
Entwicklungsmethoden für luftgedämpfte Fahrzeuge

Willy Armand Fongue

Band 22



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

 FLUID
SYSTEM
TECHNIK

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Entwicklungsmethoden für luftgedämpfte Fahrzeuge

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technische Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von
Willy Armand Fongue, M.Sc.
aus Ngoumou (Kamerun)

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Ralph Mayer
Tag der Einreichung:	13.11.2018
Tag der mündlichen Prüfung:	16.01.2019

Darmstadt 2018

D17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 22

Willy Armand Fongue

Entwicklungsmethoden für luftgedämpfte Fahrzeuge

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6898-6

ISSN 2194-9565

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die deutsche Automobilindustrie dominiert bei Oberklassefahrzeugen den Weltmarkt. Gründe hierfür sind technische Funktionen, Design und nicht zuletzt Markenimage. Für Sport Utility Vehicles und Limousinen haben sich ab 1998 (Einführung der Luftfederung in der Daimler S-Klasse) Luftfedern gegenüber anderen Federungskonzepten durchgesetzt, da hier das Verhältnis von Kundenwahrnehmung zu Systemkosten im Vergleich zu anderen Systemen vorteilhaft ist.

In jüngerer Zeit wird von Fahrzeugherstellern (vgl. Porsche Panamera) die konstruktiv mögliche Steifigkeitsadaption von Luftfedersystemen genutzt, um gezielt auf die Fahrdynamik einzuwirken. Das dabei erreichbare Steifigkeitsverhältnis durch Ventilschaltung ist geometrisch vorgegeben und liegt bei etwa 2.

Der Abrollkomfort eines Fahrzeuges wird neben dem Reifen im Wesentlichen durch die Coulombsche Reibung der Achse (d.h. Topologie und Achsbauteile) bestimmt. Konstruktiv bedingt bieten hinsichtlich der Coulombschen Reibung Luftfederdämpfer einen signifikanten Vorteil gegenüber hydraulischen Dämpfern. Die Erfahrungen mit Prototypenfahrzeugen haben gezeigt, dass der Abrollkomfort von luftgedämpften Fahrzeugen unübertroffen ist. Um dies zu quantifizieren, ist auf das Abbildung 5-13 in der vorliegenden Arbeit verwiesen. Die Coulombsche Reibkraft eines Seriendämpfers liegt bei ca. 20 N (einfache Amplitude). Dies ist durch die beiden dynamischen Dichtungen, nämlich Kolben- und Stangendichtung des Dämpfers verursacht. Die dynamischen Dichtungen sind beim Luftfederdämpfer durch Rollbälle ersetzt. So werden Coulombsche Reibkräfte (=Walkkräfte) von nur ca. 2 N erreicht (vgl. auch Abbildung 3-10).

Andere positive physikalische Eigenschaften eines Luftfederdämpfers werden zwar oft genannt (Beladungsinvarianz) sind aber für Oberklassefahrzeuge nicht relevant. Nachteilig bei Luftfederdämpfern sind der große Bauraum und die schwierige Auslegung. Der letztgenannte Punkt macht eine verlässliche, d.h. physikalische Modellbildung des Bauteils und Systems und genaue numerisch bzw. analytische Vorauslegung unerlässlich.

Oben wurde die Steifigkeitsspreizung bei einer adaptiven Luftfeder wie die des Porsche Panamera angesprochen. Bemerkenswert ist, dass das erreichbare Steifigkeitsverhältnis eines Luftfederdämpfers mit etwa 20 um eine Größenordnung über dem von konventionellen luftgefederten Systemen liegt.

Ergebnisse und wissenschaftlicher Fortschritt

Die Anmerkungen führen unmittelbar zur eingereichten Dissertationsschrift von Herrn Willy Fongue:

II

Zu Beginn der Forschungsarbeit von Herrn Fongue stand die Frage, (i) ob sich das hohe Steifigkeitsverhältnis von adaptiven Luftfederdämpfern nutzen lässt, um hydraulische Dämpfer zu ersetzen.

Unmittelbar anschließend stand die Frage, (ii) wie die dissipierte Energie der Luftströmung in die Umgebung abgeleitet werden kann, ohne dass kritische Beharrungstemperaturen im eingeschwungenen Zustand erreicht werden.

Letztlich stand die Frage im Raum, (iii) wie sich ein Luftfederdämpfer in einer sogenannten aufgelösten Bauweise darstellen lässt.

Die Antwort auf die drei Fragen sollen hier kurz gegeben werden:

(i) anhand von Kraft-Geschwindigkeitsdiagrammen hat Herr Fongue gezeigt, dass die gleiche Dissipationsleistung, verglichen mit dem Serienbauteil, erreicht werden kann; (ii) die dissipierte Energie kann durch ein außenliegendes Ventil mittels Wärmeleitung und einem Wärmetauscher an die Umgebung abgegeben werden; (iii) eine aufgelöste Bauweise ist auch bei einem Luftfederdämpfer (LFD) möglich, wenn man gedanklich von einer Zug- und einer Druckluftfeder ausgeht, die über eine Drosselleitung kommunizieren. Die Kinetik und Anordnung in der Achse muss derart sein, dass bei Einfederung eine Feder zusammengedrückt wird wohingegen die zweite Feder expandiert.

Darmstadt, den 03.01.2019

Peter F. Pelz

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter zwischen Juli 2010 und Juni 2011 am Institut Fluidsystemtechnik der Technische Universität Darmstadt und als Doktorand zwischen Juli 2011 und Juni 2015 im Forschungs- und Entwicklungszentrum der Daimler AG bei Mercedes-Benz im MTC Sindelfingen.

An erster Stelle geht mein Dank an meinen Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz, Institutsleiter Fluidsystemtechnik der Technische Universität Darmstadt, der die Betreuung dieser Arbeit im Rahmen einer Kooperation zwischen der Abteilung „Vorentwicklung Fahrwerk“ der Daimler AG und seinem Institut möglich gemacht hat. Er trug insbesondere durch die Aufgabenstellung, aber auch durch konstruktive Anregungen, Vorschläge und Hilfestellungen maßgeblich zu einer erfolgreichen Arbeitsweise bei.

Herrn Prof. Dr.-Ing Ralph Mayer danke ich für seine bereitwillige Übernahme des Koreferats. Die zahlreichen Gespräche und die stets hilfsbereit gegebenen Hinweise haben entscheidend zu einer positiven Motivation bei der Anfertigung der Dissertation geführt.

Ein ganz herzlicher Dank geht an Herrn Hans Joachim Kieserling für das mir entgegengebrachte Vertrauen während meiner Tätigkeit unter seiner Leitung. Seine Unterstützung und insbesondere sein Enthusiasmus für das Thema haben mein Engagement immer vorangetrieben.

Herrn Dr. Michael Kleczka, Abteilungsleiter „Vorentwicklung Fahrwerk“, gebührt mein Dank für seine Unterstützung, insbesondere für die Bereitstellung der Mittel zur Realisation dieser Arbeit.

Bei den Kollegen Frau Dr. Veronika Effinger, Herrn Dr. Timo Gaugele, Herrn Christian Mosler, Herrn Christoph Schade, Herrn Philipp Hedrich, Herrn Jochen Elser und Herrn Karl Max Noupa bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit, die freundliche Atmosphäre und zahllosen fachlichen und nichtfachlichen Diskussionen.

Mein außerordentlicher Dank gilt allen Studenten, die mich mit ihren Bachelor-, Masterarbeiten sowie Industriepraktika oder als Hilfwissenschaftler unterstützt haben sowie den mechanischen Werkstätten der Abteilung „Federung und Dämpfung“ der Daimler AG und des Instituts Fluidsystemtechnik.

Meinen ganz besonderen Dank möchte ich an meiner Familie aussprechen. Hier möchte ich meinen Geschwistern Hilaire, Thierry, Patrick, Jeanne, Pamela und Junior für den familiären Rückhalt und für die langjährige Unterstützung während des Studiums und der Promotion danken. Meinen Eltern danke ich, dass sie mir diese hervorragende Ausbildung in Deutschland ermöglicht haben. Meiner Ehefrau Nelly Vanessa danke ich, dass sie mich während dieser Arbeit mit Geduld, Liebe und Verständnis begleitet hat.

Hiermit versichere ich, die vorliegende Doktorarbeit unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz nur mit den angegebenen Hilfsmitteln selbständig angefertigt zu haben.

Altdorf, den 13.11.2018

Willy A. Fongue

Für

Elise, Joachim & Nelly Vanessa

Es erscheint immer unmöglich, bis jemand es getan hat.

Nelson Mandela, ehemaliger südafrikanischer Präsident

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	I
Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis	IX
Abkürzungen	XII
Formelzeichen und Indizes.....	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung	5
1.3 Aufbau der Arbeit	6
2 Vertikaldynamik: Federung & Dämpfung	7
2.1 Definition wichtiger Begriffe.....	7
2.2 Funktionen eines Fahrwerks	9
2.3 Federung & Dämpfung	10
2.3.1 Aufgaben und Bauarten von Federn.....	10
2.3.2 Aufgaben und Bauarten von Schwingungsdämpfer	11
2.3.3 Luftfedern.....	13
2.3.4 Hydropneumatische Feder	20
2.4 Charakteristische Kenngrößen und Kennlinien	21
2.4.1 Komponentenebene	21
2.4.2 Fahrzeugebene.....	24
2.5 Noise Vibration and Harshness (NVH)	31
2.5.1 Fahrbahnanregung und -induzierte Fahrzeugschwingungen.....	32
2.5.2 Menschen-Empfindung und -Wahrnehmung von Schwingungseinwirken	38
3 Luftfederdämpfer: Stand der Technik.....	41
3.1 Historie	41
3.2 Funktion und Eigenschaften.....	48
3.2.1 Frequenzabhängiges Übertragungsverhalten.....	49
3.2.2 Beladungsabhängiges Dämpfungsverhalten	52
3.2.3 Beladungsunabhängiges Schwingungsverhalten	52
3.2.4 Reibung und komfortoptimierte Bauformen	53
3.2.5 Balgharshness und Akustikverhalten	54
3.2.6 Fahrzeugintegration und Funktionspotentialvergleich.....	58
3.3 Physikalische Modellbildung.....	59
3.3.1 Thermodynamische Zustände in den Volumenkammern	60

3.3.2	Strömungsmechanik im Ventil.....	62
3.3.3	Tragflächen	68
3.3.4	Verdrängerflächen	71
3.4	LFD-Modell in LMS-AMESim.....	72
3.5	Sensitivitätsanalyse	74
3.5.1	Variation der Anregungsamplitude	75
3.5.2	Variation des Ruhedrucks	76
3.5.3	Variation der Ruhetemperatur.....	77
3.5.4	Variation der Drosselquerschnittsfläche	78
3.5.5	Druckbegrenzungsventil.....	79
4	Konzepte und Auslegung.....	83
4.1	Anforderungen an die neuen LFD-Generationen	83
4.1.1	Günstige Bauformen	84
4.1.2	Verbesserung des Fahrkomforts.....	85
4.1.3	Beherrschung des Wärmehaushalts	86
4.2	Konzepte	86
4.2.1	2-Kammer-2-Bälge-LFD mit Gleichstromrichter	86
4.2.2	2-Kammer-3-Bälge-LFD mit außenliegendem Ventil	88
4.2.3	Upside-Down LFD.....	88
4.2.4	LFD-Aufgelöste Bauweise	89
4.3	Auslegungsmethodik	90
4.3.1	Bauraumanalyse	91
4.3.2	Eingangsinformationen	91
4.3.3	Berechnungsschema	93
4.3.4	Geometrische Vorauslegung: Dimensionierung	94
4.3.5	Funktionale Überprüfung	100
5	Luftfederdämpfer der zweiten Generation	119
5.1	Auslegung und Dimensionierung	119
5.1.1	Randbedingungen.....	119
5.1.2	Ergebnisse.....	120
5.1.3	Parametervariation und Ventilauslegung	122
5.2	Konstruktive Umsetzung	133
5.3	Messtechnische Bewertung des Fahrkomfort und der Fahrsicherheit.....	134
5.3.1	Prüfstand linear	135
5.3.2	Einbausituation Achse	143
5.4	Temperaturentwicklung und Wärmeabfuhr.....	155
5.4.1	Wärmeabfuhrpotential.....	156
5.4.2	Temperaturbewertung.....	162
6	Fazit.....	169
6.1	Zusammenfassung.....	169

6.2 Ausblick: Wankaktive Luftfeder	170
6.2.1 Auslegung und Dimensionierung.....	170
6.2.2 Konstruktiven Umsetzung	177
7 Anhang.....	179
7.1 Lineares Verhalten von LFD	179
7.1.1 Herleitung der Gesamtübertragungsfunktion	179
7.1.2 Herleitung der maximalen Dämpfarbeit, der Verlustwinkel bei maximaler Dämpfarbeit und der maximalen Verlustwinkel	183
7.1.3 Frequenz bei maximaler(m) Dämpfarbeit und Verlustwinkel.....	185
7.1.4 Herleitung des logarithmischen Dekrements.....	186
7.2 Ausdruck der Trag- und Verdrängerflächen bei verschiedenen LFD-Typen	187
7.2.1 2-Kammer-1-Balg-LFD	187
7.2.2 2-Kammer-3-Bälge-LFD	189
7.2.3 3-Kammer-3-Bälge-LFD	191
7.3 Herleitung der Aufbau- und Wankfedersteifigkeit.....	193
7.3.1 Aufbaufedersteifigkeit am Rad und an der Komponente.....	193
7.3.2 Wankfedersteifigkeit.....	197
7.4 LFD-Auslegungsschema.....	201
7.4.1 LFD_{AB}	201
7.4.2 2K2B-LFD	202
7.5 LFD-Modell in SIMULINK.....	203
Literaturverzeichnis	207
Abbildungsverzeichnis.....	211
Tabellenverzeichnis.....	217
Betreute Studentische Arbeiten und Studenten	219
Lebenslauf.....	221

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
DBV	Druckbegrenzungsventil
FF	Fahrfertig
FKE	Federung-Kinematik-Elastokinematik
GNSS	Globalen Navigationssatellitensystem
INS	Initialen Navigationssystem
ISO	International Organisation for Standardisation
K0	Konstruktionslage/ Konstruktionsgesamtgewicht
LF	Luftfeder
LFD	Luftfederdämpfer
LFD _{1Gen}	Luftfederdämpfer der ersten Generation
LFD _{2Gen}	Luftfederdämpfer der zweiten Generation
LFD _{AB}	Luftfederdämpfer Aufgelöste Bauweise
NVH	Noise Vibration and Harhness
RV	Rückschlagventil
TL	Teilbeladung
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein für deutsche Ingenieur
VL	Vollbeladung
WAL	Wank-aktiv-Luftfeder
WV	Wechselventil
ZGG	Zulässige Gesamtgewicht
2K2B	2-Kammer-2-Bälge
2K3B	2-Kammer-3-Bälge
3K3B	3-Kammer-3-Bälge
FB ₂₂₂	Federbein der Baureihe 222

Formelzeichen und Indizes

Symbolverzeichnis

Die Symbole der ersten Spalte werden in der zweiten Spalte beschrieben. Die dritte Spalte, wenn vorhanden, gibt die Dimension als Monom mit den Basisgrößen Länge (L), Masse (M) Zeit (T), Temperatur (Θ), und Stoffmenge (N) an.

Lateinische Buchstaben:

Symbol	Beschreibung	Dimension
A	Fläche, Verdrängerfläche	L^2
A_T	Tragfläche	L^2
A_b	Drosselquerschnittfläche	L^2
a	Temperaturleitfähigkeit	$L^2 T^{-1}$
b	Drückverhältnis	-
c	Steifigkeit	MT^{-2}
c_p	Spezifische Wärmekapazität	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
c_γ	Adiabate Steifigkeit	MT^{-2}
c_0	Isotherme Steifigkeit	MT^{-2}
d	Dämpfungskonstante	MT^{-1}
D	Durchmesser	L
D	Dämpfungsgrad	-
f	Zeitfrequenz	T^{-1}
F	Kraft	MLT^{-2}
g	Erdbeschleunigung	LT^{-2}
h	Hohe des Balges am Segment	L
h	Enthalpie	$L^2 MT^{-2}$
i	Achsübersetzung	-
k	Flächennachgiebigkeit	$L^3 M^{-1} T^2$
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$MT^{-3} \Theta^{-1}$
K	Wahrnehmungsstärke	-
l	Länge, Abstand	L
l	Wegfrequenz	L^{-1}
L	Wellenlänge	L
m	Masse	M
$\dot{m}$	Massenstrom	MT^{-1}
n	Polytropenexponent	-
p	Druck	$ML^{-1} T^{-2}$
P	Leistung	$ML^2 T^{-3}$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$L^2 MT^{-3}$
r	Radius	L
R	Spezifische Gaskonstante	$L^2 T^{-2}$
s	Federweg	L

Symbol	Beschreibung	Dimension
s	Federspur	L
t	Zeit	T
T	Temperatur	Θ
T	Periode, Zeitspanne	T
u	Strömungsgeschwindigkeit	LT^{-1}
V	Volumen	L^3
v	Geschwindigkeit	LT^{-1}
w	Welligkeit	-
z	Axiale Anregung	L
$\hat{z}$	Axiale Anregungsamplitude	L

Griechische Buchstaben

Symbol	Beschreibung	Dimension
α	Wärmeübergangskoeffizient	$M \cdot T^{-3} \cdot \Theta^{-1}$
β	Konturierung	-
γ	Isentropenexponent	-
γ	Wärmeleitfähigkeit	$M \cdot L \cdot T^{-3} \cdot \Theta^{-1}$
Δ	Abklingkonstant	-
ζ	Höheänderung des Rollbalges	L
η	Dynamische Viskosität	$M L^{-1} T^{-1}$
θ	Eingangsparameter	-
λ	Eigenwerte	T^{-1}
ν	Geschwindigkeit	LT^{-1}
ν	Kinematische Viskosität	$L^2 T^{-1}$
ρ	Dichte	ML^{-3}
σ	Effektivwert der Radlastschwankung	
v	Fahrzeuggeschwindigkeit	LT^{-1}
φ	Drehwinkel, Verlustwinkel, Wankwinkel	-
ϕ	Phasenwinkel	-
Φ	Spektrale Leistungsdichte (Leistungsdichtespektrum)	L^3
ω	Zeitkreisfrequenz	T^{-1}
Ω	Wegkreisfrequenz	L^{-1}
Λ	Logarithmisches Dekrement	-
ψ	Ausflussfunktion	-
Ψ	Zielfunktion	-

Index	Beschreibung
0	Initial, Konstruktionslage,
1	Erste Kammer, Zugkammer
2	Zweite Kammer, Druckkammer
1 Gen	Erste Generation

2Gen	Zweite Generation
A	Aufbau
<i>A</i>	Aussen
<i>Ab</i>	Abwärts
<i>Auf</i>	Aufwärts
C	Feder
D	Dämpfer
D	Druck
<i>dn</i>	Downstream
<i>dbv</i>	Druckbegrenzungsventil
<i>Dyn</i>	Dynamik
<i>Eff</i>	Effektivwert
<i>I</i>	Innen
<i>h</i>	Homogene, Hinten
<i>K</i>	Kolben
<i>max</i>	Maximum
<i>min</i>	Minimum
<i>Neb</i>	Nebenfederrate
<i>p</i>	Partikular
<i>R</i>	Rad
<i>stab</i>	Stabilisator
<i>SL</i>	Stürzlager
<i>u</i>	Umgebung
<i>up</i>	Upstream
<i>v</i>	Ventil, Vorne
<i>w</i>	Wand
<i>z</i>	Axial-/ Vertikalrichtung
<i>Z</i>	Zug