

Wolfgang Bauer

Hydropneumatische Federungssysteme

Wolfgang Bauer

Hydropneumatische Federungssysteme

1. Auflage

Mit 136 Abbildungen

 Springer

Dr. Wolfgang Bauer
Schindtal 5
67098 Bad Dürkheim

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

ISBN 978-3-540-73640-0 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media

springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008

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. Text und Abbildungen wurden mit größter Sorgfalt erarbeitet. Verlag und Autor können jedoch für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuziehen.

Satz und Herstellung: LE-TeX, Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig

Einbandgestaltung: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier SPIN: 11983132 60/3180 YL – 5 4 3 2 1 0

Vorwort

Vielen von Ihnen wird die Ausnutzung der Federungseigenschaften von Gas wahrscheinlich schon oft begegnet, aber vielleicht nicht direkt bewusst geworden sein. Dabei sind heute viele alltägliche Dinge untrennbar mit dem Gas als federndem Medium verknüpft. Vielleicht sitzen Sie ja gerade eben in diesem Moment auf einer Gasfeder: Ihr Bürostuhl ist mit großer Wahrscheinlichkeit mit einem solchen System ausgestattet. Im Gegensatz zu einfachen Gasfedern, wie sie z. B. an der Heckklappe Ihres Kofferraumes zur Anwendung kommen, ist Ihr Bürostuhl mit einem vergleichsweise aufwändigen Federungssystem ausgerüstet. Hier haben Sie sogar die Möglichkeit, über die Verschiebung der internen Gasmenge eine Niveauregulierung vorzunehmen und so die Sitzhöhe auf Ihre Körpergröße anzupassen – eine durchaus nicht anspruchslose Technik.

Nutzt man Gas als federndes Medium, so macht man sich immer die allgemeine Gasgleichung zu Nutze. Da die Federbewegungen innerhalb kurzer Zeit stattfinden, kann hier jedoch nicht mit einer isothermen Verdichtung gerechnet werden, sondern es muss der polytrope Ansatz gewählt werden. Vor allem diese Eigenschaft bewirkt, dass eine Gasfeder je nach Auslegung ein mehr oder weniger stark progressives Verhalten aufweist. Das wirkt sich insbesondere beim Einfedern günstig aus, da zum Ende des Federweges die Einfedergeschwindigkeit stärker verlangsamt wird und damit harte Anschläge vermieden werden.

Die positiven Eigenschaften von Gasfedern sind also unbestritten und werden in vielen Bereichen genutzt. Betrachtet man sich allerdings die geringe Hysterese der Gasfederkräfte beim Ein- und Ausfedern, so erkennt man direkt, dass einer reinen Gasfeder auch immer ein Dämpfer zur Seite gestellt werden muss. Wie auch ihre mechanischen Pendanten (z. B. Schraubenfeder und Torsionsstab) kann die Gasfeder während der Federbewegung nur sehr wenig Energie in Wärme umwandeln. Ausnahme hierfür ist die bisher noch wenig verbreitete sog. GFD (Gas-Feder-Dämpfer-Einheit) bei welcher nach dem Gold'schen Prinzip das Gas selbst für die erforderliche Dämpfung sorgt ([GOL84], [MUE05]). Üblicherweise werden Gasfedern zusammen mit ölhydraulischen Dämpfern genutzt, bei der oben angesprochenen Gasfeder im Bürostuhl wird die Dämpfung im wesentlichen von einer erhöhten Festkörperreibung im Gaszylinder übernommen. Dies ist hier völlig ausreichend, da die Gasfeder überwiegend als Stoßdämpfer (beim einmaligen Hinsetzen) benutzt wird und nicht ständigen Anregungen ausgesetzt ist – den weniger angenehmen Fall eines Erdbebens einmal ausgenommen.

Machen wir nun den Schritt zur hydropneumatischen Federung: Auch hier wirkt ein Gasvolumen als federndes Element, es gelten also grundsätzlich die

gleichen Gesetzmäßigkeiten wie bei der reinen Gasfederung. Einziger Unterschied ist hier zunächst einmal nur, dass der Gasdruck nicht direkt die Wirkflächen des Federelements beaufschlagt, sondern über ein Überträgermedium indirekt einwirkt. Man kann die Hydraulikflüssigkeit hier als ein Koppelmedium bezeichnen, genau so, wie z. B. auch eine mechanische Koppelstange benutzt werden könnte.

Die Hydraulikflüssigkeit selbst bietet nun eine Reihe von Vorteilen: zum einen lässt sich eine Flüssigkeit besser abdichten als ein Gas, was die möglichen Arbeitsdrücke deutlich erhöht und damit den für das Federelement erforderlichen Bauraum verkleinert. Zum anderen hat man die Möglichkeit, die Hydraulikflüssigkeit wie in einem ölhydraulischen Dämpfer zur Umwandlung von Bewegungsenergie in Wärme zu benutzen. Die hier ausgenutzte viskose Reibung innerhalb des Hydraulikfluids ist nicht nur günstiger zur Bedämpfung von Schwingungsvorgängen als die o. g. Festkörperreibung, sie kann darüberhinaus auch an eine bestimmte Anwendung angepasst bzw. sogar einstellbar gemacht werden. Mit einer hydropneumatischen Federung werden also stets Federung und Dämpfung quasi „in Tateinheit“ realisiert.

Ich selbst bin mit hydropneumatischen Federungen erst spät, nach meiner Promotion, durch die Arbeit bei den John Deere Werken Mannheim (ehemals Lanz Traktorenwerk) in Kontakt gekommen. Durch meine Arbeit auf dem Gebiet der hydropneumatischen Federungssysteme habe ich deren Vorteile kennen und schätzen gelernt. Speziell am Traktor bietet sich dieses Federungssystem an, was auch dadurch belegt wird, dass nahezu alle Traktorenhersteller darauf zurückgreifen um z. B. die Vorderachse zu federn. Die Gründe hierfür und noch vieles mehr sollen im Folgenden erläutert werden. Ich hoffe, dass mit diesem Buch ein grundlegendes Verständnis dafür geschaffen werden kann, was mit einem hydropneumatischen Federungssystem möglich ist und wo dessen besondere Vorteile und Eigenheiten liegen. Auf dass dieses Prinzip in vielen Bereichen zu einer vorteilhaften Anwendung kommen möge.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern und allen Freunden, die mich darin bestärkt haben, dieses Buch zu schreiben. Dankbar bin ich auch den Fachkollegen, die mich auf dem Weg von der Rohfassung bis zur Druckversion unterstützt haben und in anregenden Diskussionen einen fruchtbaren Boden für neue Ideen bereitet haben.

Bad Dürkheim im Mai 2007

Dr. Wolfgang Bauer

Inhaltsverzeichnis

1	Federungssysteme im Überblick.....	1
1.1	Anforderungen an ein Federungssystem.....	1
1.2	Grundsätzlicher Aufbau eines Federungssystems.....	5
1.3	Die hydropneumatische Federung im Vergleich zu anderen Federungskonzepten	6
1.3.1	Vergleich der Federungseigenschaften	6
1.3.2	Vergleich der Dämpfungseigenschaften	9
1.3.3	Niveauregulierung	10
1.3.4	Erfüllung der nicht-funktionellen Anforderungen	11
1.4	Anwendungsgebiete für hydropneumatische Federungssysteme.....	13
2	Grundlagen der Federungs- und Dämpfungseigenschaften hydropneumatischer Systeme	15
2.1	Allgemeiner Aufbau und Wirkungsweise.....	15
2.2	Federungseigenschaften.....	17
2.2.1	Physik der Gase	17
2.2.2	Berechnungshinweise	20
2.2.3	Nicht vorgespannte hydropneumatische Federungen	21
2.2.4	Systeme mit mechanischer Vorspannung	31
2.2.5	Systeme mit konstanter hydraulischer Vorspannung.....	36
2.2.6	Systeme mit variabler hydraulischer Vorspannung	43
2.3	Dämpfungseigenschaften.....	45
2.3.1	Dämpfung durch Festkörperreibung.....	46
2.3.2	Dämpfung durch Flüssigkeitsreibung.....	50
2.3.3	Endlagendämpfung.....	55
2.4	Kombinierte Wirkung von Federung und Dämpfung	60
3	Auslegung der hydropneumatischen Federungs- und Dämpfungselemente	65
3.1	Auslegung der Federungselemente	65
3.1.1	Zylinder	67
3.1.2	Erforderliche Druckspeicher-Gasfüllung.....	69
3.1.3	Detaillierte Bestimmung von p_0 und V_0	71
3.2	Auslegung der hydraulischen Dämpfungselemente.....	83
3.2.1	Einfachwirkender Zylinder im nicht hydraulisch vorgespannten System	83

3.2.2	Doppeltwirkender Zylinder im nicht hydraulisch vorgespannten System	86
3.2.3	Doppeltwirkender Zylinder im hydraulisch vorgespannten System	89
4	Konstruktionselemente im Federkreis	91
4.1	Zylinder	91
4.1.1	Funktion und Anforderungen	91
4.1.2	Zylinderbauarten	92
4.1.3	Dichtungen	97
4.1.4	Endlagendämpfung	101
4.1.5	Lagerbauarten	103
4.2	Druckspeicher	105
4.2.1	Funktion und Anforderungen	105
4.2.2	Speicherbauarten	107
4.2.3	Maßnahmen gegen Diffusions-Druckverlust	110
4.2.4	Konstruktive Integration	112
4.3	Strömungswiderstände	113
4.3.1	Nicht einstellbare Blenden und Drosseln	114
4.3.2	Richtungsabhängige Strömungswiderstände	116
4.3.3	Einstellbare Strömungswiderstände	119
4.4	Leitungselemente	122
4.4.1	Funktion und Anforderungen	122
4.4.2	Auslegung des Leitungsquerschnittes	124
4.4.3	Rohre	126
4.4.4	Schläuche	128
4.4.5	Verschraubungen	131
5	Niveauregulierung	135
5.1	Zylinderinterne Niveauregulierung	135
5.2	Mechanisch geregelte Niveauregulierung	137
5.3	Elektronisch geregelte Niveauregulierung	140
5.3.1	Funktion	140
5.3.2	Hydraulische Schaltung	140
5.3.3	Regelalgorithmen	143
6	Sonderfunktionen hydropneumatischer Federungssysteme	151
6.1	Abschaltung der Federung	151
6.1.1	Abschaltung durch Sperren des Hydraulikkreises	151
6.1.2	Abschaltung durch Einfahren an den mechanischen Anschlag	153
6.1.3	„Quasi-Abschaltung“ durch sehr hohe Federsteifigkeit	154
6.2	Verstellung der Federungsmittellage	155

6.3	Beeinflussung der Wank- und Nicksteifigkeit	156
6.3.1	Gleichseitig gekoppelte Zylinder	156
6.3.2	Entkoppelte Zylinder	157
6.3.3	Differenzialzylinder-Kreuzschaltung	158
6.4	Federratenverstellung durch Zu-/Abschaltung von Druckspeichern	162
7	Konstruktionsbeispiele	165
7.1	Traktor-Vorderachsfederung TLS I von John Deere	165
7.2	PKW-Achsenfederungssystem von Citroen	172
8	Verzeichnis relevanter Patente	183
8.1	Beeinflussung der Federungseigenschaften	183
8.2	Wankstabilisierung und Hangausgleich	193
8.3	Federungsblockierung	198
9	Ein Blick in die Zukunft	201
	Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	205
	Literaturverzeichnis	209
	Index	215