

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>

J. Sandler / R. Trutschel / K. Augsburg

Ergonomie von Mensch-Maschine-Schnittstellen in Kraftfahrzeugen

ABSTRACT

Die sichere Bewertung des Bremskomfort eines Pkw erfolgt erst am Komplettfahrzeug und damit innerhalb des Entwicklungsprozesses sehr spät. Mit diesem ineffizienten Prozess werden keine optimalen Ergebnisse erzielt, da er mit hohen Unsicherheiten behaftet ist. 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 wissenschaftlichen Basis und andererseits die Bereitstellung von praxisgerechten Methoden und technischen Hilfsmittel für die Automobilentwicklung.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die experimentelle Analyse und die objektive Beschreibung der *Bremspedalgefühlcharakteristik*. Zu diesem Zweck wurde eine servohydraulische Betätigungsautomatik („Bremsroboter“) zur automatisierten Pedalbetätigung fahrender und stehender Fahrzeuge entwickelt. Anhand der Analysen mehrerer Mittelklasse-Pkw werden Strukturmodelle zur objektiven Spezifikation der Bremspedalgefühlcharakteristik abgeleitet.

EINORDNUNG

Von einem modernen Pkw wird erwartet, dass er ein hohes Sicherheitsniveau mit einem hohen Komfortanspruch verbindet. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Gestaltung der mechanischen Mensch-Maschine-Schnittstellen. Im Mittelpunkt dieses Beitrages stehen die Schnittstellen 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. Die Ursachen liegen in unzureichender Präzision, Objektivität und Eindeutigkeit der in der industriellen Praxis eingesetzten technischen und methodischen Analyseverfahren. Die in der Praxis angewandten Methoden sind hinsichtlich der Definition der Messgrößen, des Versuchsablaufes, der verwendeten Messgeräte und der Auswertung teilweise sehr unterschiedlich. Die Messergebnisse sind zur objektiven Beschreibung nur bedingt geeignet und die einzelnen Verfahren untereinander nicht vergleichbar. Das FG Kraftfahrzeugtechnik hat sich der Aufgabe gestellt, diese Thematik zu systematisieren, die wissenschaftliche Basis auszubauen und dem Praktiker technische und methodische Hilfsmittel bereitzustellen. Das Ziel ist die qualitative und quantitative Identifizierung der maßgebenden Merkmale und deren Darstellung mit geeigneten mathematisch-physikalischen Methoden.

Betätigt der Fahrer das Bremspedal, reagiert das Fahrzeug zum einen mit der Auslenkung des Pedals und zum anderen mit einer Bewegungs- und Orientierungsänderung des Fahrzeugaufbaus (Abbildung 1, Abbildung 2, Abbildung 3).

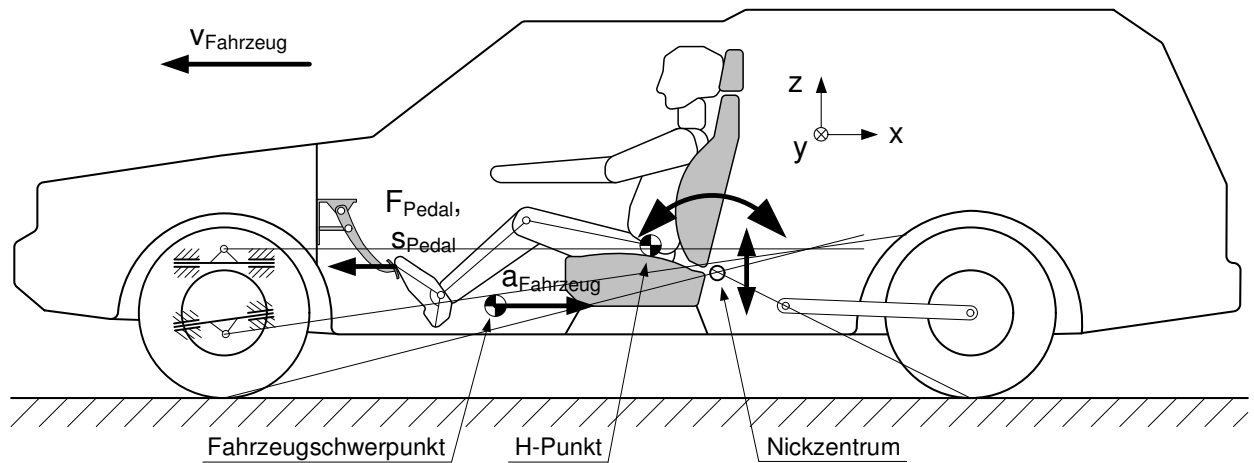


Abbildung 1: Pedal- und Aufbaureaktion beim Betätigen des Pedals der Betriebsbremse

Das Bremspedalgefühl ist folglich das Ergebnis der Wechselwirkung mehrerer Größen. Die Aufbaubewegung setzt sich bei Geradeausfahrt aus einer Nick- und Vertikalbewegung zusammen (Abbildung 2). Die Nickbewegung des Fahrzeugaufbaus wird zunächst auch im Rahmen dieses Beitrages vernachlässigt. Gleichwohl ist bekannt, dass diese Teilreaktion zur Ausbildung des Bremspedalgefühles beiträgt und daher zukünftig in die Forschung mit einbezogen werden muss.

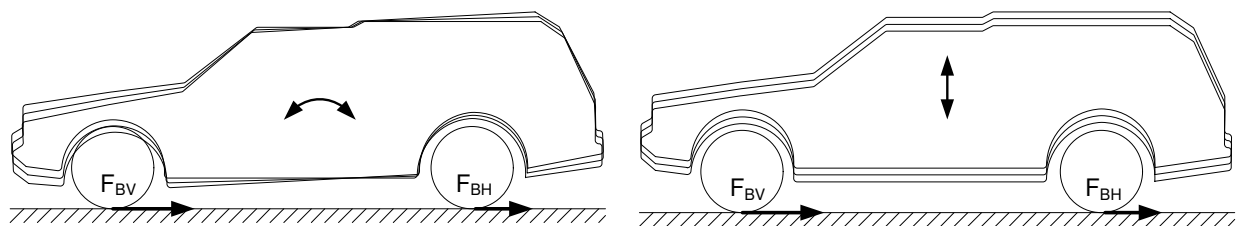


Abbildung 2: Zusammensetzung der Aufbaureaktion aus Drehung (y-Achse) und Vertikalbewegung (z-Achse)

Die Auslenkung des bei Pkw in der Regel drehbar gelagerten hängenden Pedals wird von der tangential angreifenden Wirkkraft verursacht.

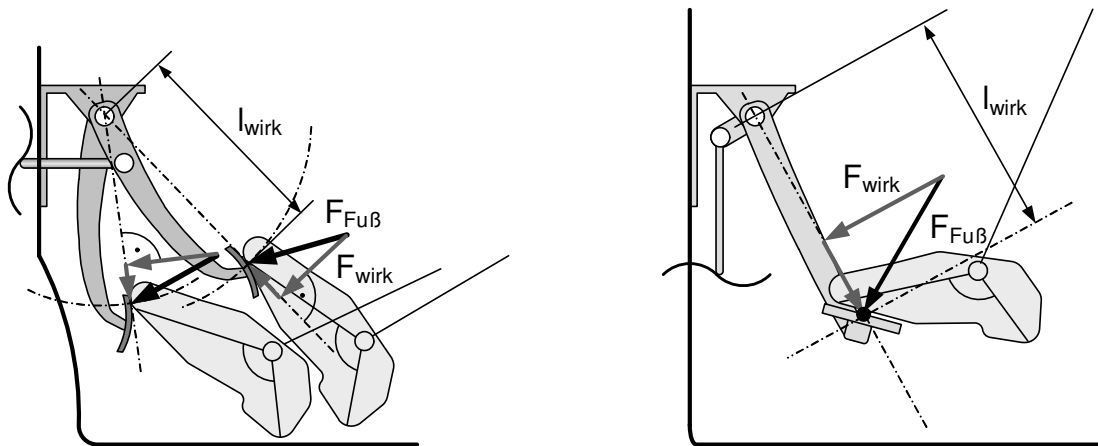


Abbildung 3: Unterscheidung zwischen der Beanspruchung der Bremsanlage F_{wirk} und der individuellen Fußkraft $F_{\text{Fuß}}$

Abbildung 4 zeigt Messungen zur Pedalgefühlcharakteristik und nennt einige gebräuchliche Merkmale und Begriffe deren Charakterisierung.

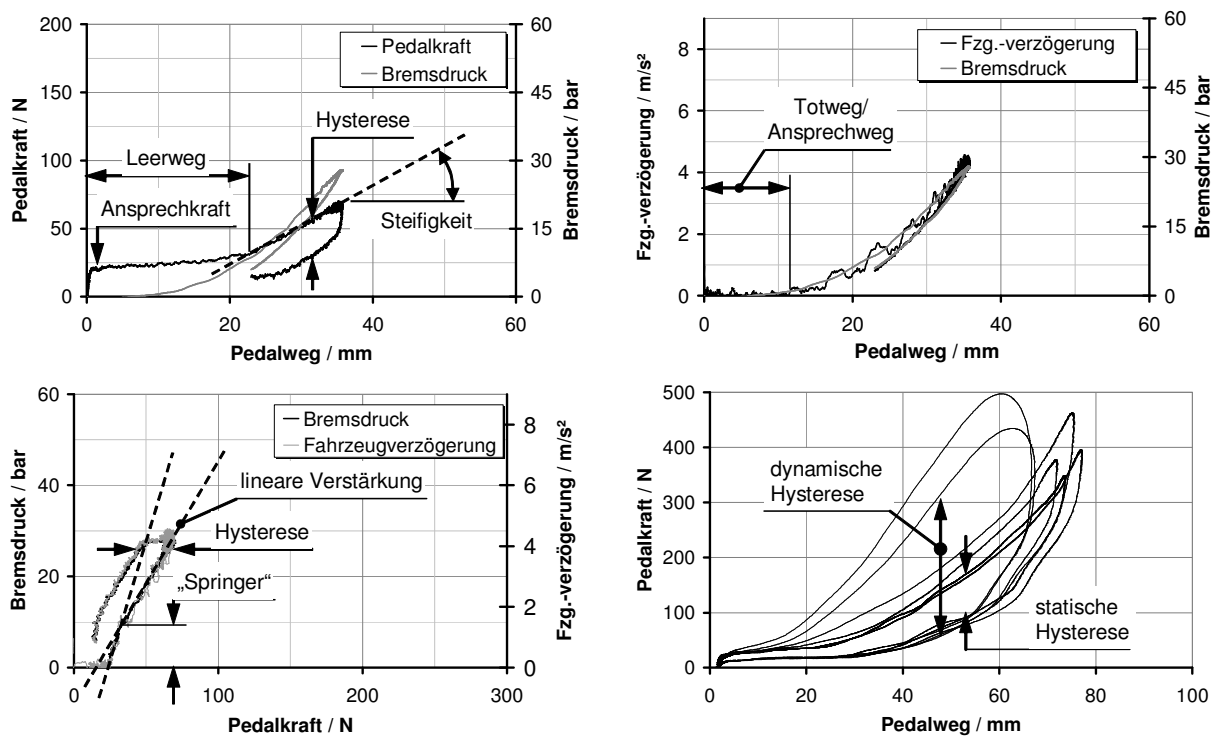


Abbildung 4: Messung von Pedalkraft, Pedalweg, Bremsdruck und Fahrzeugverzögerung einer Stoppbremsung

Anhand geeigneter Messungen ist eine äquivalente physikalisch-mathematische Beschreibungsform zu ermitteln, die die Bremspedalgefühlcharakteristik eindeutig und bezüglich des Subjektiveindruckes unverwechselbar beschreibt. Dies kann im einfachsten Fall im Black-Box-Verfahren erfolgen, bei dem ein Übertragungsmodell den Zusammenhang zwischen unabhängigen

Eingangs- und abhängigen Ausgangsgrößen beschreibt.

MESSUNG DER PEDALKRAFT

Besondere Sorgfalt erfordert der Umgang mit der Größe Pedalkraft, da zwischen der Wirkkraft F_{Wirk} und der Fußkraft $F_{\text{Fuß}}$ muss streng unterschieden werden. Objektiv bezüglich der Bremsanlagenbeanspruchung ist ausschließlich die Wirkkraft sowie die wirksame Hebellänge. Die Fußkraft kann in Abhängigkeit ergonomischer und physiologischer Verhältnisse deutlich höher sein und ist daher kein objektives Maß für die Bremspedalgefühlcharakteristik. In der industriellen Praxis wird dieser Unterschied jedoch häufig nicht beachtet (Abbildung 5).

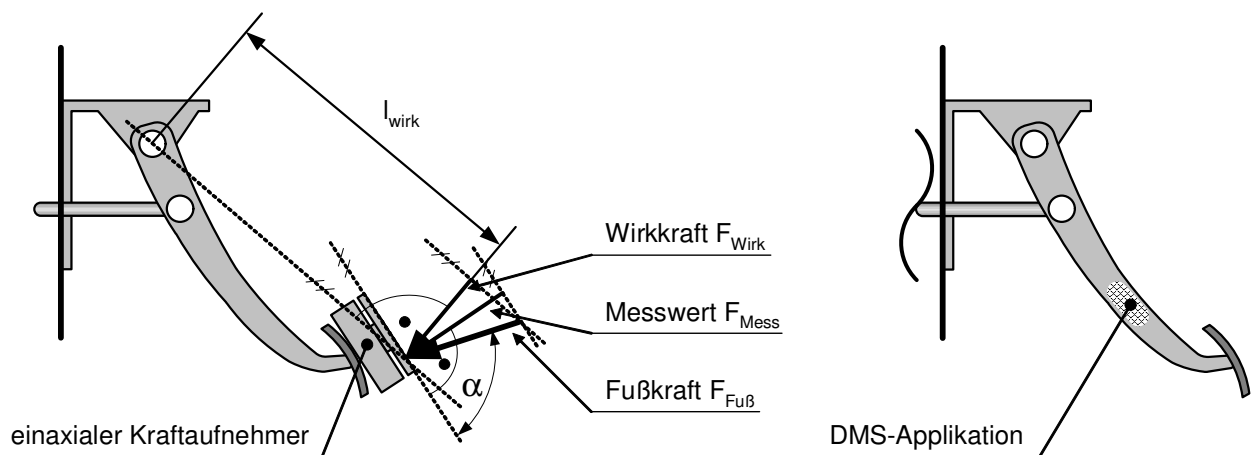


Abbildung 5: Pedalkraftmessung mit äußerem einaxialen Kraftaufnehmer + Trittplatte (links) und DMS-Applikation der Pedalstruktur (rechts)

Vielmehr wird sogar ausdrücklich angestrebt, anhand nur einer (!) Messgröße sowohl die Pedalcharakteristik als auch die individuelle Anstrengung zu bewerten. Dies ist prinzipiell ausgeschlossen, da die Fußkraft von der Sitzposition, der Fussposition u.a. abhängt und theoretisch nur als Spezialfall mit der Wirkkraft übereinstimmen kann. Beispiel für nicht objektive Methoden zeigt die Abbildung 5.

ANFORDERUNGEN

An die Messtechnik und die Messmethodik sind folgende Mindestanforderungen zu stellen:

- eindeutige und einheitliche Definition der Messgrößen insbesondere der Pedal- bzw. Bremsanlagenbeanspruchung

- zweckmäßige quasistatische und dynamische Betätigungsmuster
- hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Betätigungen
- Messungen am stehenden und fahrenden Fahrzeug

Alle am FG Kraftfahrzeugtechnik entwickelten Methoden und Verfahren zum Thema „Bremspedalgefühl“ basieren auf der Pedalkraftdefinition nach Abbildung 6.

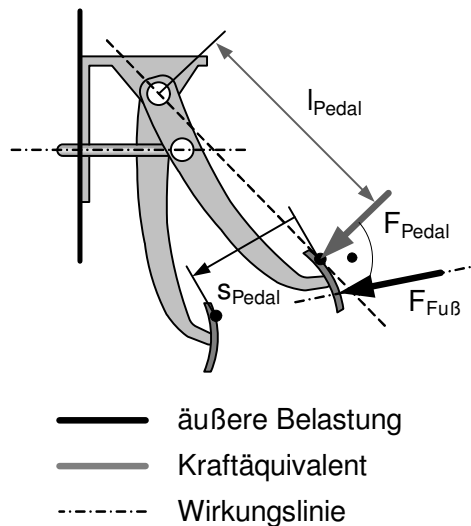


Abbildung 6: Definition der „Pedalkraft“ (=normiertes wirksames Kraftäquivalent der äußeren Belastung)

Die o.g. Anforderungen erforderten es, eine zunächst für Fußbetätigungen entwickelte Messanordnung durch eine Betätigungsautomatik („Bremsroboter“) zu ersetzen. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen die realisierten Pedalbetätigungsmuster zur Analyse fahrender und stehender Fahrzeuge. Die Dynamik bzw. die Betätigungsintensität wird von jeweils quasistatisch bis hochdynamisch ($v_{\text{Pedal}}=800 \text{ mm/s}$) und von geringer Bremsung bis hin zur Gefahrenbremsung variiert.

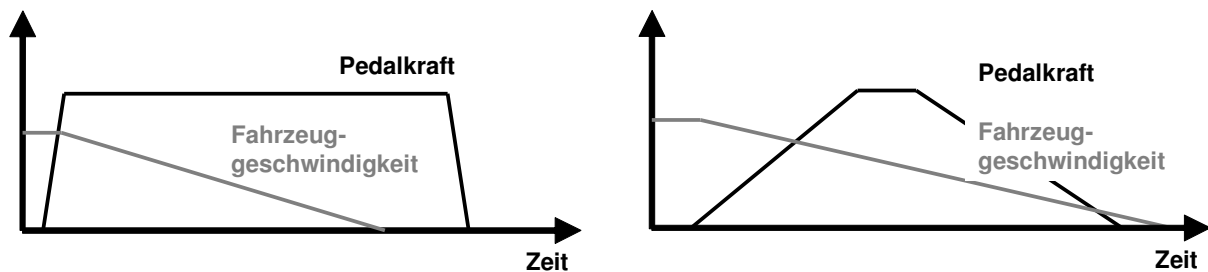


Abbildung 7: Betätigungsmuster zur Vermessung rollender Fahrzeuge

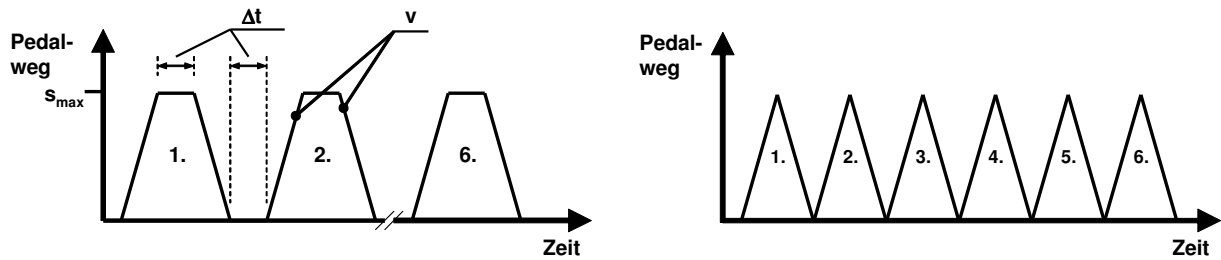


Abbildung 8: Betätigungsmuster zur Vermessung stehender Fahrzeuge mit konstanter Betätigungsgeschwindigkeit

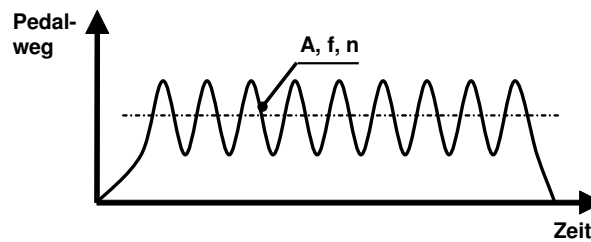


Abbildung 9: Betätigungsmuster zur Vermessung stehender Fahrzeuge mit pulsierender (sinusförmiger) Pedalbetätigung

GÜLTIGKEITSBEREICH

Die Spezifikation der Bremspedalgefühlcharakteristik muss zunächst mindestens den Bereich von Komfortbremsungen umfassen. Die Abgrenzung dieses Bereiches erfolgte anhand von statistischen Daten zum Fahrverhalten des Normalfahrers. Diese Daten wurden aus 30-minütigen Stadtfahrten von 20 Probanden gewonnen, die vom des FG Kraftfahrzeugtechnik der TU Ilmenau mit dem Forschungsfahrzeug *PEGASYS* durchgeführt wurden. Um absolut authentische Verhältnisse zu gewährleisten wurde das Brake-by-Wire-System von *PEGASYS* mit der Bremspedalgefühlcharakteristik des originalen Serienfahrzeuges parametrisiert. Aus der statistischen Auswertung dieser Messungen folgt, dass die maximale Fahrzeugverzögerung bzw. der maximale Bremsdruck pro Pedalbetätigung unter $a_{Fzg}=0.4 \text{ m/s}^2$ (Mittelwert $a_{Fzg}=0.2 \text{ m/s}^2$) bzw. unter $p_{Brems}=30 \text{ bar}$ liegt. Die Betätigungsgeschwindigkeiten erreichen nur beim vollständigen Lösen geschwindigkeiten von maximal $v_{Pedal}=200 \text{ mm/s}$. Beim Antreten und Modulieren liegen sie deutlich darunter.

UMSETZUNG MIT EINER SERVOHYDRAULISCHEN BETÄTIGUNGSAUTOMATIK („BREMSROBOTER“)

Der Aktuator der Betätigungsautomatik ist ein servohydraulischer Linearantrieb, weil er eine hohe Dynamik mit einer hohen Leistungsdichte verbindet und auch im mobilen Einsatz leicht handhabbar ist.



Abbildung 10: Betätigungsautomatik für Pedale

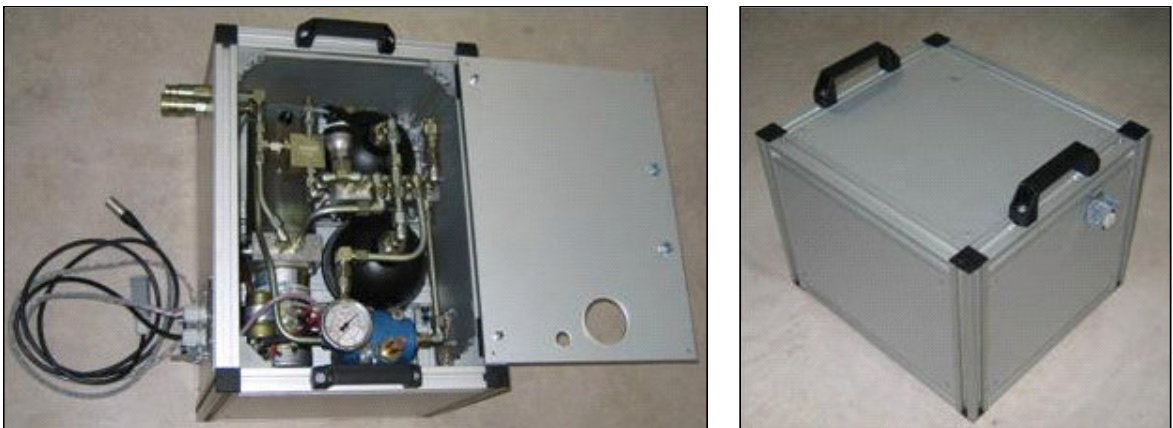


Abbildung 11: Druckversorgungseinheit (links) und Akkulatoreinheit (rechts)

Sie zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Mobile und stationäre Einsetzbarkeit (Verwendung für stehende und fahrende Fahrzeuge)
- weggeregelte oder kraftgeregelte Betätigungen
- standardisierte, frei parametrierbare Betätigungsmuster (Rampe, Oszillation...)
- hohe Reproduzierbarkeit der Betätigungen
- hohe Betätigungsdynamik (Pedalgeschwindigkeit >1000 mm/s), Betätigungskräfte (>1000 N) und Pedalwege (>150 mm)

- einfache Handhabung, modularer Aufbau, technisch ausbaufähig hinsichtlich Hardware und Software
- mehrere mechanische und softwareseitige Sicherheitsebenen zur Vermeidung von Personen- und Sachschäden infolge Fehlbedienung oder Komponentenausfall

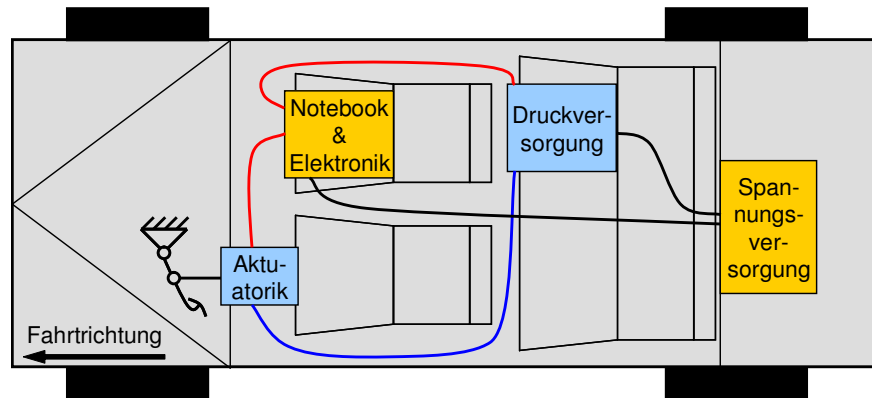


Abbildung 12: Module und deren Anordnung im Fahrzeug



Abbildung 13: Fahrzeug während einer Messung

MESSUNGEN

Analysiert wurden bisher folgende Fahrzeuge der unteren und oberen Mittelklasse:

1. BMW 330Ci
2. BMW 330i
3. Ford Focus
4. Ford Focus C-Max
5. Ford Mondeo

6. Ford Mondeo ST220
7. Mercedes E320
8. Mercedes E320 CDI
9. Opel Vectra

In Kürze werden die Untersuchungen mit Messungen an Fahrzeugen aus dem Segment der Kleintransporter fortgesetzt.

ANALYSE DES FAHRENDEN FAHRZEUGES

Das fahrende Fahrzeug wurde mit zwei verschiedenen Pedalbetätigungsmustern abgebremst. Zum einen wurde sehr schnell betätigt und anschließend die Kraft bis zum Fahrzeugstillstand konstant gehalten und zum anderen wurde die Pedalkraft vergleichsweise langsam rampenförmig erhöht und wieder verringert, wobei das Pedal vor dem Stillstand wieder vollständig entlastet war. Diese Betätigungen entsprechen industrieüblichen Verfahren, wobei die Betätigung in diesen Fällen von einem Testfahrer vorgenommen wird. Das Resultat dieser Messungen sind Informationen zur zeitlichen Konstanz der Messgrößen bei konstanter Pedalbelastung sowie zum Verlauf bei kontinuierlichen Änderung aller Größen.

Die beiden linken Diagramme von Abbildung 14 zeigen kraftgeregelte Messungen einer automatisierten Abbremsungen, die beiden rechten Diagramme die quantitativ besten Messungen eines Testfahrers. Erkennbar ist die deutlich bessere Regelgüte der automatisierten Abbremsungen gegenüber der fußbetätigten Abbremsung eines professionellen Testfahrers.

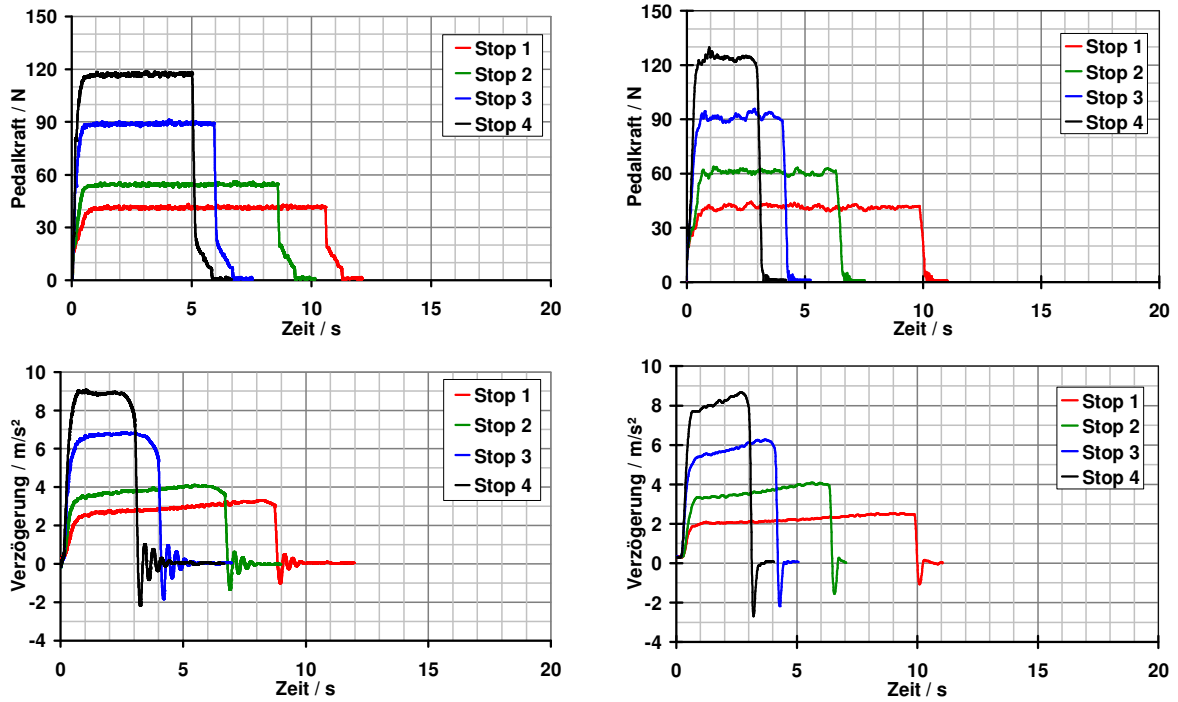


Abbildung 14: Vergleich Betätigungsautomatik / professioneller Testfahrer [1]

Als wichtiges Ergebnis ist festzustellen, dass sich im Komfortbereich der Zusammenhang zwischen Bremsdruck und Fahrzeugverzögerung innerhalb gewisser Grenzen als linear darstellt (Abbildung 15). Ob diese Grenzen akzeptabel sind, ist im Einzelfall zu entscheiden, für den vorliegenden Fall wird dies bejaht.

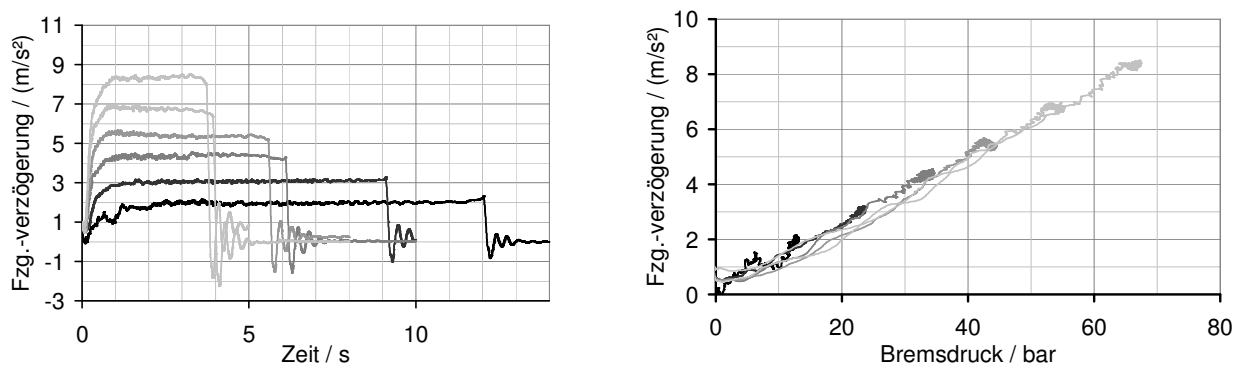


Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der Fahrzeugverzögerung und Zusammenhang zwischen Bremsdruck und Fahrzeugverzögerung eines abgebremsten Fahrzeuges

Die Modellgenauigkeit kann durch die Berücksichtigung der Gleitgeschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit des Reibwertes erhöht werden. Dies ist Gegenstand der aktuellen Forschung des FG Kraftfahrzeugtechnik.

ANALYSE DES STEHENDEN FAHRZEUGES

Das Bremspedal des stehenden Fahrzeuges wurde mehrmals rampenförmig mit unterschiedlicher Pedalgeschwindigkeit betätigt und wieder entlastet. Die Messungen erfolgte jeweils mit und ohne Pause bzw. pneumatische Erholungsphase zwischen den einzelnen Bewegungsphasen. Dies ermöglicht die Bewertung des Erschöpfungsverhaltens des Pneumatiksystems Saugrohr-BKV. Abbildung 16 zeigt beispielhaft entsprechende weggeregelte Messungen.

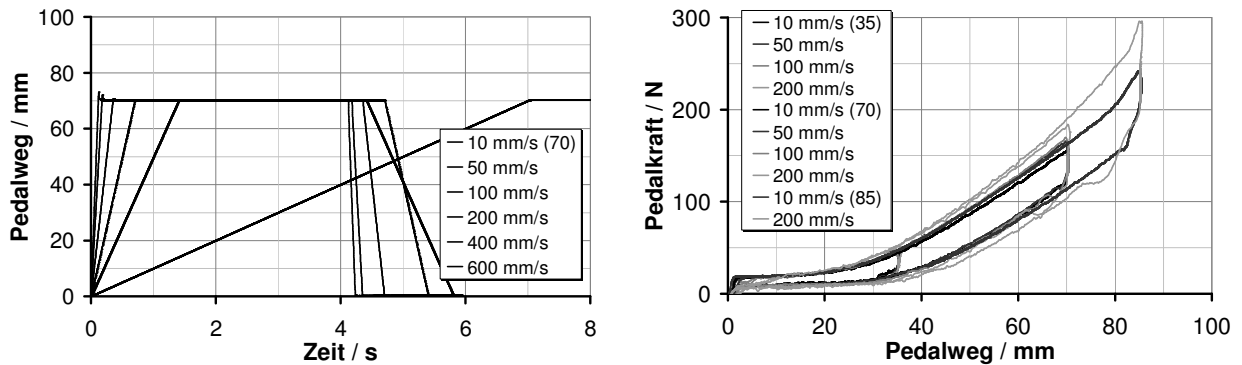


Abbildung 16: Kraft-Weg-Zusammenhang für moderate Betätigungs-geschwindigkeiten

Die rampenförmigen Betätigungen beginnen und enden stets in der Nullstellung des Pedals. Auf die Modulation während der Verzögerung trifft dies jedoch nicht zu. Daher wurde das Pedal an zwei verschiedenen Arbeitspunkten sinusförmig weggeregelt betätigt. Desweiteren kann auf Basis dieser Art der Systemanregung die Systemidentifikation bzw. -beschreibung im Frequenzbereich versucht werden. Hier ist jedoch Vorsicht geboten, das dies nur unter bestimmten Voraussetzungen bzw. Einschränkungen oder Vereinfachungen erfolgen kann, wie z.B. der Linearität des Systems. Es zeigt sich, dass diese Annahme nicht zutrifft. Abbildung 17 zeigt beispielhaft entsprechende Messungen.

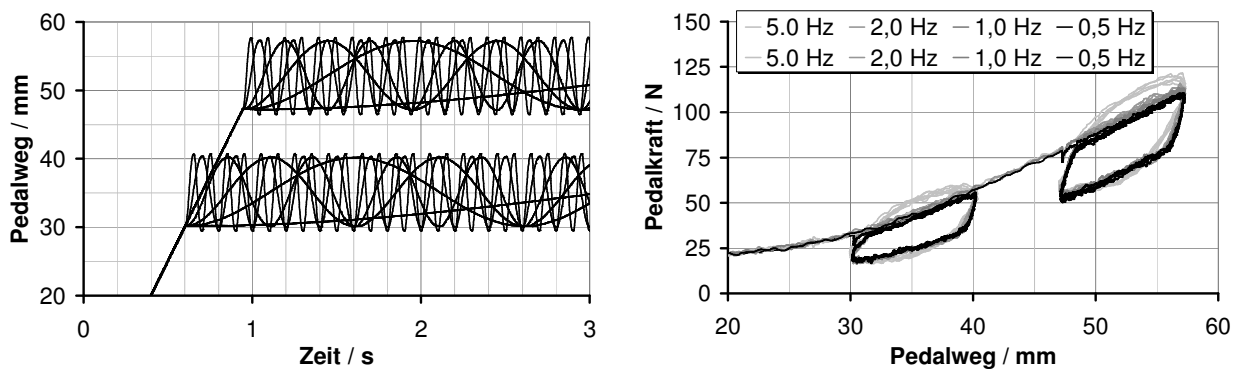


Abbildung 17: Pulsierende Pedalbelastung an zwei Arbeitspunkten (Fahrzeug A)

Ferner zeigte sich bei pulsierender Betätigung um einen Arbeitspunkt, dass sich die

Pedalkrafthysterese nicht bei konstantem Pedalweg ausbildet, sondern entlang eines steilen F-s-Gradienten entsteht. Dies ist typisch für alle untersuchten Fahrzeuge.

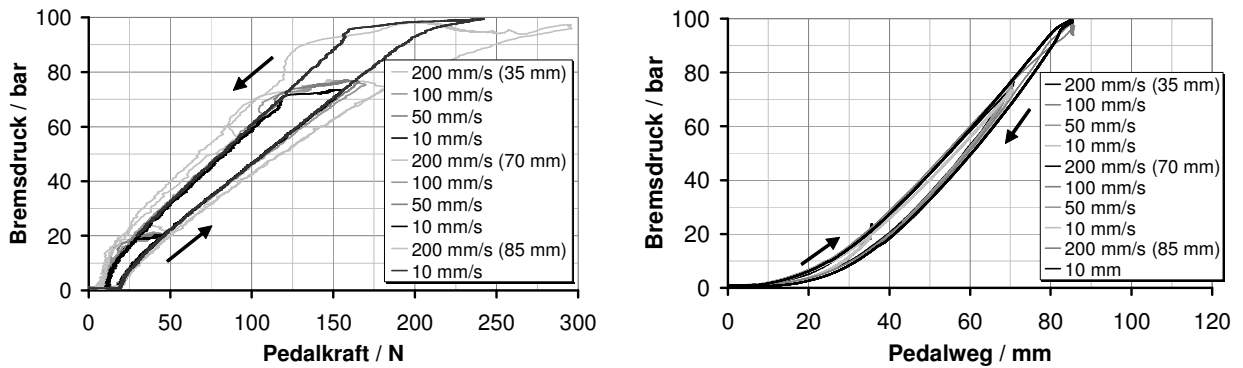


Abbildung 18: Bremsdruck-Pedalkraft- und Bremsdruck-Pedalweg-Zusammenhang für moderate Pedalgeschwindigkeiten

Messungen bis in den Bereich von Panikbremsungen zeigen die folgenden Diagramme. Deutlich zu erkennen ist der Einfluss der Dynamik oberhalb einer Pedalbetätigungs geschwindigkeit von $v_{\text{Pedal}}=200 \text{ mm/s}$. Dabei fällt auf, dass dieser stark abhängig ist von der Betätigungsrichtung.

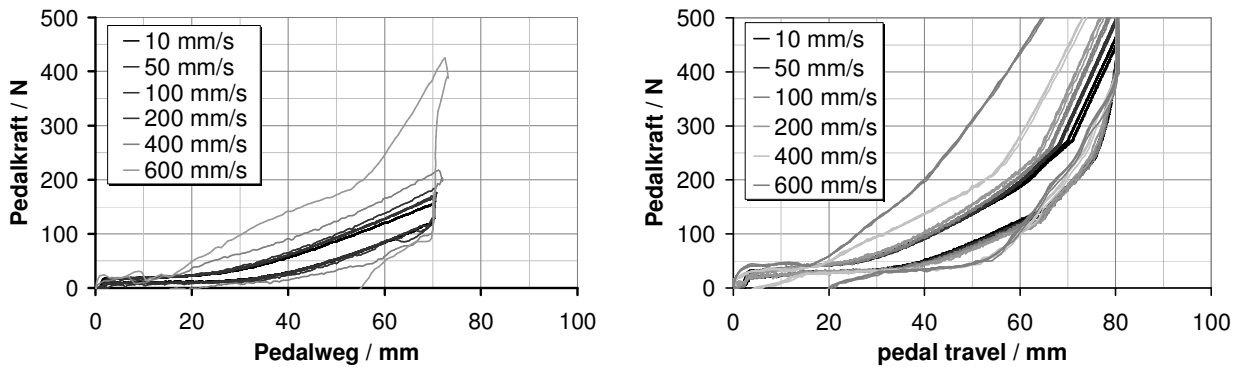


Abbildung 19: Kraft-Weg-Zusammenhang des Bremspedals verschiedener Fahrzeuge in Abhängigkeit der Betätigungs geschwindigkeit

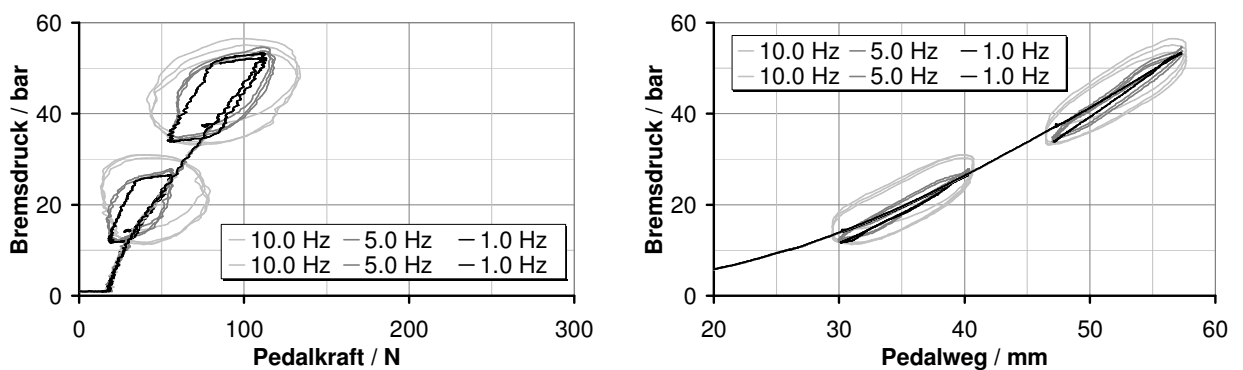


Abbildung 20: Bremsdruck-Pedalkraft- und Bremsdruck-Pedalweg-Zusammenhang bei dynamischer pulsierender Belastung

Bei unmittelbar aufeinander folgenden schnellen Betätigungen reicht die Kapazität des Unterdrucksystems nicht aus, um den Unterdruck konstant zu halten (Abbildung 21). Die Folge ist eine Reduzierung des Aussteuerpunktes sowie, wie in diesem Fall, eine Zunahme der dynamischen Kräfte.

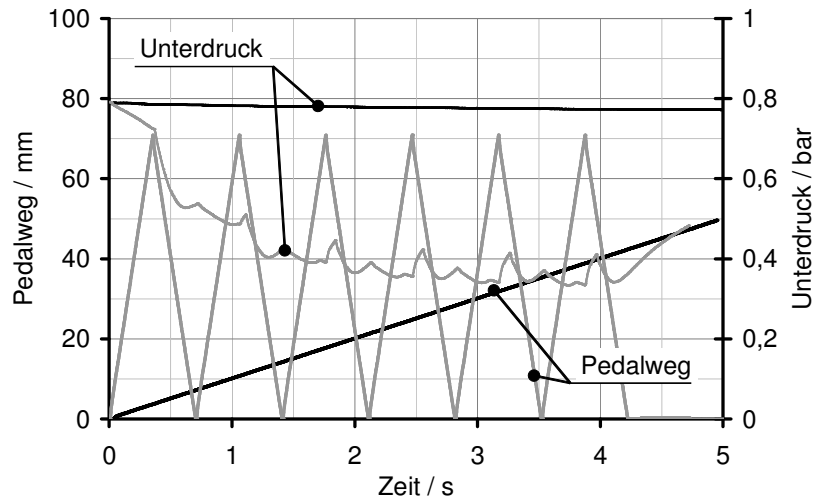


Abbildung 21: Pneumatische Erschöpfung infolge unmittelbar aufeinander folgender Betätigungen mit $v_{\text{Pedal}}=200 \text{ mm/s}$

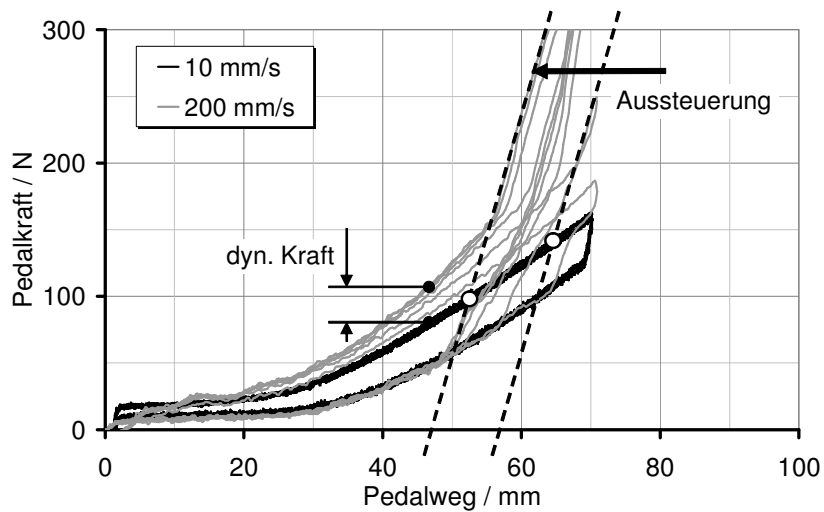


Abbildung 22: Kraft-Weg-Zusammenhang unter dynamischer Dauerbelastung („pneumatische Erschöpfung“)

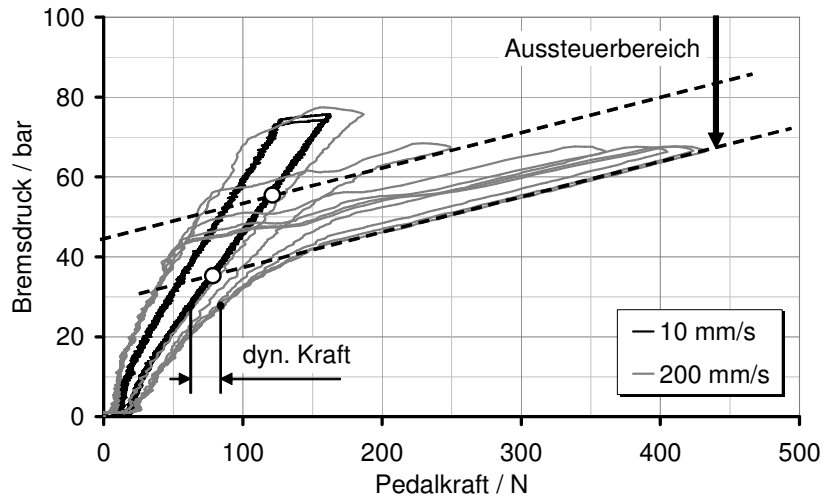


Abbildung 23: Bremsdruck-Pedalkraft-Zusammenhang unter dynamischer Dauerbelastung („pneumatische Erschöpfung“)

VERGLEICH FAHRENDES FAHRZEUG / STEHENDES FAHRZEUG

Die Bremspedalgefühlcharakteristik des stehenden Fahrzeuges unterscheidet sich von der des fahrenden Fahrzeuges. Wesentliche Unterschiede sind die Verlängerung des Pedalweges (z.B. infolge Lüftspiel zwischen Scheibe und Belag) sowie einer Erhöhung der Verstärkung (vermutlich Massenträgheit des Pedalwerkes sowie Trägheit des Messsystems). Diese Merkmale sind stets erkennbar aber zwischen den Fahrzeugen unterschiedlich stark ausgeprägt.

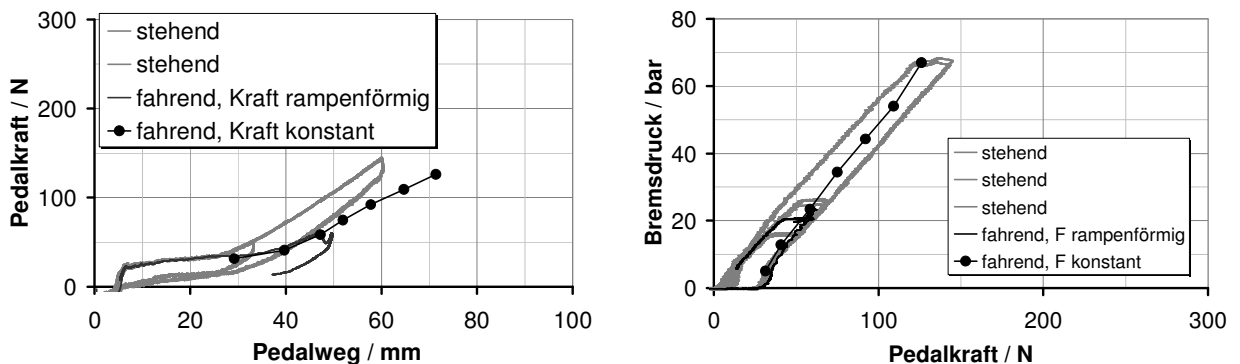


Abbildung 24: Vergleich „stehendes Fahrzeug / fahrendes Fahrzeug“ bei moderater Betätigungsgeschwindigkeit

VERHALTENSMODELL

Modellbildung bedeutet Abstraktion auf die im Sinne der Aufgabenstellung wesentlichen Merkmale und Überführung in eine zweckmäßige formale Beschreibung. Dafür steht eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung (Frequenzbereich / Zeitbereich, grafisch, symbolisch-mathematisch, physikalisch, u.a.). Soll, wie in diesem Fall, ein eindeutiger funktioneller Zusammenhang hergestellt werden, ist die Verwendung von Eingangs-Ausgangs-Modellen zweckmäßig. Diese sind durch einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße(n) gekennzeichnet, wobei der innere Systemstruktur nicht bekannt sein muss. Die relevanten Größen mechanischer Schnittstellen sind Kraft und Weg bzw. Moment und Winkel. Bei Manipulationssystemen (mechanische Mensch-Maschine-Schnittstellen) erweist sich jedoch bereits die Unterscheidung von Eingangs und Ausgangsgrößen als problematisch. Die Abbildung 25 illustriert dies beispielhaft für praktisch mögliche Kraft-Weg-Kennlinien eines Pedalwerkes. Es ist leicht einsehbar, dass ein entsprechender Manipulator vom Menschen problemlos und sicher bedienbar wäre. Dennoch wäre ein entsprechendes System in kybernetischem Sinne nicht steuerbar, weil aus dem Verlauf der Eingangsgröße die Ausgangsgröße nicht eindeutig folgt. In der Darstellung $F_{\text{Pedal}}=f(s_{\text{Pedal}})$ findet man eine Unstetigkeit im Umkehrpunkt, während in der inversen Darstellung $s_{\text{Pedal}}=f(F_{\text{Pedal}})$ eine Unstetigkeit bei geringen Kräften zu finden ist.

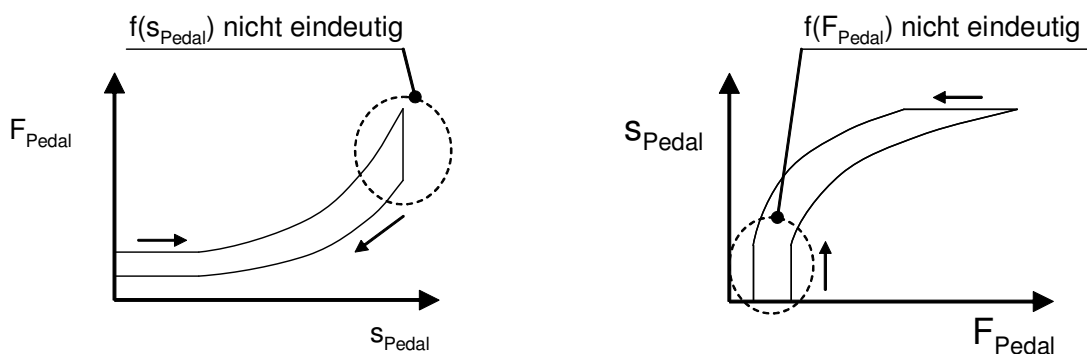


Abbildung 25: Kraft-Weg-Kennlinien mechanischer Schnittstellen

Die Ursache dieser Diskrepanz liegt darin, dass der Mensch sowohl kraftgeregelte als auch weggeregelte Manipulationen sicher ausführen kann. Um das Verhalten des technischen Systems dennoch in ein Übertragungsmodell zu überführen, werden unendlich hohe Gradienten in endliche Gradienten umgewandelt. Für die Charakteristik üblicher Bremspedale erweist es sich als am sinnvollsten, die Pedalkraft als Eingangsgröße und den Pedalweg als Ausgangsgröße zu wählen. Dies ist gleichzeitig für den Signalfluss aktiver servohydraulischer Haptiksimulatoren die zweckmäßigste Form der Beschreibung. Der üblichen Handhabung entsprechend, sollte die

grafische Visualisierung jedoch weiterhin anhand des Zusammenhangs $F_{\text{Pedal}}=f(s_{\text{Pedal}})$ erfolgen. Die gewählte Grundstruktur des Gesamtmodells zeigt Abbildung 26.

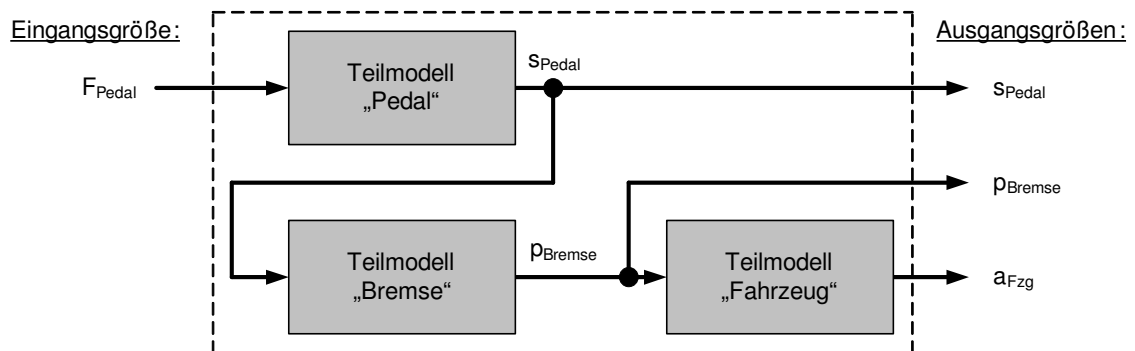


Abbildung 26: Signalfluss und Module eines kybernetisches Modells zur Beschreibung der Pedalgefühlcharakteristik

Anhand der automatisierten Messungen wurden äquivalente Strukturmodelle zur Beschreibung der Pedalhaptik sowie der Aufbaureaktion abgeleitet. Die Abbildung 27 zeigt grafisch die wesentlichen quasistatischen Merkmale der Pedalhaptik.

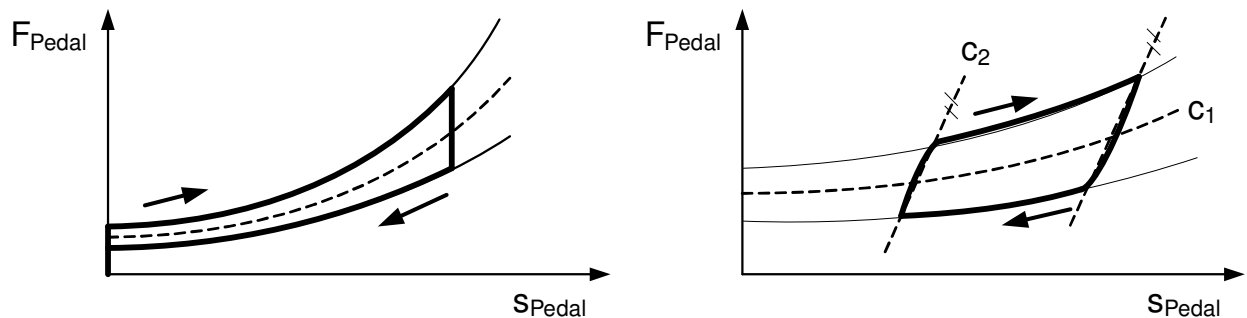


Abbildung 27: Abstraktion des quasistatischen Pedalverhaltens bei vollständiger Pedalbe- und -entlastung

Das Gesamtmodell zur Beschreibung der Pedalhaptik zeigt die Abbildung 28. Es setzt sich aus den Grundelementen Feder, Reibelement und viskoser Dämpfer zusammen, deren Parameter bezüglich Pedalweg überwiegend stark nichtlinear sind. Zusätzlich ist die Dämpfung von der Betätigungsrichtung abhängig.

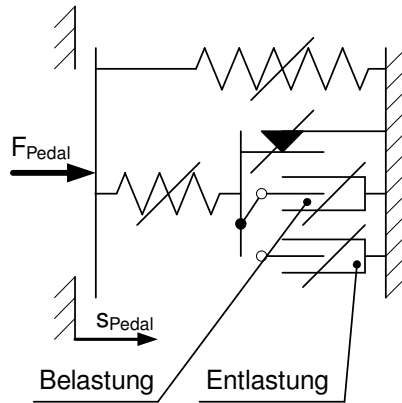


Abbildung 28: Teilmodell „Pedal“

Zur Beschreibung der Bremsdruckmodulation wurde dieses Modell um zwei Elemente erweitert. Eine nichtlineare Kennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen Pedalweg und Bremsdruck und ein Verzögerungsglied erster Ordnung des Ansprechverhalten. Ferner tritt, je nach Fahrzeug in unterschiedlicher starker Ausprägung, zwischen dem Bremsdruck und dem Pedalweg eine Hysterese auf. Die Berücksichtigung dieses Merkmals ist mit dem unteren Element von Abbildung 29 schematisch angedeutet. Die Erarbeitung eines zweckmäßigen Übertragungsmodells zur Beschreibung dieser Hysterese ist Gegenstand der aktuellen Forschung des FG Kraftfahrzeugtechnik.

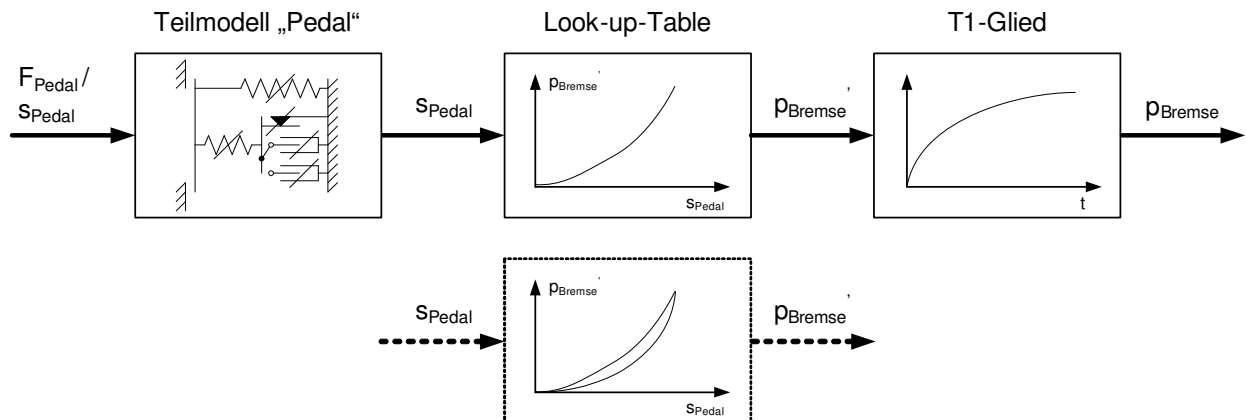


Abbildung 29: Teilmodell „Bremse“

Aus den Messungen folgt ferner, dass der Zusammenhang zwischen Bremsdruck und Fahrzeugverzögerung im Komfortbereich innerhalb gewisser Grenzen als linear angenommen werden kann.

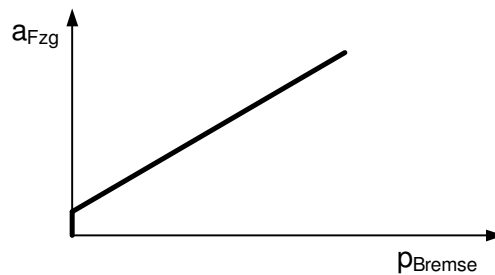


Abbildung 30: Teilmodell „Fahrzeug“

Neben dem Ziel der Schaffung einer formalen Methode zur objektiven Spezifikation der Bremspedalgefühlcharakteristik von Pkw, wurde angestrebt aus diesem Modell ein in Echtzeitsysteme implementierbares virtuelles Modell zu schaffen. Dazu wurde das oben vorgestellte Modell bis auf leichte Vereinfachungen direkt übernommen. Zur Anwendung kommt es im Forschungsfahrzeug PEGASYS als parametrierbares virtuelles Modell, auf dessen Basis ein Brake-by-Wire-System mit aktivem Pedal die Bremspedalgefühlcharakteristik aktiv simuliert [6]. Fahrversuche mit Normalfahrern und professionellen Fahrern haben bestätigt, dass die aktiv simulierte Bremspedalgefühlcharakteristik, und damit auch das zugrundeliegende virtuelle Modell, absolut authentisch die Charakteristiken realer Fahrzeuge beschreiben kann. Die Entwicklung komplexerer und allgemeingültigerer Modell sowie die detailliertere Untersuchung von Fühlbarkeitsschwellen ist Gegenstand der aktuellen Forschung.

ZUSAMMENFASSUNG

In der industriellen Praxis findet man zur Charakterisierung von Bremspedalgefühlcharakteristik eine große Zahl von unterschiedlicher Messverfahren, die weder objektiv noch untereinander vergleichbar sind. Dies betrifft insbesondere die Messung der Größe Pedalkraft. Aussagekräftige Messverfahren müssen der Tatsache gerecht werden, dass zwischen der Bremsanlagen- bzw. Pedalbelastung und der individuellen Anstrengung streng zu unterscheiden ist. Zur Gewinnung einer aussagekräftigen Basis an Messwerten wird der Einsatz einer Betätigungsautomatik („Bremsroboter“) vorgeschlagen. Ein solches System, das für den stationären und mobilen Einsatz geeignet ist, wurde am FG Kraftfahrzeugtechnik der TU Ilmenau entwickelt. Diese Betätigungsautomatik ermöglicht reproduzierbare Betätigungen in einem weiten Dynamik- und Kraftbereich, ermöglicht unterschiedliche Betätigungsmuster liefert sehr aussagekräftige Messwerte. Anhand der Vermessung mehrerer Mittelklasse-Pkw wurden Strukturmodelle abgeleitet und diskutiert, die für den Bereich von Komfortbremsungen sehr aussagekräftig sind. Dieses System hat

sich neben dem Einsatz in der Grundlagenforschung als ein leistungsfähiges Hilfsmittel für Testfahrer erwiesen. Mit geringem Aufwand kann das System für die Betätigung anderer Pedale modifiziert werden. Im Praxiseinsatz hat sich sowohl die Methodik als auch die Betätigungsautomatik bewährt. Das Interesse aus der Industrie an dieser neuen Methodik ist ausgeprägt.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Augsburger, K.; Trutschel, R.: Entwicklungswerkzeuge zur objektiven Beschreibung des Bremspedalgefühls, VDI Fortschrittsberichte 12/514, Düsseldorf 2002
- [2] Augsburger, 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.; Augsburger, K.: „Eine neuartige Methode zur objektiven Analyse der Bremspedalgefühlcharakteristik“. brems.tech 2004, München, 2004
- [4] Sendler, J.; Trutschel, R. ; Augsburger, K.: Simulation des dynamischen Verhaltens von konventionellen Bremsanlagen und Fahrwerksystemen. 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 19.-23. September 2005
- [5] Trutschel, R.; Augsburger, K.; Simulationsmodell einer Pkw-Bremsanlage zur Identifikation und Optimierung des statischen und dynamischen Systemverhaltens, Symposium „Computer-Simulation in der Fahrzeugtechnik“, Graz Mai 2003
- [6] Trutschel, R.; Sendler, J.; Augsburger, K.: Methoden und Erkenntnisse zur Komfortbewertung der Mensch-Maschine-Schnittstellen von Kfz-Betriebsbremsen. 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 19.-23. September 2005
- [7] Trutschel, R.; Augsburger, K.: “Efficient experimental analysis tools for objective analysis of the brake pedal feel characteristic”, 22nd SAE Brake Colloquium & Exhibition, Anaheim/CA, 2004

Autorenangaben:

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

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.augsburger@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