*Sie haben die Aufgabe, verschiedene Bremscharakteristiken zu beurteilen. Die Fahrt wird auf dem TU-Campus beginnen und wieder enden. Die Ausrüstung des Fahrzeuges ermöglicht die Aufzeichnung und statistische Auswertung wichtiger Fahrzeuggrößen. Neben Ihnen sitzt ein Betreuer, der Ihnen Streckeninformationen sowie Hinweise zum Ablauf gibt.*

*Bewegen Sie das Fahrzeug in derselben Weise, in der Sie auch Ihr Privatfahrzeug unter Einhaltung der StVO bewegen würden. Es wird nicht erwartet, die Fahrstrecke in möglichst kurzer Zeit zu durchfahren oder anderweitig „faberisches Können“ zu beweisen. Setzen Sie sich nicht unter Druck, gehen Sie an die Aufgabe gelassen heran! Die Ergebnisse werden vom Fahrzeughersteller und dem Systemlieferanten ernst genommen.*

<b>1. Sicherheit</b> („Waren Sie der Meinung, in allen denkbaren Situationen sicher abbremsen zu können?“)						
sehr unsicher	unsicher	eher unsicher	weder - noch	eher sicher	sicher	sehr sicher
1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
<b>2. Komfort</b> („War problemloses und anstrengungsfreies abbremsen möglich?“)						
sehr unkomfortabel	unkomfortabel	eher unkomfortabel	weder - noch	eher komfortabel	komfortabel	sehr komfortabel
1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
<b>3. Gesamteindruck / Zufriedenheit</b> (... mit der Bremse an sich)						
sehr unzufrieden	unzufrieden	eher unzufrieden	weder - noch	eher zufrieden	zufrieden	sehr zufrieden
1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
<b>4. Kraftaufwand</b>						
sehr hoch	hoch	eher hoch	weder - noch	eher gering	gering	sehr gering
1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
<b>5. Pedalwegniveau (zu lang/kurz...)</b>						
sehr lang	lang	eher lang	weder - noch	eher kurz	kurz	sehr kurz
1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
<b>6. Dosierbarkeit</b>						
sehr schlecht	schlecht	eher schlecht	weder - noch	eher gut	gut	sehr gut
1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
<b>7. Akzeptanz</b>						
Diese Bremseigenschaften würde ich mir für mein eigenes Fahrzeug wünschen						
1 <input type="checkbox"/> Ja      2 <input type="checkbox"/> Nein						
<b>8. Kommentar, Ungewöhnliches, Störscheinungen</b>						

Bild A18: Fragebogen