

INHALT

Formelzeichen	III
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Problemstellung.....	1
1.2 Aufgabenstellung und Vorgehensweise.....	1
2 Grundlagen	4
2.1 Stand der Technik.....	4
2.2 Motivation der Entwicklung einer aktiven hydraulischen Bremse.....	6
2.3 Komponenten und Systemgrenzen der elektrohydraulischen Energieversorgung.....	6
2.4 Anforderungen.....	10
3 Hydrospeicher	13
3.1 Grundlagen Hydrospeicher.....	13
3.2 Metallfaltenbalgspeicher.....	15
3.3 Ausgeführter Prototyp.....	19
3.4 Prüfstands Aufbau.....	24
4 Auswahl und Simulation der Pumpeneinheit	29
4.1 Auswahl des geeigneten Pumpenprinzips.....	29
4.1.1 Grundlegende Betrachtungen.....	29
4.1.2 Experimentelle Überprüfung einer Zahnradpumpe.....	34
4.2 Simulation.....	38
4.2.1 Konzeption.....	38
4.3 Modellierung.....	41
4.3.1 Eigenschaften der Bremsflüssigkeit.....	41
4.3.2 Kolbenpumpe mit selbsttätigen Ventilen.....	42
4.3.3 Hydrospeicher.....	46
4.3.4 Modellgleichungen.....	48
4.4 Simulationsergebnisse.....	58
4.4.1 Modellgüte.....	62

INHALT

4.5	Ansatz zur Pulsationsminderung.....	65
5	Experimentelle Überprüfung der Pumpeneinheit.....	75
5.1	Prüfstands Aufbau.....	75
5.2	Dynamik und Regelung.....	77
5.3	Ergebnisse.....	82
6	Konzept des Motor-Pumpen-Speicher-Aggregat (MPSA).....	89
6.1	Variationsmöglichkeiten der Anordnung von Motor, Pumpe und Speicher.....	90
6.2	MPSA mit Linearbewegung.....	95
7	Elektrischer Linearantrieb.....	99
7.1	Abbildung in ein FEM Modell.....	99
7.2	Wahl des Motorprinzips.....	100
7.2.1	Reines Reluktanzprinzip.....	100
7.2.2	Hybrid- Prinzip.....	101
7.2.3	Wechselpol-Prinzip.....	102
7.2.4	Berechnungen.....	103
7.3	Berechnungsergebnisse.....	106
7.4	Beurteilung der Lösung.....	111
7.5	Überprüfung der statischen Kennlinie.....	113
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	117
9	Literatur.....	119
Anhang A	Herleitung der optimierten Hubfunktion.....	123
Anhang B	Ableitung geometrischer Größen für das mathematische Ventilmodell.....	127
Anhang C	Modellierung mit MATLAB /SIMULINK.....	130

Formelzeichen

Lateinische Großbuchstaben

A_{mb}	[m ²]	Wirksame Querschnittsfläche des Metallfaltenbalges
A_{EIN}	[m ²]	Kreisfläche der Zuströmung zum Ventilkörper
A_{W1}	[m ²]	Zylindermantelfläche
A_{W2}	[m ²]	Rotationsfläche ohne die drei nierenförmigen Austrittsöffnungen (A_{AUS1})
A_{W3}	[m ²]	Kreisfläche abzüglich der Kreisfläche A_{AUS2}
A_{W4}	[m ²]	Zylindermantelfläche
A_{AUS1}	[m ²]	Gesamtfläche der drei am Umfang verteilten, nierenförmigen Öffnungen
A_{AUS2}	[m ²]	Kreisfläche
A_K	[m ²]	Oberfläche der Ventilkugel
A_{sp}	[m ²]	Spaltquerschnittsfläche
A_{re}	[-]	Kennziffer zur Berechnung von ζ
A_k	[m ²]	Kolbenfläche
A_o	[m ²]	Auflagefläche der Dichtung
B	[T]	magnetische Flußdichte
B_x	[T]	x- Komponente der magnetische Flußdichte
B_y	[T]	y- Komponente der magnetische Flußdichte
C_H	[bar/m ³]	hydraulische Kapazität
C_{mb}	[N / m]	Federsteifigkeit einer Welle des Metallfaltenbalges
C_{Zusatz}	[N / m]	Federsteifigkeit der Zusatzfeder beim Metallfaltenbalg
\tilde{C}	[N]	Zusammengefaßter Kraftterm für die Auslegung mit Zusatzfeder
D	[m]	Durchmesser allgemein
E	[N/m ²]	Elastizitätsmodul
F_R	[N]	Reibungskraft
F_N	[N]	Normalkraft
F_V	[N]	Kraft auf den Ventilschließkörper

Formelzeichen

F_{F0}	[N]	Federvorspannkraft
F_{Maxw}	[N]	Magnetkraft durch Berechnung über den Maxwell'schen Spannungstensor
$F_{virt, Arb}$	[N]	Magnetkraft durch Berechnung über die virtuelle Arbeit
ΔF	[-]	relative Abweichung vom Mittelwert der Magnetkraft
$G(j\omega)$		Übertragungsfunktion allgemein
$G_1(j\omega)$	[-]	Führungsübertragungsfunktion
$G_2(j\omega)$	[V/m]	Übertragung Sollwert zu Stellgröße
$G_3(j\omega)$	[m/V]	Übertragungsverhalten der Regelstrecke
H	[A/m]	magnetische Feldstärke
K_1, K_2		Zusammenfassung von Gleichungstermen in der Gleichung (4-13)
L	[m]	Länge allgemein
M	[Nm]	Moment allgemein
Q_{komp}	[m ³ /s]	Kompressionsvolumenstrom beim Druckaufbau
$Q_{Einlaß}$	[m ³ /s]	Zufließender Anteil des Volumenstromes
$Q_{Auslaß}$	[m ³ /s]	Abfließender Anteil des Volumenstromes
Q_{th}	[m ³ /s]	theoretischer Volumenstrom
$Q(z, t)$	[m ³ /s]	Volumenstrom in Abhängigkeit der axialen Rohrkoordinate z und der Zeit t
Q_{th}	[m ³ /s]	Theoretischer Volumenstrom
Q	[m ³ /s]	Volumenstrom allgemein
Q_{sp}	[m ³ /s]	Spaltvolumenstrom
Q_{ver}	[m ³ /s]	Verdrängungsvolumenstrom
R	[J/(kg*K)]	Gaskonstante
R_k	[m]	Radius der Ventilkugel
Re_R	[-]	Spaltbezogene Reynoldszahl
S_v	[m ²]	Ventilfläche

Formelzeichen

$S_{X_{soll}X_{ist}}$	[m ²]	Kreuzkorrelationsfunktion zwischen X_{ist} und X_{soll}
$T_{11} \dots T_{22}$		Elemente des Maxwell'schen Spannungstensors
T	[K]	absolute Temperatur
T_1	[K]	Temperatur im Zustand 1
T_2	[K]	Temperatur im Zustand 2
T_0	[K]	Temperatur des Ausgangszustandes
T_{Abtast}	[s]	Periode der diskreten Abtastung
T_I	[s]	Integrationszeitkonstante
$T_{periode}$	[s]	Periodendauer
T_p	[s]	Periodendauer der harmonischen Anregung
U	[m]	umspülter Umfang
U_{Ventil}	[V]	Eingangsspannung für den Ventilverstärker
V_0	[m ³]	Gasvolumen des Hydrospeichers bei der Befüllung
ΔV	[m ³]	Bremsflüssigkeits - Nutzvolumen des Hydrospeichers
$V_{Schluck}$	[m ³]	Verdrängungsvolumen: Bei einer Umdrehung verdrängtes Volumen
V	[m ³]	Volumen allgemein
$X_1 \dots X_9$	[-]	Stützstellen der optimierten Hubfunktion
\hat{X}_{soll}	[m]	Amplitude des Sollwertes
\hat{X}_{ist}	[m]	Amplitude des Istwertes
X_{ist}	[m]	gemessene Position
X_{soll}	[m]	Sollwert der Position

Lateinische Kleinbuchstaben

a_k	[m/s ²]	Kolbenbeschleunigung
\tilde{a}_k	[-]	normierte Kolbenbeschleunigung
d	[N*s/m]	Ersatzdämpfung beim Ventil

Formelzeichen

d_h	[m]	hydraulischer Durchmesser
d_a	[m]	Außendurchmesser
d_v	[m]	Durchmesser der durch den Ventilschließkörper freigegebenen Fläche
d_k	[m]	Kugeldurchmesser
$d_{mb,1}$	[m]	Innendurchmesser des Metallfaltenbalges
e	[m]	Exzentrizität
$\vec{e}_x \quad \vec{e}_y \quad \vec{e}_z$	[-]	Einheitsvektoren für die Richtungen x, y und z
g	9,81 m/s ²	Erdbeschleunigung
h_v	[m]	Ventilhub
Δh_k	[-]	Anteil des Ventilöffnens am Gesamthub
k	[N/m]	Ersatzfedersteifigkeit beim Ventil
k_p	[-]	Druck-Lastspiel-Faktor des Metallfaltenbalges
k_{innen}	[-]	Abminderungsfaktor für die zulässige Druckbelastung des Metallfaltenbalges bei Innenüberdruck
$k_{mb,weg}$	[-]	Wegauslastung in Abhängigkeit der Lastwechselzahl und des Druck-Lastspiel-Faktors
$m_{v,bew}$	[kg]	bewegte Masse des Ventils
m_K	[kg]	Masse Ventilkugel
m_{Feder}	[kg]	Gewicht der Ventilsfeder
$m_{Läufer}$	[kg]	Läufermasse
m_v	[kg]	Masse des verdrängten Fluids
m_k	[kg]	Masse der Kugel
m	[kg]	Masse
\dot{m}	[kg/s]	Stoffmengenstromstärke
n	[1/s]	Drehzahl
$n_{mb,w}$	[-]	Anzahl der Wellen des Metallfaltenbalges
n_{poly}	[-]	Polytropenexponent
\vec{n}	[-]	Normalenvektor

Formelzeichen

p	[bar]	Druck allgemein
p_{EIN}	[bar]	Druck am Ventileingang
p_{AUS1}	[bar]	Druck im Ventilinnenraum
p_{AUS2}	[bar]	Druck am Ventilausgang
p_{mb}	[bar]	Betriebsdruck des Metallfaltenbalges
$p_{mb,iz}$	[bar]	maximal zulässiger Innenüberdruck des Metallfaltenbalges
$p_{mb,az}$	[bar]	maximal zulässiger Außenüberdruck des Metallfaltenbalges
p_0	[bar]	Vorfülldruck des Hydrospeichergases bei dem Gasvolumen V_0
p_1	[bar]	Unterer Arbeitsdruck des Hydrospeichers
p_2	[bar]	Oberer Arbeitsdruck des Hydrospeichers
$p_{Bremsflüssigkeit}$	[bar]	Druck auf der Seite des Bremsflüssigkeit beim Metallfaltenbalg
p_{Gas}	[bar]	Druck auf der Seite des Speichergases beim Metallfaltenbalg
p_k	[bar]	Kolbendruck
p_u	[bar]	Druck vor dem Schließkörper
p_o	[bar]	Druck nach dem Schließkörper
$p(z,t)$	[bar]	Druck in Abhängigkeit der axialen Rohrkoordinate z und der Zeit t
Δp	[bar]	Druckdifferenz allgemein
q_{pV}	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}} \right]$	pV -Durchfluß
r	[m]	Radius allgemein
Δr	[m]	ventilhubabhängiger Radius
r_s	[m]	Radius der Bohrung im Ventilsitz
\vec{t}	[N/m ²]	Spannungsvektor
\vec{u}	[m/s]	Geschwindigkeitsvektor
u_{EIN}	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit bei A_{EIN}

Formelzeichen

u_{AUS1}	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit bei
u_{AUS2}	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit bei
u_{sp}	[m/s]	Fluidgeschwindigkeit im Spalt
v_R	[m/s]	Geschwindigkeit am Rand
v_a	[m/s]	Austrittsgeschwindigkeit
\tilde{v}_k	[-]	Normierte Geschwindigkeit des Kolbens
v_k	[m/s]	Kolbengeschwindigkeit
v_a	[-]	Geschwindigkeit der optimierten Hubfunktion beim Ausschieben in normierter Darstellung
v_b	[-]	Geschwindigkeit der optimierten Hubfunktion in der Beruhigungsphase in normierter Darstellung
v_e	[-]	Geschwindigkeit der optimierten Hubfunktion beim Einsaugen in normierter Darstellung
x_{Zusatz}	[m]	Vorspannung der Zusatzfeder beim Metallfaltenbalg
\tilde{x}_k	[-]	normierter Kolbenhub mit Werten zwischen 0 und 1
x_{balg}	[m]	Balgkoordinate in axialer Richtung
x_1	[m]	Balgkoordinate im Zustand 1
x_2	[m]	Balgkoordinate im Zustand 2
x_k	[m]	Kolbenhub
\tilde{x}_k	[-]	normierter Kolbenhub

Griechische Buchstaben

α_D	[-]	Durchflußzahl
α_h	[-]	Beschleunigung der optimierten Hubfunktion in normierter Darstellung
β_h	[-]	Beschleunigung der optimierten Hubfunktion in normierter Darstellung
$\delta_{\text{gefordert}}$	[m]	geforderter Weg des Metallfaltenbalges zwischen

Formelzeichen

		den Endlagen
δ_{Nenn}	[m]	Zulässige Nennbeweglichkeit einer Welle des Metallfaltenbalges
ε	[-]	Länge der Beruhigungsphase in normierter Darstellung
ε_{sign}	[-]	Vorzeichenfaktor
η		Viskosität
η_{vol}	[-]	volumetrischer Wirkungsgrad
η_{mech}	[-]	mechanischer Wirkungsgrad
η_{ges}	[-]	Gesamtwirkungsgrad
φ	[rad]	Kurbelwellenwinkel
$\tilde{\varphi}$	[-]	normierter Kurbelwellenwinkel
ϑ^*	[-]	dimensionsloser Dämpfungsfaktor
ν	[cSt]	kinematische Viskosität
π	[-]	Konstante $\pi=3,14\dots$
ρ_K	[g/m ³]	Dichte der Ventilkugel
ρ	[g/m ³]	Dichte allgemein
ζ	[-]	Widerstandsbeiwert
μ_0	$4\pi * 10^{-7} \left[\frac{Vs}{Am} \right]$	Konstante: Permeabilität im Vakuum
ω	[rad/s]	Kreisfrequenz

Abkürzungen

AHB	Aktive hydraulische Bremse
FEM	Finite Element Methode
MPSA	Motor-Pumpen-Speicheraggregat
PKW	Personenkraftwagen
SG-Ventil	Stromlos geschlossenes Schaltventil