

# 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,  
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,  
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,  
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005  
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Helge Drumm  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau  
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

R. Trutschel / K. Augsburg / J. Sandler

## **Methoden und Erkenntnisse zur Komfortbewertung der Mensch-Maschine- Schnittstellen von Kfz-Betriebsbremsen**

### **ABSTRACT**

Die sichere Bewertung des Bremskomfort eines Pkw erfolgt erst am Komplettfahrzeug und damit innerhalb des Entwicklungsprozesses sehr spät. Da dieser Prozess mit hohen Unsicherheiten behaftet ist, werden keine optimalen Ergebnisse erzielt. Die Ursachen liegen u.a. im Fehlen von Grundlagenwissen über den Zusammenhang zwischen Subjektivurteil und objektiver Schnittstellencharakteristik sowie Methoden zur objektiven Spezifikation und Überprüfung der Umsetzung.

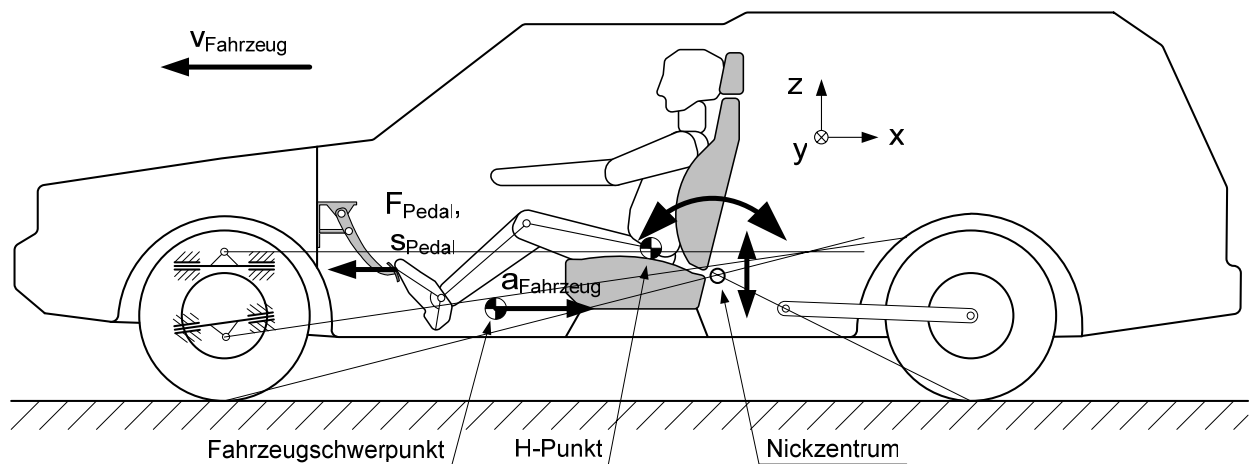
Am FG Kraftfahrzeugtechnik der TU Ilmenau wurden in den letzten Jahren Methoden sowie Mess- und Prüfeinrichtungen entwickelt, die den Umgang mit dem Fahrzeugmerkmal *Bremspedalgefühl* systematisieren und objektivieren. Das Ziel dieses Forschungsschwerpunktes ist einerseits die Verbreiterung der wissenschaftliche Basis und andererseits die Bereitsstellung von praxisgerechten Methoden und technischer Hilfsmittel für die automobiler Entwicklung.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf den Aufbau und den Einsatz des Forschungsfahrzeug *PEGASYS*. Es zeichnet sich durch eine frei programmierbare Bremspedalgefühlcharakteristik aus und ermöglicht statistische Fahrversuche im öffentlichen Straßenverkehr unter sehr realistischen Bedingungen. Vorgestellt werden statistische Daten zum Betätigungsverhaltens von Normalfahrern sowie die Ergebnisse aus Einzelparameterversuchen zum Subjektiv-objektiv-Zusammenhang. Die Forschungstätigkeit wird von industriellen Anwendern mit Interesse verfolgt und bereits die bisherigen Ergebnisse werden nachgefragt und angewandt.

## EINORDNUNG

Von einem modernen Pkw wird erwartet, dass er ein hohes Sicherheitsniveau mit einem hohen Komfortniveau verbindet. Von zentraler Bedeutung sind dabei die Mensch-Maschine-Schnittstellen, die mechanisch, akustisch oder optisch ausgeführt sein können. Im Mittelpunkt dieses Beitrages stehen die Mensch-Maschine-Schnittstellen der Betriebsbremse.

Die Betriebsbremse versetzt den Fahrer in die Lage, zu jeder Zeit die Geschwindigkeit eines rollenden Fahrzeuges zu halten oder zu verringern und ein stehendes Fahrzeug im Stillstand zu halten. Auf die Betätigung des Bremspedals reagiert das Fahrzeug mit der Auslenkung des Bremspedals sowie den Aufbaureaktionen Längsverzögerung, Nicken und Vertikalbewegung (Heben bzw. Senken).



**Abbildung 1:** Pedal- und Aufbaureaktion beim Betätigen des Pedals der Betriebsbremse

Die in der Literatur in diesem Zusammenhang verwendete Terminologie ist teilweise uneinheitlich. Im folgenden Text wird die objektive Charakteristik des Fahrzeuges mit dem Begriff *Bremspedalgefühlcharakteristik*, die subjektive Wertung dagegen mit dem Begriff *Bremspedalgefühl* bezeichnet. Während die objektive Bewertung von Sicherheitsmerkmalen der Bremse anhand ausgewählter Parameter und Kriterien noch vergleichsweise einfach möglich ist, stellt die Auslegung und Bewertung von Komfortmerkmalen den Entwicklungsingenieur vor große Probleme. Trotz zahlreicher Aktivitäten im industriellen und akademischen Umfeld existiert zur Zeit keine anerkannte Methodik, die die Bremspedalgefühlcharakteristik präzise beschreibt und das Subjektivurteil für ein breites Spektrum an Fahrer- und Fahrzeugtypen in Korrelation bringt. Daher können Hersteller und Zulieferer die sichere Beurteilung des Entwicklungserfolges erst am Komplettfahrzeug vornehmen. Konstruktive Korrekturen sind zu diesem Zeitpunkt nur mit hohem Aufwand und/oder in begrenztem Umfang möglich. Diese unbefriedigende Situation wird seitens

industrieller Anwender beklagt und der Bedarf nach systematischer Forschungsarbeit immer stärker benannt bzw. gefordert.

Am FG Kraftfahrzeugtechnik der TU Ilmenau wurden in den letzten Jahren im Auftrag und in Kooperation mit der Automobil- und Zulieferindustrie Methoden sowie Mess- und Prüfeinrichtungen entwickelt, die den Umgang mit dem „Fahrzeugmerkmal“ *Bremspedalgefühl* systematisieren, objektivieren und dazu beitragen sollen, die wissenschaftliche Basis dieser Thematik zu verbreitern. Die Auseinandersetzung mit dem Thema zeigte bereits zu Beginn den breiten fachlichen Umfang sowie die Notwendigkeit, auch die Bearbeitung inhaltlich zu zergliedern. Tabelle 1 enthält eine Auswahl der verschiedenen Teilaufgaben. In ihrer Gesamtheit bilden sie ein auf den gesamten Entwicklungsprozess (Spezifikation, Auslegung, Konstruktion, objektive und subjektive Analyse) anwendbares methodisches und technisches Instrumentarium.

Teilaufgabe		Methodik
1	Objektive, unverwechselbare Charakterisierung der Schnittstelle (Pedal- und Aufbaureaktion)	Betätigungsautomatik („Bremsroboter“)
2	Statistik zum Betätigungsverhalten des Normalfahrers im typischen Verkehrsgeschehen	Fahrten im realen Straßenverkehr mit speziellem Forschungsfahrzeug und statistische Auswertung – (Studie Typ A)
3	Zusammenhang zwischen Schnittstellencharakteristik und subjektiver Wertung	Parametrierung eines speziellen Forschungsfahrzeuges, Fahrten im realen Straßenverkehr und Befragung – (Studie Typ B)
4	Zusammenhang zwischen Schnittstellencharakteristik und Systemkonstruktion	Systemsimulation und experimentelle Parametrierung und Validierung

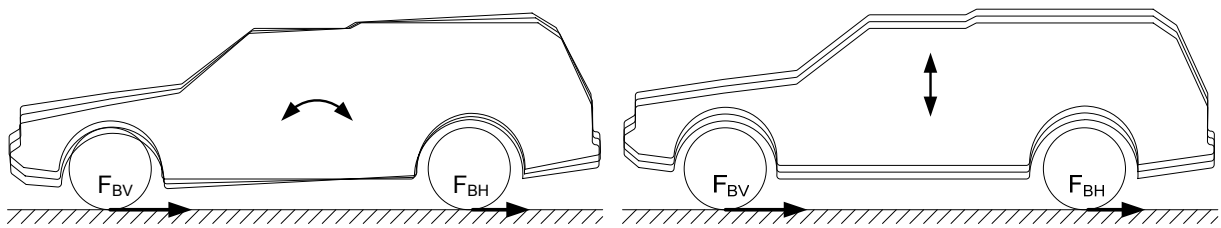
**Tabelle 1:** Teilaufgaben und methodische Ansätze zur Objektivierung des Bremspedalgefühles

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf folgende Schwerpunkte:

- Aufbau und Funktionsweise eines Forschungsfahrzeug mit vollvariabler Bremspedalgefühlcharakteristik (*PEGASYS*)
- statistische Analysen des Betätigungsverhaltens von Normalfahrern
- Subjektiv-objektiv-Fahrversuche zur Aufdeckung des Zusammenhanges zwischen Subjektivurteil und objektiver Charakteristik

## PEDALBETÄTIGTE VERZÖGERUNGSMODULATION

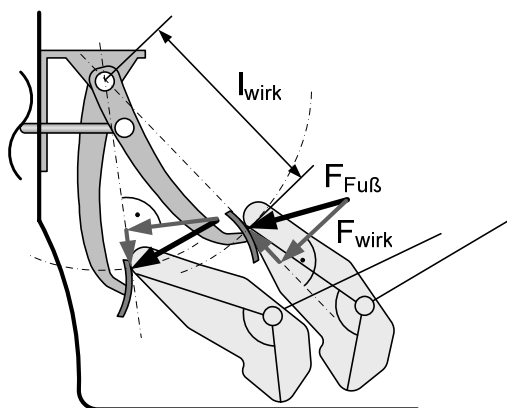
Weil es der unmittelbaren Beeinflussung der Fahrzeugbewegung dient, zählt das Bremspedal wie z.B. das Lenkrad und das Fahrpedal zur Gruppe der primären Bedienelemente. Betätigt der Fahrer bei Geradeausfahrt das Bremspedal reagiert das Fahrzeug zum einen mit der Auslenkung des Bremspedales und zum anderen mit der Verzögerung Fahrzeuges, die mit Nickbewegung um die y-Achse und einem Heben bzw. Senken des Fahrzeugaufbaus verbunden ist (Abbildung 2, Abbildung 4).



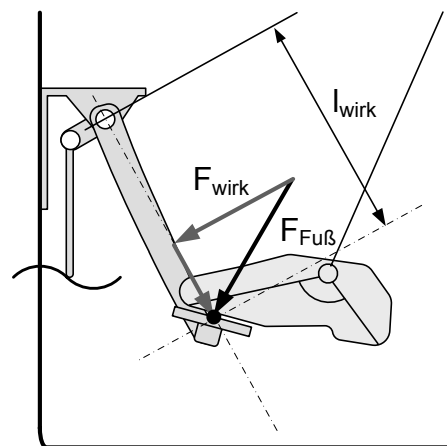
**Abbildung 2:** Zusammensetzung der Aufbaureaktion aus Drehung (y-Achse) und Vertikalbewegung (z-Achse)

Diese mechanischen Reaktionen geben dem Fahrer „haptisches“ bzw. „taktiles“ statisches und dynamisches Feedback über die von der Pedalbetätigung ausgelösten Fahrzeugreaktion. Die wesentliche Größen zur Beschreibung der Bremspedalgefühlcharakteristik sind die Pedalkraft, der Pedalweg sowie der Bremsdruck bzw. die Verzögerung des Fahrzeugschwerpunktes. Die Nickbewegung des Fahrzeugaufbaus wird zunächst vernachlässigt. Gleichwohl ist bekannt, dass diese Teilreaktion zur Ausbildung des Bremspedalgeföhles beiträgt und daher zukünftig in die Forschung mit einbezogen werden sollte. Die ergonomischen Verhältnisse der Pedalbetätigung illustriert Abbildung 4.

Pedalwerk und Ergonomie des PKW

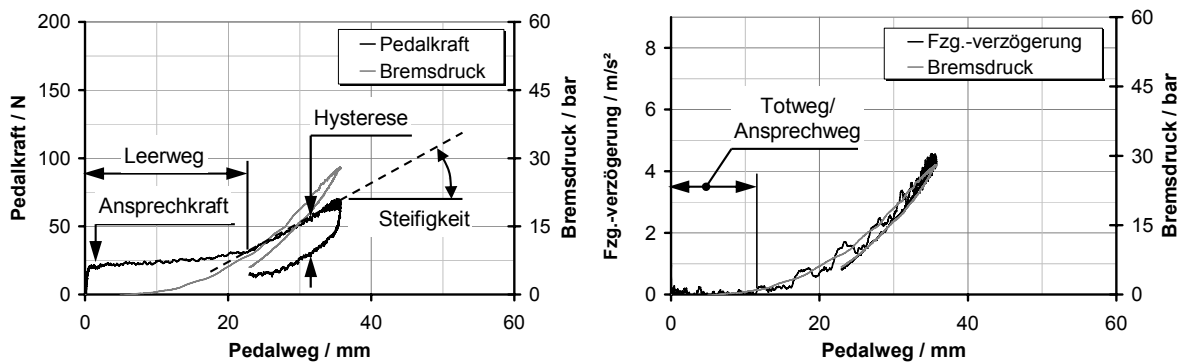


Pedalwerk und Ergonomie einiger LKW-Typen



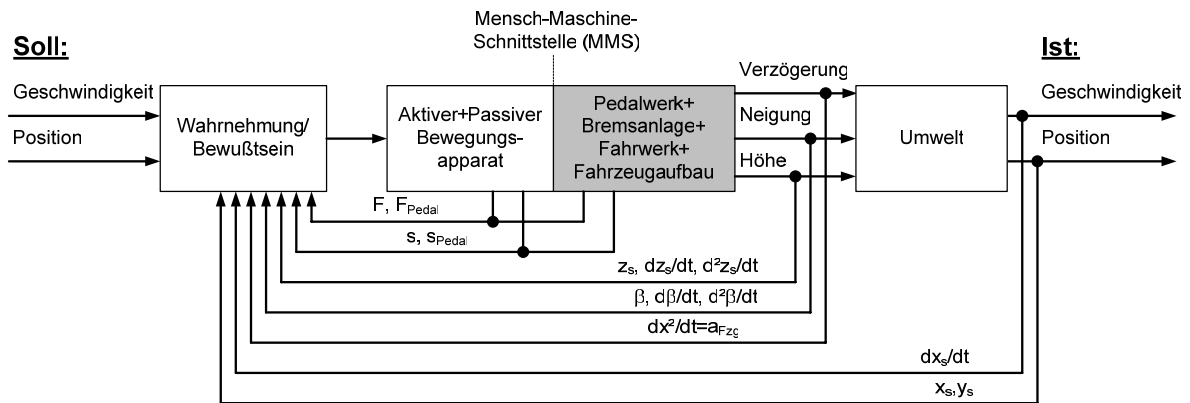
**Abbildung 3:** Beanspruchung der Bremsanlage ( $F_{wirk}$ ) und individuelle Beanspruchung ( $F_{Fu\beta}$ )

Die objektive Analyse und Spezifikation der Pedalcharakteristik verlangt Sorgfalt, weil zwischen dem technisch wirksamen Kraftanteil und der individuellen Anstrengung streng zu unterscheiden ist. Die schematische Darstellung der Kraftvektoren von Abbildung 3 verdeutlicht diese Problematik. Die die Pedalauslenkung verursachende Kraftkomponente  $F_{\text{wirk}}$  ist nicht identisch mit der äußeren, vom Fahrer ausgeübten und von ihm als Anstrengung wahrgenommenen Fußkraft  $F_{\text{Fuß}}$ . Diese Unterscheidung hat Konsequenzen für die Messtechnik und Messmethodik zur objektiven Charakteristik der Schnittstelle. Anhand der Wirkkraft kann die Pedalcharakteristik objektiv beschrieben werden, sie ist jedoch zur Beschreibung und Bewertung ergonomischer und biomechanisch-physiologischer Merkmale ungeeignet. Die Fußkraft wiederum ist bezüglich Ergonomie und Physiologie aussagekräftig, jedoch ungeeignet zur objektiven Charakterisierung des Pedals bzw. der Beanspruchung der Betätigungseinheit. Dies wird in der Praxis bei der Messung des „Bremspedalgeföhls“ häufig mißachtet. Die am FG KFT entwickelten Messmethoden für sowohl fußbetätigte als auch automatisierte Bremspedalbetätigung berücksichtigen diese Problematik, indem sie die Wirkkraft und die wirksame Länge  $l_{\text{wirk}}$  exakt messen. Alle am FG KFT entwickelten Methoden basieren auf dieser objektiven Definition und sind untereinander durchgängig kompatibel. Die Abbildung 4 zeigt beispielhaft Messungen der Bremspedalgeföhlscharakteristik eines Pkw einer automatisierten Stoppbremsung und nennt eine Auswahl wichtiger Parameter zur Beschreibung der Bremspedalgeföhlscharakteristik.



**Abbildung 4:** Messung von Pedalkraft, Pedalweg, Bremsdruck und Fahrzeugverzögerung einer Stoppbremsung

In Analogie zur Technik kann der Bremsvorgang als Ergebnis der geschlossenen Regelung des Systems Fahrer-Fahrzeug-Umwelt angesehen werden (Abbildung 5). Dieses komplexe System ist bis heute nur teilweise mit mathematischen Mitteln beschreibbar. Eine allgemeingültige Modellvorstellung existiert nicht.



**Abbildung 5:** Schematische Darstellung des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug-Umwelt

### FORSCHUNGSFAHRZEUG MIT VOLLVARIABLER PEDALGEFÜHLCHARAKTERISTIK (*PEGASYS*)

Abbildung 6 zeigt ein vom FG Kraftfahrzeugtechnik der TU Ilmenau entwickeltes Forschungsfahrzeug mit vollvariabler Bremspedalgefühlcharakteristik (*PEGASYS* – Pedalgefühl-Analyse-System). Dieses Fahrzeug ist mit einem Brake-by-Wire-Bremssystem ausgerüstet, das die drei Größen Pedalkraft, Pedalweg und Bremsdruck (bzw. Fahrzeugverzögerung) innerhalb eines großen Parameterraumes modellbasiert miteinander koppelt. Die Umrüstung erfolgte weitestgehend verdeckt, so dass der Charakter eines gewöhnlichen Serienfahrzeuges sowohl außen als auch im Innenraum erhalten blieb.



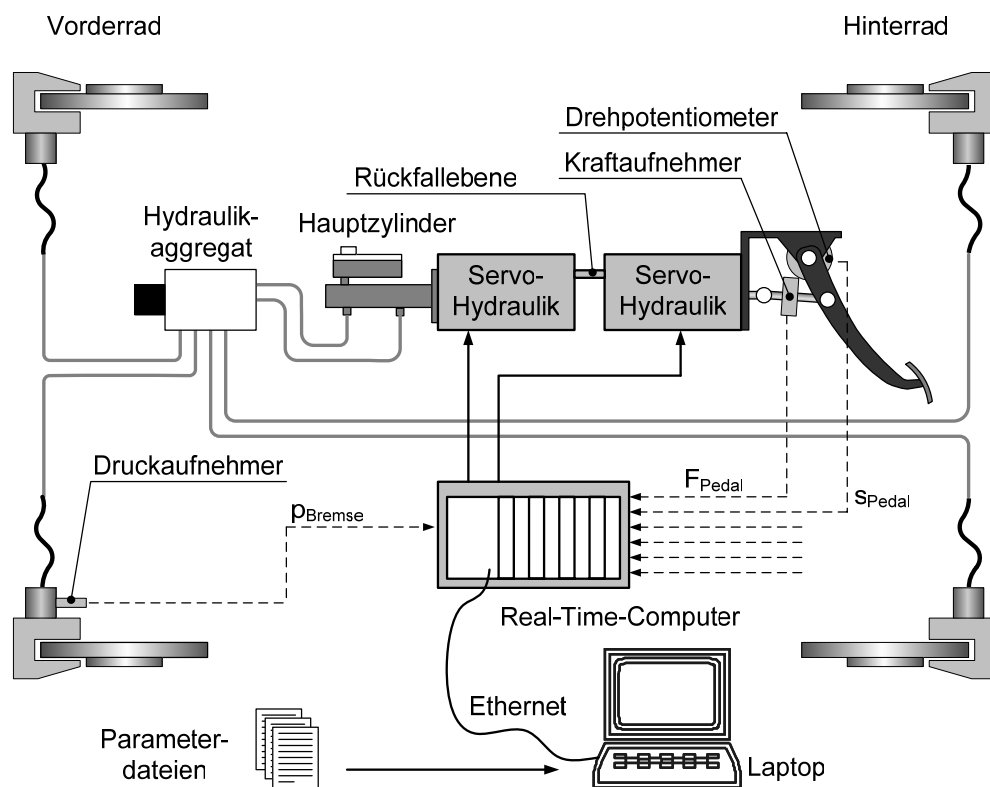
**Abbildung 6:** Forschungsfahrzeug *PEGASYS*

Die Charakteristikwechsel erfolgen augenblicklich und sind auch während der Fahrt möglich, es ist für den öffentlichen Straßenverkehr zugelassen und kann bedient werden wie ein gewöhnliches Serienfahrzeug. Parameterversuche zum Bremspedalgefühl sind unter diesen authentischen Bedingungen sehr aussagekräftig. Dagegen ist dies - falls überhaupt - im Fahrsimulator, bei



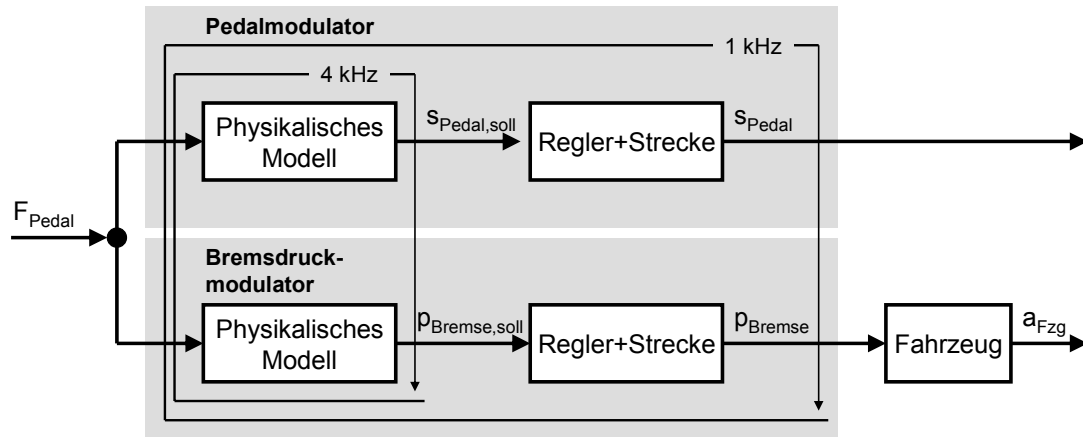
Fahrzeugwechsel oder zu hohen Zeitspannen zwischen den Subjektiveindrücken nur teilweise der Fall.

Die zentralen Baugruppen des Fahrzeuges sind zwei hochdynamische servohydraulische Modulatoren, die an Stelle des serienmäßigen Unterdruckbremskraftverstärkers (BKV) installiert wurden. Der Bremsdruckmodulator ist ein hydraulischer Linearantrieb, der den Kolben des Hauptbremszylinders (HBZ) betätigt, der Pedalmodulator eine Kombination aus Weg- und Druckmodulator. Beide Aktuatoren setzen ein virtuelles Modell der Bremspedalgefühlcharakteristik, das den Zusammenhang zwischen den Größen Pedalkraft, Pedalweg und Bremsdruck (bzw. Fahrzeugverzögerung) statisch und dynamisch beschreibt, technisch um. Aus der gewählten Parametrierung des Modells ergibt sich die spezielle Bremspedalgefühlcharakteristik. Das virtuelle Modell wird absolut authentisch umgesetzt.



**Abbildung 7:** Schematische Darstellung des Brake-by-Wire-Systems mit vollaktiven Bremspedal (Forschungsfahrzeug PEGASYS)

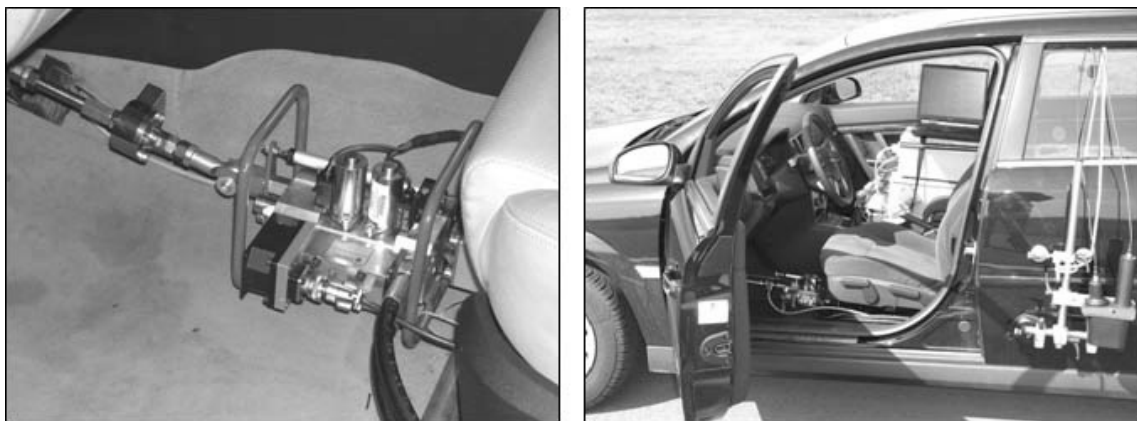
Die Signalverarbeitung basiert auf einem Real-Time-System. Die Zykluszeit der Regler beträgt  $f=1$  kHz. Darin eingebettet ist das physikalisch-mathematische Modell der virtuellen Pedalgefühlcharakteristik. Es wird mit  $f=4$  kHz numerisch berechnet und liefert die Sollwerte für beide Regler.



**Abbildung 8:** Signalfluss in *PEGASYS*

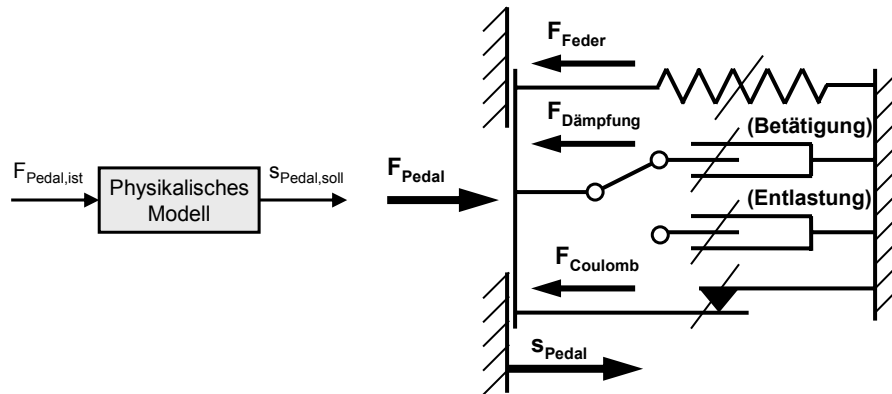
### STRUKTUR UND PARAMETRIERUNG DES VIRTUELLEN PEDALGEFÜHLCHARAKTERISTIK

Struktur und Parametrierung des virtuellen Pedalgefühlmodells wurden mit Methoden der experimentellen Systemidentifikation im Black-Box-Verfahren ermittelt. Die erforderliche Datenbasis bildeten Messungen mit mehreren Mittelklasse-Pkw, deren Bremspedal mit einer Betätigungsautomatik in stehendem und fahrendem Ausgangszustand mit unterschiedlichen Betätigungsmustern und unterschiedlicher Dynamik betätigt wurde.



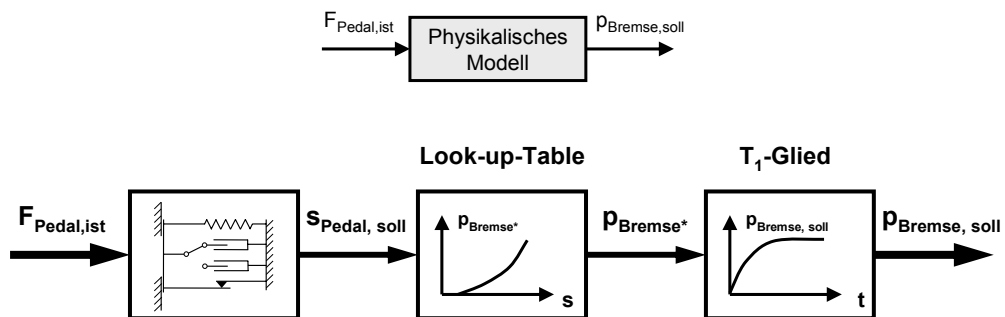
**Abbildung 9:** Betätigungsautomatik („Bremsroboter“) zur Messung der Bremspedalgefühlcharakteristik

Aus diesen Messwerten wurde die physikalisch-mathematische Struktur des virtuellen Modells abgeleitet und parametrierung. Die Pedalcharakteristik wird durch die Parallelschaltung einer Feder, eines Dämpfungs- und Reibelementes beschrieben. Alle drei Elemente können bezüglich Pedalweg beliebig nichtlinear parametrierung werden.



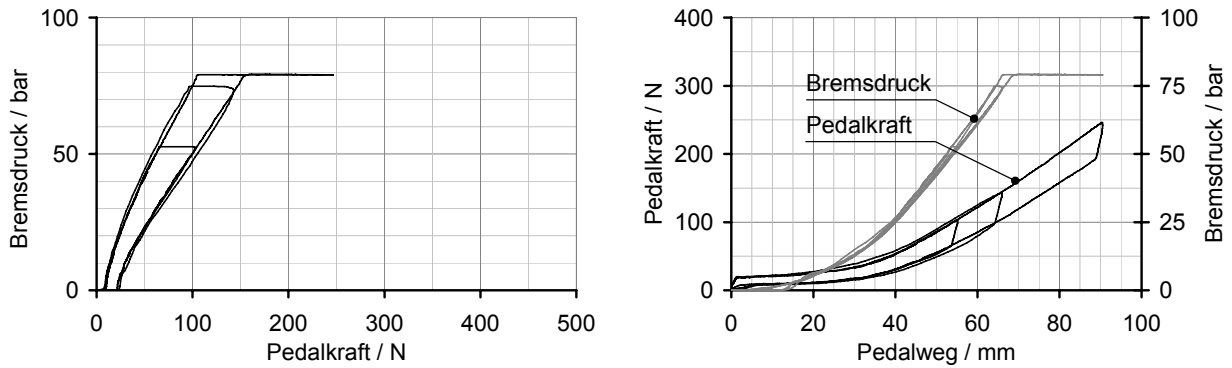
**Abbildung 10:** Virtuelle Pedalcharakteristik

Die Bremsdruck- bzw. Fahrzeugverzögerungscharakteristik wird durch die Ergänzung des Pedalmodells um ein statisches Kennfeld und ein Verzögerungsglied beschrieben. Zwar entspricht die Struktur beider Modelle nicht dem tatsächlichen technischen Aufbau der Bremsanlage bzw. des Fahrzeuges, jedoch ist sie von überschaubarer Komplexität, anschaulich sowie handhabbar und erlaubt dennoch die unverwechselbare Beschreibung der Bremspedalgefühlcharakteristik vieler Serienfahrzeuge.



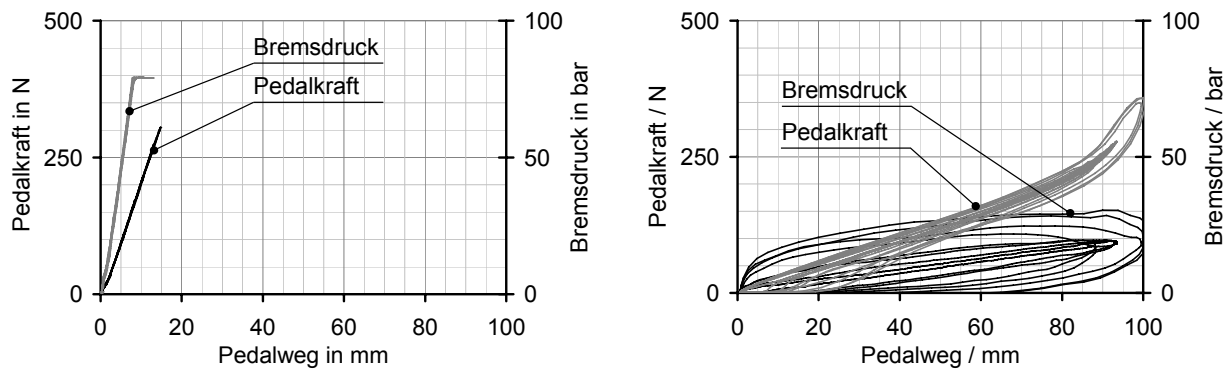
**Abbildung 11:** virtuelle Charakteristik der Bremswirkung

Zur Verfügung steht inzwischen ein erweitertes virtuelles Modell, das für einen größeren dynamischen Bereich gültig und insgesamt präziser ist. Die Auswahl der jeweiligen Modellstruktur ist ein Kompromiss zwischen hoher Simulationsgüte und geringem Parametrierungsaufwand. Die Abbildung 12 zeigt beispielhaft PEGASYS-Messwerte für eine Parametrierung, die einem modernen Mittelklasse-Pkw entspricht.



**Abbildung 12:** PEGASYS-Messwerte mehrerer Pedalbetätigungen mit der virtuellen Pedalgefühlcharakteristik eines modernen Serienfahrzeuges

Abbildung 13 zeigt Messungen mehrerer Pedalbetätigungen eines synthetisch „hart“ und „weich“ parametrisierten Pedals.



**Abbildung 13:** PEGASYS-Messungen synthetischer Pedalcharakteristiken (links: extrem „hartes“ Pedal ohne statische Hysterese und Dämpfung, rechts: extrem „weiches“ bedämpftes Pedal ohne statische Hysterese,  $v_{\text{pedal,max}}=700$  mm/s)

Die hydraulischen Modulatoren wurden inzwischen weiterentwickelt und in zwei weiteren Forschungsfahrzeugen installiert (LKW Klasse N2, PKW der oberen Mittelklasse). Mit der verbesserten Technologie werden Pedalgefühlcharakteristiken u.a. auch bei sehr hohen Pedalkräften, wie sie in Paniksituationen auftreten können ( $F > 500$  N), mit hoher Regelgüte umgesetzt. Die Grenzen des Fahrzeuges PEGASYS 1 nennt Tabelle 2.

Pedalsteifigkeit	$c_{\text{Feder}} > 0.3 \text{ N/mm}$
Pedalämpfung	$k_{\text{Stokes}}$ beliebig (Grunddämpfung $k_{\text{Stokes}} = 0.015 \text{ N/mm}$ )
Pedalreibung	$F_{\text{Coulomb}}$ beliebig, (Grundhysterese $F_{\text{Coulomb}} = \pm 2.5 \text{ N}$ )
Pedalkraft	$F_{\text{Pedal}} = 0..500 \text{ N}$
Pedalgeschwindigkeit	$v_{\text{Pedal}} = 0..1000 \text{ mm/s}$
Bremsdruck	$p_{\text{Brems}} = 0..80 \text{ bar}$

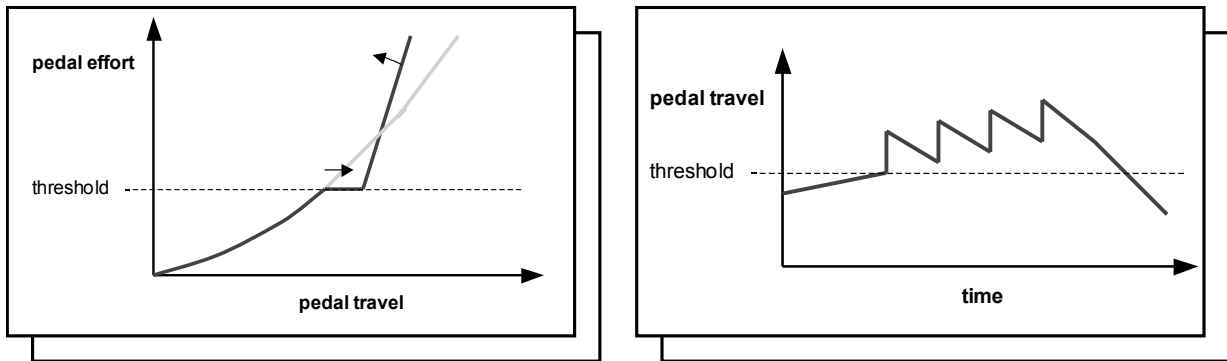
**Tabelle 2:** Parameterbereich der virtuellen Pedalgefühlcharakteristik des Forschungsfahrzeuges PEGASYS

Die Entwicklung und Erprobung der Forschungsfahrzeuge verdeutlichte die sehr hohe haptische Sensitivität des Menschen. Die Konsequenz für aktive Haptiksimulatoren zur absolut authentischen Reproduktion virtueller Modelle sind sehr hohe Anforderungen an die statische und insbesondere dynamischen Regelgüte. Diese wurde durch den Einsatz hochdynamischen Aktuatoren, präziser Sensorik, leistungsfähiger Real-Time-DAQ-Technik sowie einer zweckmäßigen Struktur und präzisen Parametrierung des virtuellen Modells der Bremspedalgefühlcharakteristik erreicht. Obwohl dies nicht primäres Entwicklungsziel von *PEGASYS* war, konnten aus der für die authentische aktive Haptiksimulation notwendigen Modellstruktur und Präzision der Parametrierung die Minimalanforderungen für eine objektive Beschreibung der Schnittstellencharakteristik direkt abgeleitet bzw. überprüft werden.

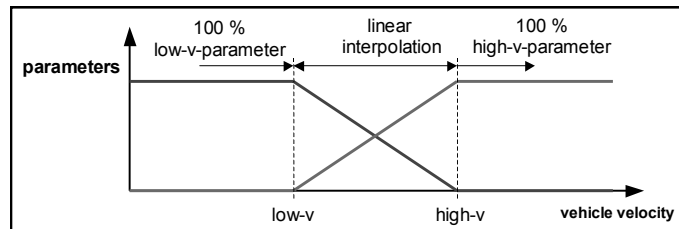
Mit dem Ziel konstruktionsbasierte virtuelle Modelle zu entwickeln, die mit der tatsächlichen Konstruktion der Bremsanlage korrespondieren, wurden inzwischen umfangreiche Komponenten- und Baugruppenmessungen durchgeführt und komplexe numerische Verhaltensmodelle geschaffen [6].

Zusätzlich zur Simulation der „normalen“ Bremspedalgefühlcharakteristik kann das Fahrzeug folgende haptische und adaptive Merkmale darstellen:

- bremsdruckabhängiges Aufprägen periodische Muster auf die Pedalcharakteristik (ähnlich „ABS-Pulsation“)
- bremdruckabhängiges Aufprägen eines einmaligen Ereignisses auf die Pedalcharakteristik
- fahrzeuggeschwindigkeitsabhängige Pedalgefühlcharakteristik
- Pedalgefühlcharakteristik in Abhängigkeit der Pedalantrittsgeschwindigkeit (z.B. für BAS-Funktion)



**Abbildung 14:** Addition einmaliger (links) und periodischer (rechts) haptischer Ereignisse zur Standard-Pedalgefühlcharakteristik



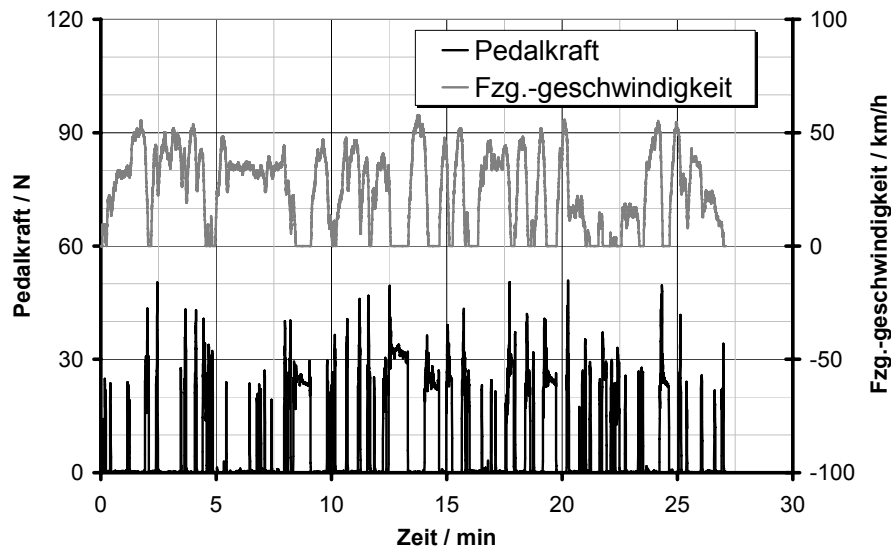
**Abbildung 15:** Adaptivität der Pedalgefühlcharakteristik bezüglich Fahrzeuggeschwindigkeit oder Pedalantrittsgeschwindigkeit

## STATISTIK DES BETÄTIGUNGSVERHALTENS VON NORMALFAHREREN (STUDIE TYP A)

Das durchschnittliche Betätigungsverhalten des Normalfahrers hat Auswirkungen auf die Spezifikation der Messtechnik, die Benennung des erforderlichen Gültigkeitsbereiches von vereinfachten und komplexen numerischen Verhaltensmodellen, die Auswahl und Interpretation von Parametern bzw. Versuchsergebnissen von Subjektiv-Objektiv-Fahrversuchen u.a. Da die Literatur keine aussagekräftigen Werte liefert, wurden mit dem Forschungsfahrzeug *PEGASYS* eigene, statistisch belastbare Messungen durchgeführt .

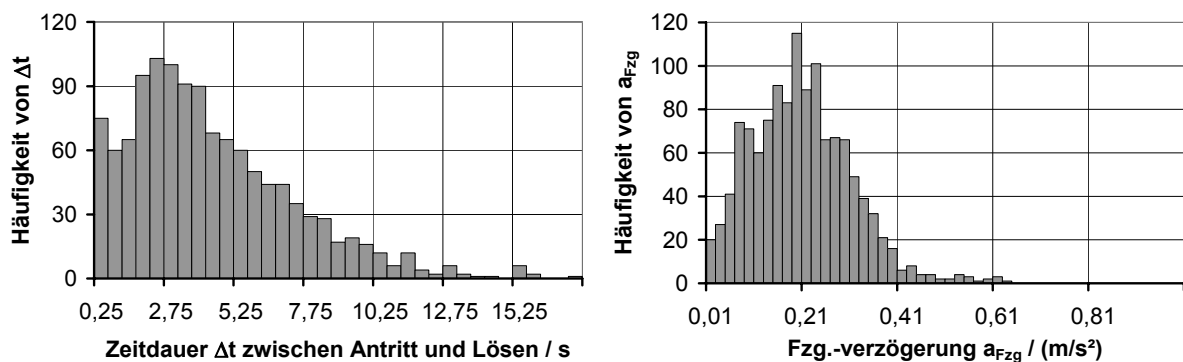
Dazu wurden ca. 20 Probanden im Alter zwischen 20 und 63 Jahren gebeten einen Stadtkurs in Begleitung eines Beifahrers zu befahren. Die Aufgaben bestand darin, mehrere Standorte nacheinander anzufahren, wobei ein Teilabschnitt zweimal befahren wurde. Insgesamt dauerten die Fahrten jeweils ca. 30 Minuten. Als Hintergrundinformation wurde ihnen lediglich mitgeteilt, dass

das Fahrzeug zu Forschungszwecken einer gewöhnlichen Belastung ausgesetzt werden soll. Allen Teilnehmern war das zu befahrende Stadtgebiet bekannt. Die Datenaufzeichnung begann nach einer fünfminütigen Gewöhnungsfahrt. Im Anschluss an die Stadtdurchfahrt wurde das Fahrzeug mehrfach parkiert. Den zeitlichen Verlauf von zwei Messgrößen einer vollständigen Stadtfahrt zeigt beispielhaft Abbildung 16.



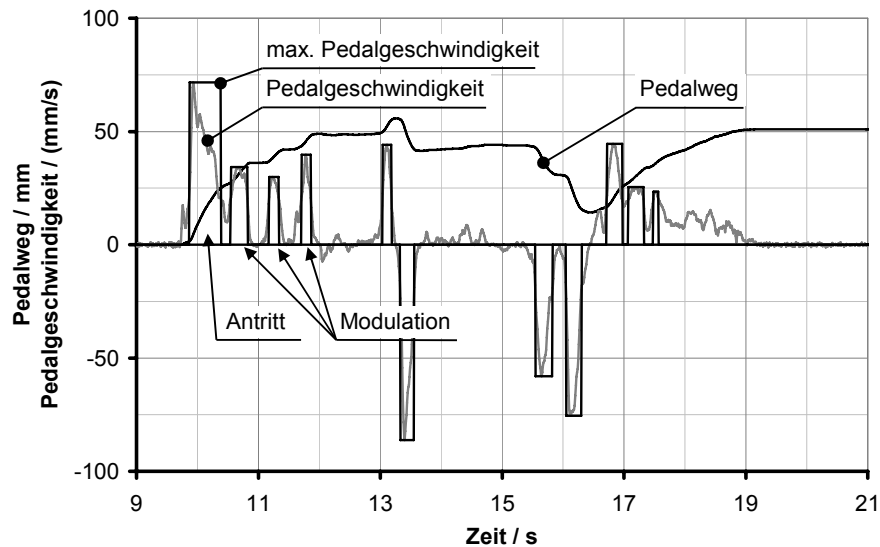
**Abbildung 16:** Zeitlicher Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Pedalkraft Fahrt im Stadtverkehr (Ilmenau)

Statistisch ausgewertet wurden u.a. die Größen Betätigungsdauer, -geschwindigkeit, -kraft, -weg, Fahrzeuggeschwindigkeit und Fahrzeugverzögerung. Die Abbildung 17 zeigt dies beispielhaft für die Betätigungsdauer (linkes Diagramm) sowie die maximal Fahrzeugverzögerung (rechtes Diagramm). Diese Auswertung ergibt ein umfassendes Bild des Betätigungsverhaltens.



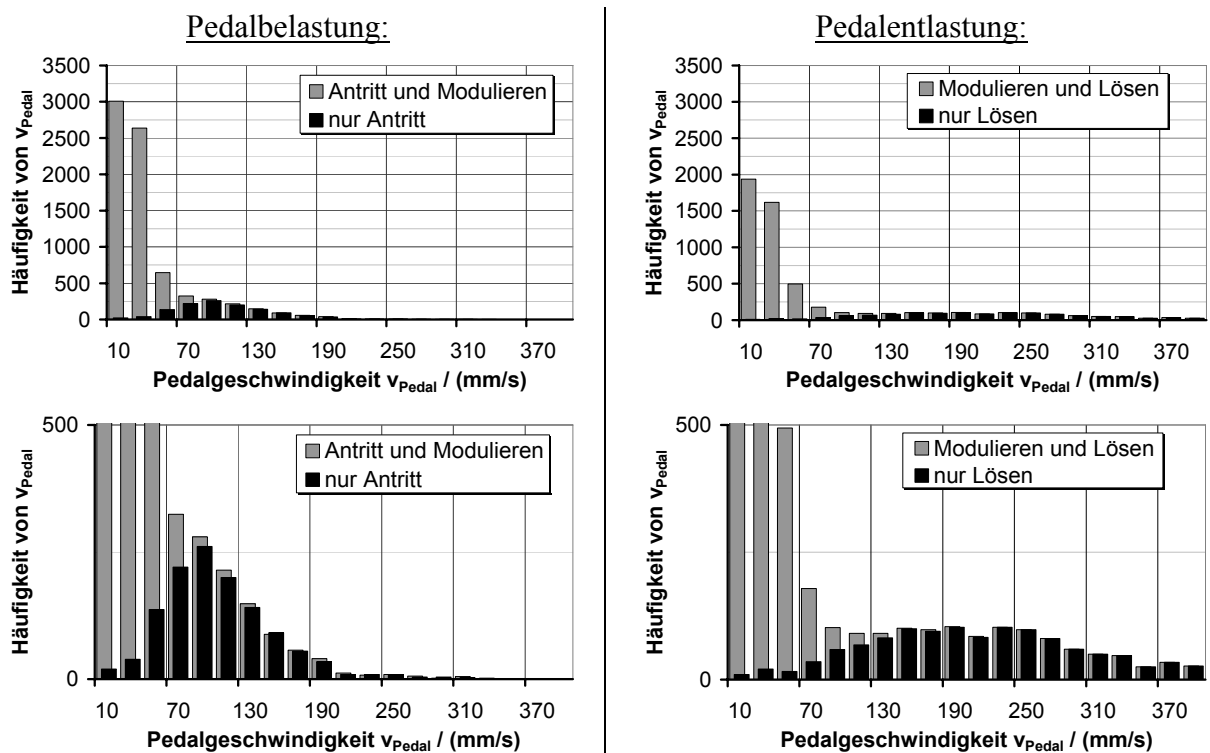
**Abbildung 17:** Statistische Auswertung der Betätigungsdauer und der maximalen Fahrzeugverzögerung aller Probanden

Darüberhinaus liefert der zeitliche Verlauf des Pedalweges sowie die statistische Auswertung der Pedalgeschwindigkeit wichtige Informationen zum Modulationsverhalten des Fahrers (Abbildung 18).



**Abbildung 18:** Pedalweg und Pedalgeschwindigkeit während der Pedalbetätigung einer längeren Gefällefahrt

Die Abbildung 19 zeigt die Verteilung der lokalen Pedalgeschwindigkeitsmaxima. Sie wurden für die Betätigungsbewegung ( $v_{\text{Pedal}} > 0$  mm/s) und Entlastungsbewegung ( $v_{\text{Pedal}} < 0$  mm/s) sowie für den Antritt (Pedal zu Beginn in Nullstellung) und die vollständige Pedalentlastung (Pedal am Ende in Nullstellung) getrennt ausgewertet.



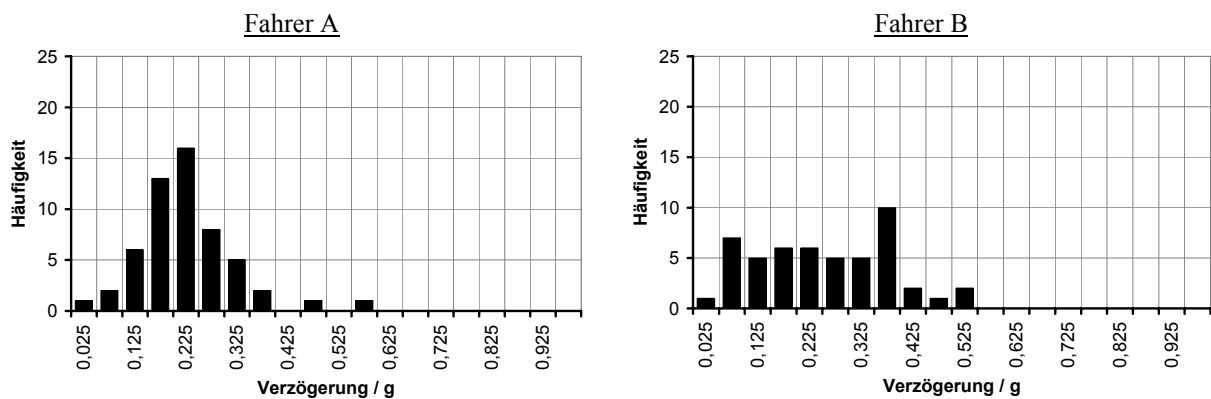
**Abbildung 19:** Häufigkeitsverteilung der maximalen Pedalgeschwindigkeiten pro Betätigung im Stadtverkehr von 20 Fahrern (grau - alle Pedalbewegungen, schwarz - nur Antritt bzw. Lösen)



Die Auswertung liefert folgendes Ergebnis:

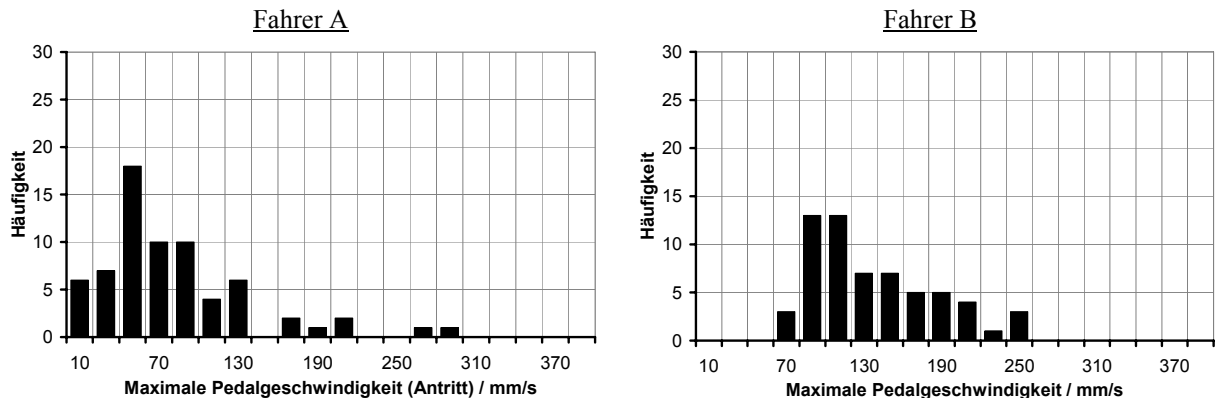
1. Zwischen dem Antritt und dem vollständigen Lösen treten eine Vielzahl von weiteren Pedalbewegungen auf („Modulation“).
2. Die Modulationsgeschwindigkeit liegt unter  $v_{\text{Pedal}}=70$  mm/s und ist damit deutlich geringer als die Geschwindigkeit während des Antritts (Häufigkeitsmittel:  $v_{\text{Pedal}}=100$  mm/s) und des Lösens (Häufigkeitsmittel:  $v_{\text{Pedal}}=210$  mm/s).
3. Die Pedalgeschwindigkeit liegt im Modulationsbereich unter  $v_{\text{Pedal}}=70$  mm/s und für Be- und Entlastung unter  $v_{\text{Pedal}}=210$  mm/s.
4. Die Geschwindigkeit des Pedalentlastens ist deutlich höher als die des Pedalantritts.
5. Die Anzahl der Bewegungen zur Pedalbelastung ist höher als jene zur Pedalentlastung.

Die statistischen Auswertungen haben gezeigt, dass es sowohl Parameter mit stark fahrerabhängiger als auch Parameter mit nahezu fahrerunabhängiger Häufigkeitsverteilung existieren. Dies ist hinsichtlich einer möglichen Fahrertypklassifizierung und Korrelation mit der subjektiven Wertung von Bedeutung. Die Abbildung 20 zeigt dies beispielhaft für die maximal pro Betätigung erreichte Fahrzeugverzögerung. Während es bei einem Fahrer ein ausgeprägtes Häufigkeitsmaximum gibt (linkes Digramm), ist die Verteilung bei einem zweiten Fahrer über einen großen Bereich gleichmäßig (rechtes Diagramm).



**Abbildung 20:** Häufigkeitsverteilung der max. Fahrzeugverzögerung pro Betätigung von zwei unterschiedlichen Fahrern

Die Abbildung 21 zeigt die Verteilung der Antrittsgeschwindigkeit zweier Fahrer. Das linke Diagramm zeigt tendenziell „langsame“, das rechte Diagramm „schnelle“ Betätigungen.



**Abbildung 21:** Häufigkeitsverteilung der Pedalgeschwindigkeit beim Antritt von zwei unterschiedlichen Fahrern

Ob und in welchem Maße dies mit dem Wertungsverhalten korreliert, ist Gegenstand der aktuellen Forschung.

### **SUBJEKTIVURTEIL IN ABHÄNGIGKEIT DER CHARAKTERISTIK UND FAHRSITUATION (STUDIE TYP B)**

Für die zielgerichtete Auslegung des Komforts einer Bremsanlage ist es erforderlich, den Zusammenhang zwischen subjektivem Urteil und objektiver Schnittstellencharakteristik zu kennen. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen eines zweiten Types von Fahrversuchen mit dem Forschungsfahrzeug PEGASYS statistisch aussagekräftige Einzelparameterversuche durchgeführt. Die Versuchsreihen beinhalteten u.a. folgenden Schwerpunkte bzw. Fragestellungen:

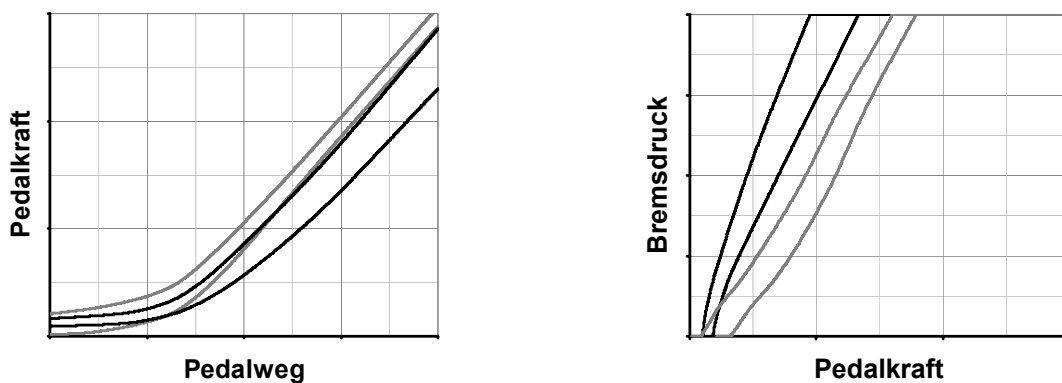
- Reproduzierbarkeit des Subjektivurteils einer anerkannt sehr guten und einer durchschnittlichen Pedalgefühlcharakteristik in der selben Fahrzeugumgebung?
- Übereinstimmung des Urteils von professionellen Testfahrern mit statistisch belastbaren Aussagen von Normalfahrern?
- Subjektivurteil bei gleicher Bremspedalgefühlcharakteristik, aber unter unterschiedlichen Fahrsituation (Parkieren, Stopp&Go, Stadtverkehr, Autobahn)?
- Subjektivurteil in der gleichen Fahrsituation aber mit unterschiedlicher Bremspedalgefühlcharakteristik (Bremswirkung, Leerweg, Hysterese, Dämpfung, Pedalsteifigkeit , u.a.)?
- Potenzial zur Komfortsteigerung durch geschwindigkeitsadaptive Pedalgefühlcharakteristiken?
- Potenzial und Akzeptanz der Informationsvermittlung durch haptische Zusatzsignale

über das Bremspedal (einmalige Ereignisse vs. periodische Ereignisse, Frequenz, Amplitude, Muster)?

- Grundlagenuntersuchungen zum Wertungsverhalten der Versuchspersonen:
  - ändert sich das Urteil innerhalb einer halb- bis einstündigen Fahrt?
  - Welchen Einfluss hat die Lage der Bereichsgrenzen bei abgestuften Einzelparameterversuchen auf das Subjektivurteil?
  - Welchen Einfluss hat eine Pedalcharakteristik auf das Urteil zur nachfolgenden Charakteristik?)
- Optimaler Ablauf von Subjektiv-objektiv-Fahrversuchen
  - alle Charakteristiken nacheinander ohne vorherige Kenntniss zur oder
  - erst alle Charakteristiken ohne Bewertung und anschließend mit Wertung oder
  - freie Reihenfolge nach dem Willen des Probanden?

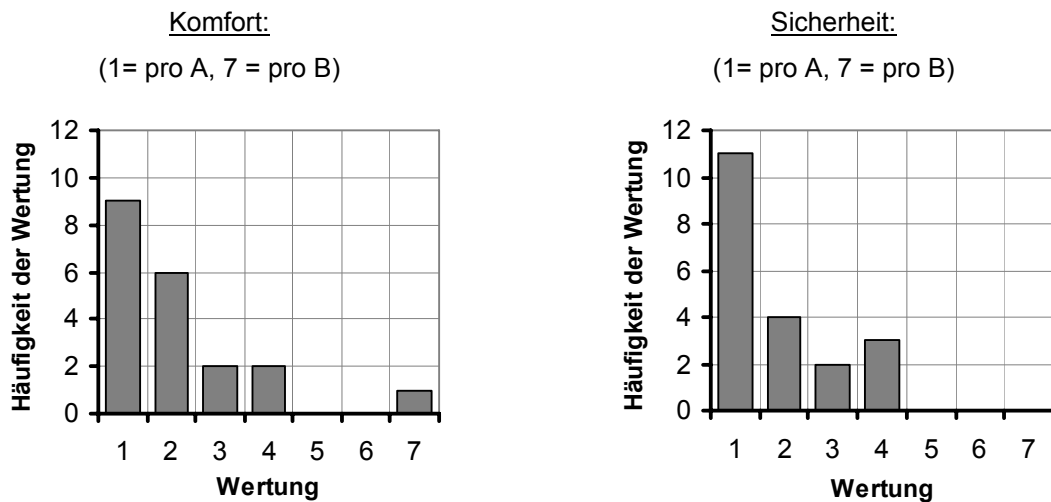
Ausgewählte Ergebnisse werden nachfolgend kurz vorgestellt.

Die Diagramme der Abbildung 22 zeigen die  $F_{\text{Pedal}}-S_{\text{Pedal}}$ - und  $p_{\text{Bremsse}}-F_{\text{Pedal}}$ -Parametrierung einer im Originalfahrzeug sehr gut bewerteten Charakteristik (A) sowie einer im Originalfahrzeug durchschnittlich bewerteten Charakteristik (B).



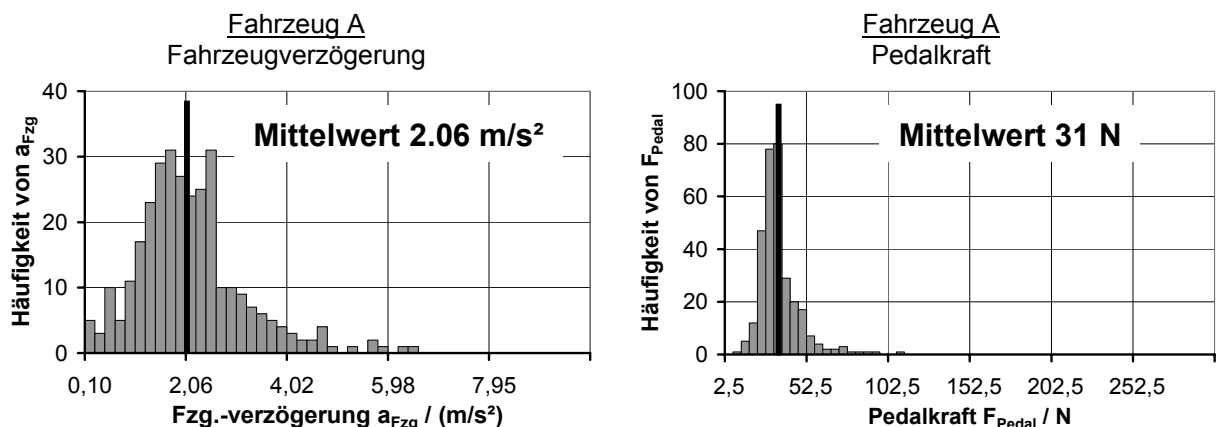
**Abbildung 22:** Parametrierung der Pedalgefühlcharakteristik für Fahrzeug A (schwarz) und Fahrzeug B (grau)

Beide Charakteristiken waren von Probanden im Anschluss an zwei Fahrten mit *PEGASYS* im Stadtverkehr zu bewerten. Die Abbildung 19 zeigt die Verteilung der Wertungen. Das Gesamturteil erwies sich als identisch zu den Wertungen, die bisher nur für die Originalfahrzeuge ermittelt wurden.

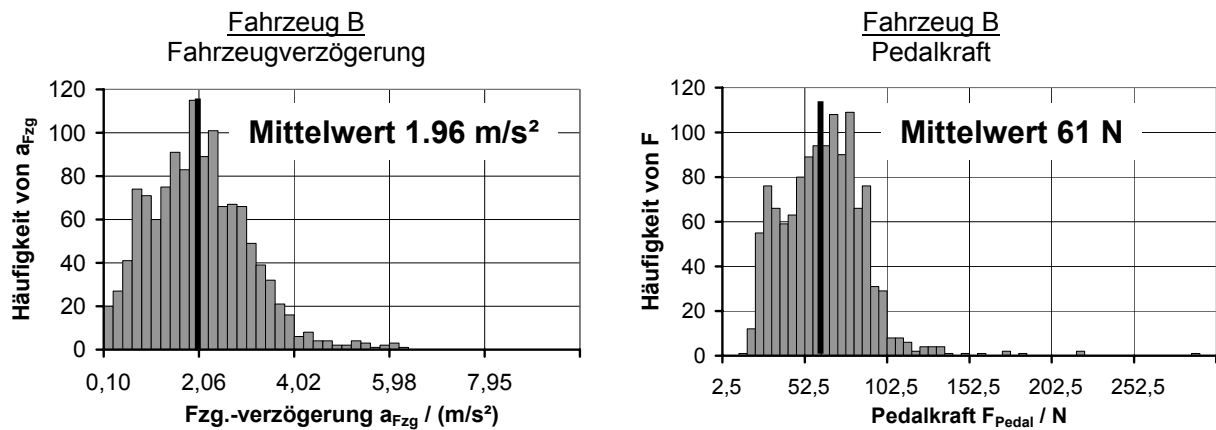


**Abbildung 23:** Häufigkeitsverteilungen der Wertungen bezüglich Komfort und Sicherheit

Dieses Ergebnis lässt nicht zwingend den Schluss zu, dass die Bewertung der Bremspedalgefühlcharakteristik stets unabhängig von der Fahrzeugumgebung erfolgt. Dies gilt zunächst nur für diesen speziellen Fall und sollte in weiteren Versuchen detaillierter untersucht werden. Die statistische Auswertung zeigt ferner, dass die maximale Fahrzeugverzögerungen pro Betätigung ( $a_{Fzg}=2.06 \text{ m/s}^2$  und  $a_{Fzg}=1,96 \text{ m/s}^2$ ) nahezu unabhängig von der Charakteristik ist. Dagegen weichen die Parameter der Betätigungskräfte erheblich voneinander ab ( $F_{Pedal}=61 \text{ N}$  und  $F_{Pedal}=31 \text{ N}$ ). Die Fahrzeugverzögerung ist offenbar die primäre Zielgröße, die auch bei unterschiedlicher Bremspedalgefühlcharakteristik durch Adaption des Fahrers in einem typischen Wertebereich bleibt. Wichtig ist jedoch die Feststellung, dass das Komfortempfinden der Charakteristiken A und B sehr unterschiedlich ist.

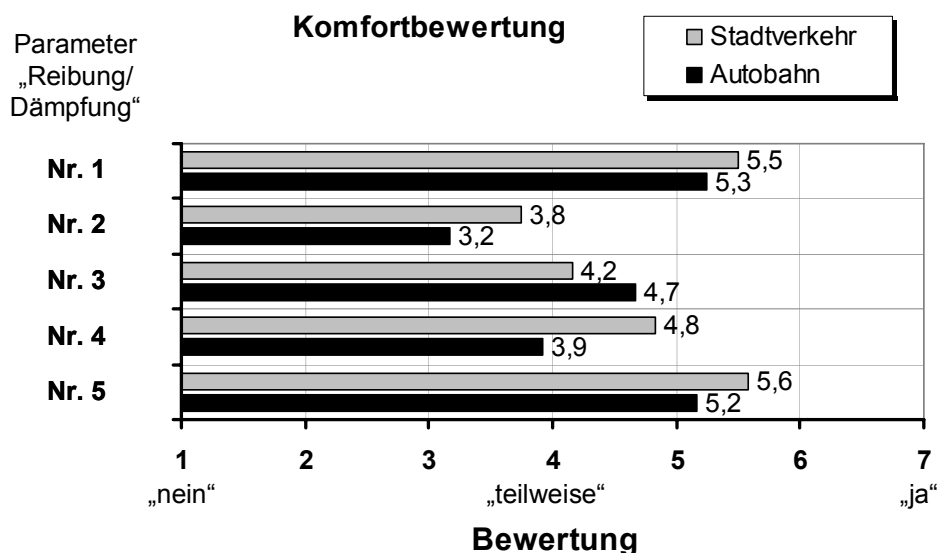


**Abbildung 24:** Häufigkeitsverteilung der Fahrzeugverzögerung und der Pedalkraft für Fahrzeug A (Gesamtauswertung der 30-minütigen Fahrt im Stadtverkehr von 6 Probanden)



**Abbildung 25:** Häufigkeitsverteilung der Fahrzeugverzögerung und der Pedalkraft für Fahrzeug B (Gesamtauswertung der 30-minütigen Fahrt im Stadtverkehr von 20 Probanden)

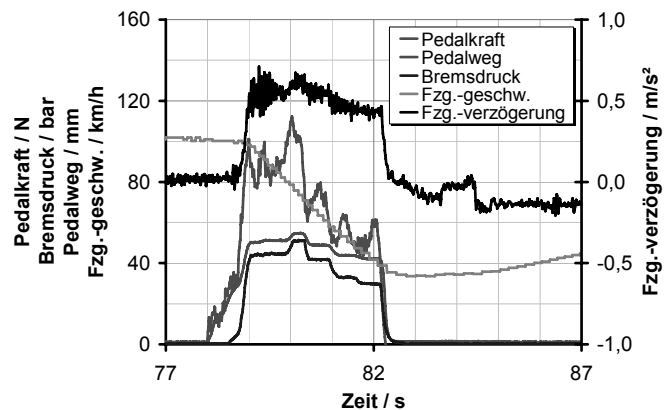
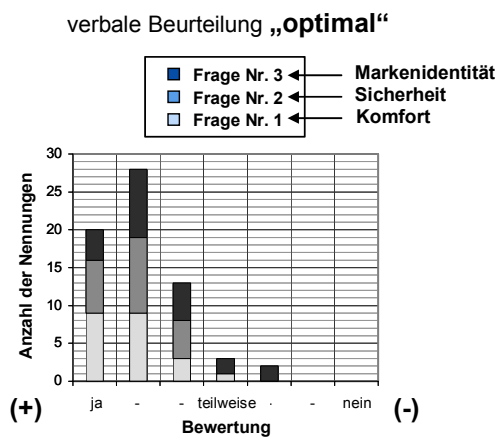
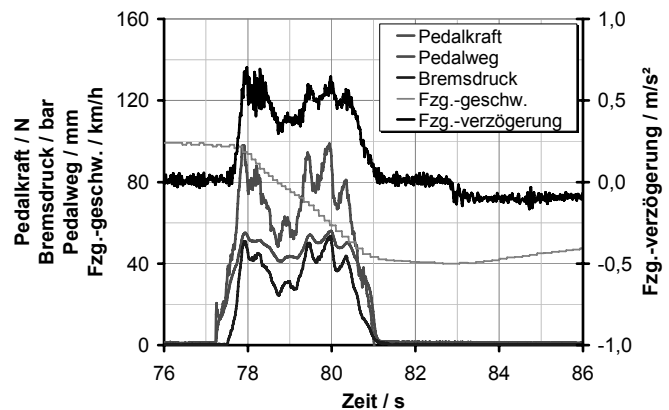
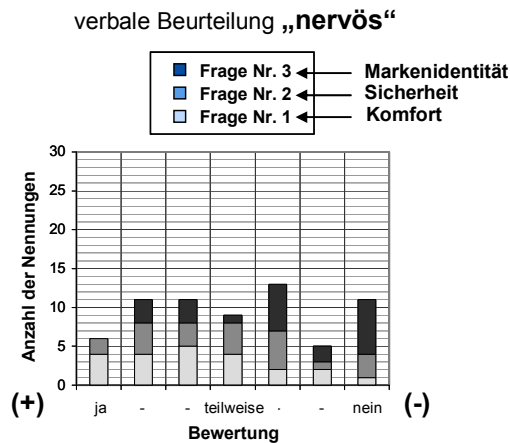
Die Abbildung 26 zeigt das die Komfortbewertung Parameter „Reibung/Dämpfung“ für die zwei Fahrsituation „Stadtverkehr“ und „Autobahnfahrt“. Gefragt wurde, ob ein hohes Maß an Komfort erreicht wird. Die Grafik zeigt, dass in Abhängigkeit der Parameterkombinationen die Wertung erheblich variiert, aber auch in Abhängigkeit der Fahrsituation Unterschiede bestehen. Allerdings können sehr hohe Wertungen in beiden Fahrsituationen mit einem festen Parametersatz erreicht werden. Vorteile einer Geschwindigkeitsadaptivität bestehen folglich nicht, wobei diese Einschätzung ausschließlich für die gewählten Parametersätze gilt und nicht allgemeingültig ist.



**Abbildung 26:** Bewertung unterschiedlicher Parametrierungen der Parameter „Reibung/Dämpfung“ in unterschiedlichen Fahrsituationen

Anhand des zeitlichen Verlaufes von Systemgrößen können subjektive Wertungen ebenfalls auf mögliche objektive Ursachen zurückgeführt werden. Die Abbildung 27 zeigt Messungen einer Anpassungsbremung sowie die Häufigkeitsverteilung der Wertung. Das verbal als „nervös“

bezeichnete Pedalgefühl zeichnet sich durch eine – auch bei kleinen Pedalkraftamplituden - direkte Reaktion der Größen Pedalweg, Bremsdruck und Fahrzeugverzögerung aus. Demgegenüber ist das als „komfortabel“ bezeichnete Pedal gegenüber Pedalkraftschwankungen unempfindlicher, weniger „direkt“ aber insgesamt „komfortabler“.



**Abbildung 27:** Wertung und zeitlicher Verlauf von Messwerten eines „nervösen“ und eines „komfortablen“ Bremspedalgefühles

## ZUSAMMENFASSUNG

Das FG Kraftfahrzeugtechnik hat die Forschungstätigkeit zum Thema *Bremspedalgefühl* in Teilaufgaben unterteilt und entwickelt Methoden und Hilfsmittel, die sowohl wissenschaftlichen als auch industriellen Ansprüchen gerecht werden. Das Forschungsfahrzeug *PEGASYS*, auf dessen Technologie inzwischen zwei weitere Fahrzeuge umgerüstet wurden, erlaubt modellbasiert die Variation der Bremspedalgefühlcharakteristik sowie die Aufzeichnung wichtiger längsdynamischer Größen. Es ist straßentauglich, entspricht vom Erscheinungsbild her dem unveränderten

Serienfahrzeug und lässt sehr aussagekräftige Probandenversuche zu. Mit diesem Fahrzeug wurden statistisch belastbar das Pedalbetätigungs- bzw. Bremsverhalten des Normalfahrers im Stadtverkehr analysiert. Die Daten werden berücksichtigt in Messverfahren zur Analyse der Schnittstellencharakteristik, bei der Festlegung des erforderlichen Gültigkeitsbereiches von numerischen Simulationsmodellen und können zur Klassifizierung und Modellierung des Fahrers bzw. seines Betätigungsverhaltens beitragen. Mit der Durchführung von Einzelparameterversuchen wurde begonnen, statistische Zusammenhänge zwischen der technischen Ausführung der Bremsanlage und dem Subjektivurteil aufzudecken. Deutlich wurde das Missverhältnis zwischen dem aktuellen Stand der Technik und dem tatsächlichen Umfang sowie der fachlichen Breite des Themas. Die bisher erarbeiteten Ergebnisse werden von industriellen Anwendern aus Entwicklung und Forschung nachgefragt und im Rahmen der Forschung und Produktentwicklung unmittelbar angewandt.

### **Literatur- bzw. Quellenhinweise:**

- [1] Augsburg, K.; Trutschel, R.: Entwicklungswerkzeuge zur objektiven Beschreibung des Bremspedalgefühls, VDI Fortschrittsberichte 12/514, Düsseldorf 2002
- [2] Augsburg, K.; Trutschel, R.: „Development Tools to Assist in the Objective Description of Brake Pedal Feel“, SAE Order No. R-352 SAE International, Warrendale, 2003
- [3] Sendler, J.; Trutschel, R.; Augsburg, K.: „Eine neuartige Methode zur objektiven Analyse der Bremspedalgefühlcharakteristik“. brems.tech 2004, München, 2004
- [4] Sendler, J.; Trutschel, R. ; Augsburg, K.: Ergonomie von Mensch-Maschine-Schnittstellen in Kraftfahrzeugen, 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 19.-23. September 2005
- [5] Sendler, J.; Trutschel, R. ; Augsburg, K.: Simulation des dynamischen Verhaltens von konventionellen Bremsanlagen und Fahrwerksystemen. 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 19.-23. September 2005
- [6] Trutschel, R.; Augsburg, K.; Simulationsmodell einer Pkw-Bremsanlage zur Identifikation und Optimierung des statischen und dynamischen Systemverhaltens, Symposium „Computer-Simulation in der Fahrzeugtechnik“, Graz Mai 2003
- [7] Trutschel, R.; Augsburg, K.: “Efficient experimental analysis tools for objective analysis of the brake pedal feel characteristic”, 22<sup>nd</sup> SAE Brake Colloquium & Exhibition, Anaheim/CA, 2004

### **Autorenangaben:**

Dipl.-Ing Ralf Trutschel\*  
Dipl.-Ing. Jan Sendler  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Augsburg

Technische Universität Ilmenau  
Fakultät für Maschinenbau  
Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik  
Gustav-Kirchhoff-Platz 2  
98693 Ilmenau

Tel.: 0 36 77 / 69 38 43  
Fax: 0 36 77 / 69 38 40  
E-mail: klaus.augsburg@tu-ilmenau.de

\* seit 01.03.2005:

GETRAG  
Getriebe- und Zahnradfabrik  
Hermann Hagenmeyer GmbH & Cie KG  
GETRAG InnovationsCenter  
74199 Untergruppenbach

E-mail: ralf.trutschel@t-online.de