

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Sven Knecht

Ein Beitrag zur Erhöhung der Straßen- verkehrssicherheit durch ein pyrotechnisches Notbremssystem



Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Reihe herausgegeben von

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten.

Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen.

Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose.

Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal.

Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

Reihe herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

Sven Knecht

Ein Beitrag zur Erhöhung der Straßen- verkehrssicherheit durch ein pyrotechnisches Notbremssystem

Sven Knecht
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2017

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-20593-5 ISBN 978-3-658-20594-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-20594-2>

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart und dem Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt dem Inhaber des Lehrstuhls Kraftfahrwesen Prof. Dr.-Ing. J. Wiedemann. Er hat mir dieses sehr interessante und vielseitige Thema ermöglicht und mit wertvollen Anregungen zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Frau Prof. Dr.-Ing. C. Salander danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichts und das große Interesse, das sie dieser Arbeit entgegengebracht hat.

Herrn Dipl.-Math. Jens Neubeck, Leiter des Bereichs Fahrzeugtechnik und Fahrdynamik des FKFS, danke ich für die sorgfältige und kritische Durchsicht des Manuskripts und die hilfreichen Verbesserungsvorschläge hierzu.

Weiter haben mich viele Kollegen und Studenten bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt. Dafür herzlichen Dank!

Sven Knecht

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Formelzeichen	XV
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Zusammenfassung	XXI
Abstract	XXV
1 Einleitung und Motivation	1
2 Notbremssysteme für Kraftfahrzeuge	7
2.1 Grundlagen und Begriffsbestimmung	7
2.2 Notbremssysteme für Kfz. - Stand der Technik	15
2.2.1 Modifikation des Reibbeiwerts zwischen Reifen und Fahrbahn	15
2.2.2 Änderung des Reifen-Fahrbahnkontakts	21
2.2.3 Änderung der Fahrzeugumströmung und der Druckverhältnisse	26
2.2.4 Rückstoßantriebe als Notbremssystem	28
2.3 Fazit Notbremssysteme	33
3 Der Radlastbooster als Notbremssystem	37
3.1 Leistungsfähigkeit und Analyse wesentlicher Einflussfaktoren von Rückstoßantrieben als Notbremssystem	37
3.2 Aufbau eines Demonstrationsfahrzeuges mit Rückstoßantriebsystem	47

4	Serienkonzept eines Radlastbooster	65
4.1	Pyrotechnischer Aktor	66
4.2	Mechanische Integration ins Gesamtfahrzeug	74
4.3	Vernetzungsarchitektur eines Fahrzeugs mit RLB	82
4.4	Elektronik und Elektrik (E/E)	86
4.5	RLB-Notbremsfunktion	91
4.6	Sicherheit und Zulassung.....	100
4.6.1	Gefahren und Risiken einer RLB-Aktivierung	101
4.6.2	Fehlerhafte RLB-Aktivierung	117
4.6.3	Zertifizierung und Zulassung	121
5	Fazit und Ausblick.....	125
	Literaturverzeichnis.....	129
	Anhang.....	135

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Technischer Fortschritt in der Aktiven Sicherheit	2
Abbildung 1.2:	Wirkfeld von Notbremssystemen.....	4
Abbildung 2.1:	Funktionsweise der PreSafe-Bremse [6]	8
Abbildung 2.2:	Wirkende Längskräfte bei der Verzögerung eines Kfz	11
Abbildung 2.3:	Geschwindigkeitsreduktion eines Notbremssystems	14
Abbildung 2.4:	Streumaterial als Notbremssystem.....	17
Abbildung 2.5:	Klebstoffe und Lösungsmittel als Notbremssystem.....	20
Abbildung 2.6:	Mechanische Brems Elemente als Notbremssystem.....	23
Abbildung 2.7:	Braking Bag und Impulskräfte als Notbremssystem.....	25
Abbildung 2.8:	Luft- und Vakuumsysteme als Notbremse	27
Abbildung 2.9:	Rückstoßantriebe als Notbremssystem	32
Abbildung 3.1:	Verzögerung eines RLB-Fahrzeugs bei unterschiedlichen Schubkraftkonfigurationen 0-12.000 N und Düsenwinkel 0-90°	41
Abbildung 3.2:	Radlastschwingungen bei unterschiedlichen Fahrwerksabstimmungen, 6.000 N Schubkraft und 90° Düsenwinkel.....	43
Abbildung 3.3:	Verzögerungsfähigkeit des Radlastboosterfahrzeug mit angepasstem ABS Regelalgorithmus.....	44
Abbildung 3.4:	Kraftschlusskurven unterschiedlicher Radlasten	45
Abbildung 3.5:	Prinzipskizze des Heißwasserantriebssystems	49
Abbildung 3.6:	Gemessener Schubverlauf des Radlastboosters	52
Abbildung 3.7:	Heißwassermotoren im Fahrzeugkofferraum [38]	53
Abbildung 3.8:	RLB-System im Erprobungsfahrzeug [37]	53
Abbildung 3.9:	Radlasterhöhung des Demonstrationsfahrzeugs durch ein Heißwasserantriebssystem	55
Abbildung 3.10:	Bremsentest mit dem Demonstrator [40]	55

Abbildung 3.11:	ABS Regelung eines Fahrzeugs mit RLB	58
Abbildung 3.12:	Einfluss unterschiedlicher Bauzustände des RLB-Demonstrators auf den Bremsweg	59
Abbildung 3.13:	μ -Split Bremsung eines Fahrzeugs mit und ohne RLB mit Lenkeingriff des Fahrers	60
Abbildung 3.14:	Gaswegnahme in der Kurve mit und ohne aktivierten Radlastbooster.....	61
Abbildung 3.15:	Fahrzeugreaktion bei einer einseitigen Auslösung wäh- rend eines Bremsvorganges	63
Abbildung 4.1:	Idealer und gemessener Schubverlauf eines pyrotechnischen Radlastboosters	68
Abbildung 4.2:	Beispiel eines Beifahrerairbag-Gasgenerators	69
Abbildung 4.3:	Aufbau eines pyrotechnischen Doppelpulsmotors [41]	71
Abbildung 4.4:	Maßnahmen zur Schallreduktion an RLB-Gasgeneratoren. Düse mit Blütenmischer links, Chevrons rechts [40]	73
Abbildung 4.5:	Beispiel einer Vorbaustruktur mit einem Bauraum-Volumenmodell für die Integration eines Radlastboosters	77
Abbildung 4.6:	Beispiel eines vormontierten Radlastboostermoduls	78
Abbildung 4.7:	Beispielhafte Integration eines Boostermoduls in ein Gesamtfahrzeug	80
Abbildung 4.8:	Beispiel eines Kotflügels mit Klappe.....	81
Abbildung 4.9:	Beispiel für eine Steuergerätetopologie	83
Abbildung 4.10:	Beispiel einer Steuergerätearchitektur für ein Fahrzeug mit RLB.....	86
Abbildung 4.11:	Beispiel eines Leitungssatzes für ein Fahrzeug mit RLB.....	90
Abbildung 4.12:	Flussdiagramm RLB-Funktion	92
Abbildung 4.13:	Notbremsfunktion mit RLB im Längsverkehr	93
Abbildung 4.14:	Bewegungsgrößen während einer Notbremsung mit Radlastbooster.....	96

Abbildung 4.15:	Anzahl der je Fahrzeugseite benötigter RLB am Beispiel eines konstant fahrenden Objekts	99
Abbildung 4.16:	CFD - Modell des Radlastboosters [42].....	101
Abbildung 4.17:	Strömungsfeld des RLB bei einer überlagerten Fahrtwindströmung mit 10m/s	103
Abbildung 4.18:	Temperaturfeld des RLB bei einer überlagerten Strömung 10 m/s	104
Abbildung 4.19:	Gemessener Schalldruckpegel eines Radlastboosters ..	110
Abbildung 4.20:	Schalldruckpegel Grenzwerte nach Smoorenburg [45]	110
Abbildung 4.21:	Beispiel zur Gefährdung des nachfolgenden Verkehrs	117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Bewertungsmatrix der Notbremssysteme	35
Tabelle 4.1:	Rand- und Anfangsbedingungen der CFD Simulation [40]	102
Tabelle 5.1:	Fehlerwahrscheinlichkeit nach ISO 26262 [50].....	138
Tabelle 5.2:	Beherrschbarkeit nach ISO 26262 [50].....	138
Tabelle 5.3:	Verletzungsschwere nach ISO 26262 [50].....	139
Tabelle 5.4:	Risiko-Matrix nach ISO 26262 [50]	140

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m	Stirnfläche des Fahrzeugs
A_E	m	Querschnittsfläche am Düsenaustritt
a_{ego}	m/s ²	Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs
a_i	m/s ²	Beschleunigung in einem Zeitschritt
a_m	m/s ²	Mittlere Beschleunigung
a_{rel}	m/s ²	Relativer Beschleunigung zwischen Ego- und Targetfahrzeug
a_{system}	m/s ²	Von einem Notbremsssystem hervorgerufene Beschleunigung
a_{target}	m/s ²	Beschleunigung des Targetfahrzeugs
a_x	m/s ²	Längsbeschleunigung
a_y	m/s ²	Querbeschleunigung
a_1	m/s ²	Relative Beschleunigung in der ersten Phase einer RLB-Auslösung
a_2	m/s ²	Relative Beschleunigung in der zweiten Phase einer RLB-Auslösung
c_p	J/(kgK)	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
c_1	m/s	Strömungsgeschwindigkeit im Zustand 1
c_2	m/s	Strömungsgeschwindigkeit im Zustand 2
e	-	Drehmassenzuschlagsfaktor
F_B	N	Bremskraft
F_{Boost}	N	Schubkraft
F_R	N	Rollwiderstandskraft

Zeichen	Einheit	Bedeutung
F_{trans}	N	Translatorischer Längskraftanteil einer Beschleunigung
F_{rot}	N	Rotatorischer Längskraftanteil einer Beschleunigung
F_W	N	Luftwiderstandskraft
F_X	N	Kraft in Fahrzeug-Längsrichtung
F_Z	N	Kraft entlang der Fahrzeug-Hochachse
f_R	-	Rollwiderstandsbeiwert
g	m/s ²	Gravitationskonstante
γ	°	Neigungswinkel der RLB-Düse zur Horizontalen
h_1	J/kg	Spezifische Enthalpie im Zustand 1
h_2	J/kg	Spezifische Enthalpie im Zustand 2
i	-	Zeitschritt
I_{ges}	Ns	Gesamtimpuls eines Rückstoßantriebsystems
J_{red}	kgm ²	Auf die Radgeschwindigkeit reduziertes rotatorisches Massenträgheitsmoment
m	kg	Fahrzeugmasse
m_F	kg	Vom Rückstoßantrieb ausgestoßene Fluidmasse
N	-	Anzahl der Boosterelemente
n	-	Polytrophenexponent
η_{Motor}	-	Wirkungsgrad des Heißwasserantriebsystems
p_0	Pa	Atmosphärendruck
p_E	Pa	Druck am Düsenausgang
p_1	Pa	Druck eines Fluides im Zustand 1
p_2	Pa	Druck eines Fluides im Zustand 2
ψ	°	Gierwinkel

Zeichen	Einheit	Bedeutung
q_i	-	Gütefaktor der ABS-Regelsystems
q_{12}	J/kg	Spezifische Wärmezufuhr zwischen zwei Zuständen
r_{dyn}	m	Dynamischer Radhalbmesser
ρ_L	kg/m ³	Luftdichte
ρ_F	kg/m ³	Fluiddichte
s	m	Weg / Abstand
s_1	m	Änderung des relativen Abstands in einer Notbrems-situation mit aktivierten Radlast-booster
s_2	m	Änderung des relativen Abstands in einer Notbrems-situation ohne aktivierten Radlast-booster
s_B	m	Bremsweg
s_m	m	Mittlerer Bremsweg
s_{ego}	m	Zurückgelegter Weg des Ego-Fahrzeugs
s_{rel}	m	Relativer Abstand zwischen Ego- und Targetfahrzeug
s_{target}	m	Zurückgelegter Weg des Targetfahrzeugs
T	s	Schubdauer eines Boosterelements
T_f	K	Temperatur des Fluids
T_1	K	Fluidtemperatur im Zustand 1
T_2	K	Fluidtemperatur im Zustand 2
t	s	Zeit
t_{2°	ms	Zeit bis zu einer Verbrennung zweiten Grades
μ	-	Reibbeiwert
μ_R	-	Längskraftbeiwert

Zeichen	Einheit	Bedeutung
μ_{System}	-	Von einem Notbremssystem realisierter Längskraftbeiwert
v	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
Δv_1	m/s	Geschwindigkeitsabbau in einer Notbremssituation mit aktivierten Radlastbooster
Δv_2	m/s	Geschwindigkeitsabbau in einer Notbremssituation ohne aktivierten Radlastbooster
v_{ego}	m/s	Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs
v_f	m/s	Geschwindigkeit des Fluids
v_{rel}	m/s	Relative Geschwindigkeit zwischen Ego-Fahrzeug und Targetfahrzeug
v_{target}	m/s	Geschwindigkeit des Targetfahrzeugs
w_E	m/s	Gasgeschwindigkeit am Düsenausgang
w_t	W	Verrichtete technische Arbeit zwischen zwei Zuständen
z_1	m	Höhe im Zustand 1
z_2	m	Höhe im Zustand 2

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABS	Anti-Blockier-System
ACC	Adaptive Cruise Control
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
ASR	Antriebs-Schlupf-Regelung
BAS	Brems-Assistent
BUS	Binary Unit System
$C(NH_2)_3NO_3$	Guanidiniumnitrat
C0 – C3	Beherrschbarkeit eines Fehlers nach ISO 26262
CAN	Controller Area Network
CE	Konformitätsnachweis für pyrotechnische Gegenstände
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMS	Collision Mitigation System
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cu	Kupfer
$Cu(NO_3)_2$	Kupferdinitrat
$Cu(OH)_2$	Kupferdihydroxid
E/E	Elektrik und Elektronik
E0-E4	Wahrscheinlichkeit einer Situation nach ISO 26262
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart