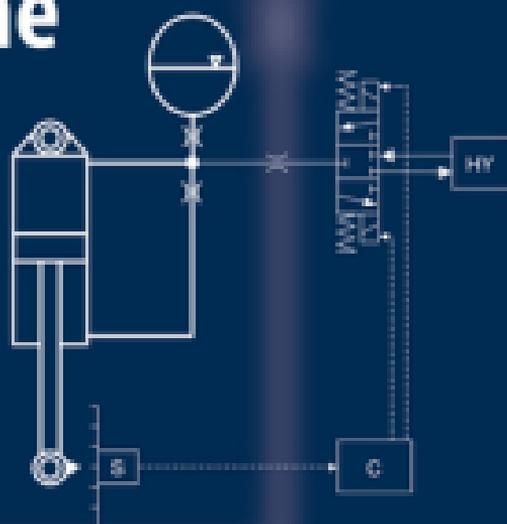


Wolfgang Bauer

# Hydro- pneumatische Federungs- systeme

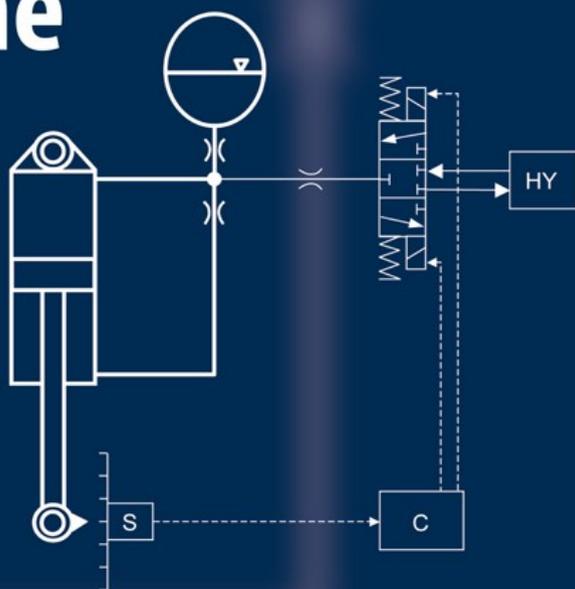


 Springer

VDI

Wolfgang Bauer

# Hydro- pneumatische Federungs- systeme



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](http://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

<b>1</b>	<b>Federungssysteme im Überblick.....</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Federungs- und Dämpfungseigenschaften hydropneumatischer Systeme .....</b>	<b>15</b>
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
<b>3</b>	<b>Auslegung der hydropneumatischen Federungs- und Dämpfungselemente .....</b>	<b>65</b>
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
<b>4</b>	<b>Konstruktionselemente im Federkreis .....</b>	<b>91</b>
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
<b>5</b>	<b>Niveauregulierung .....</b>	<b>135</b>
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
<b>6</b>	<b>Sonderfunktionen hydropneumatischer Federungssysteme .....</b>	<b>151</b>
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
<b>7</b>	<b>Konstruktionsbeispiele .....</b>	<b>165</b>
7.1	Traktor-Vorderachsfederung TLS I von John Deere .....	165
7.2	PKW-Achsenfederungssystem von Citroen .....	172
<b>8</b>	<b>Verzeichnis relevanter Patente .....</b>	<b>183</b>
8.1	Beeinflussung der Federungseigenschaften .....	183
8.2	Wankstabilisierung und Hangausgleich .....	193
8.3	Federungsblockierung .....	198
<b>9</b>	<b>Ein Blick in die Zukunft .....</b>	<b>201</b>
	<b>Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>205</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>209</b>
	<b>Index .....</b>	<b>215</b>

# 1 Federungssysteme im Überblick

## 1.1 Anforderungen an ein Federungssystem

Wie bereits im Vorwort erläutert finden Federungssysteme vielfältige Anwendung in den verschiedensten Bereichen unseres Lebens. Dort tun sie meist wenig beachtet ihre Arbeit. Auffällig werden sie erst, wenn ihre Funktion einmal nicht mehr gegeben ist. Jeder, der schon einmal ein Fahrrad mit zu geringem Reifenluftdruck gefahren hat, wird sich daran erinnern können, wie heftig größere Unebenheiten die Reifen zum Durchschlagen gebracht haben – dies wird als unkomfortabel empfunden. Die Federrate des Federungssystems „Reifen“ war in diesem Fall zu niedrig und der verfügbare Federweg zu gering. Daher erreichte die Federung die Grenzen ihres Federweges und ging in den Anschlag. Andererseits kann auch ein zu hoher Luftdruck mit einer dementsprechend zu hohen Federrate zu einem schlechten Fahrkomfort führen. Ohne ausreichende Elastizität werden die Unebenheiten der Straße direkt in den Rahmen und damit auf den Fahrer übertragen. Auch dies wirkt sich negativ auf das Wohlfühl, den Komfort des Fahrers aus. Eine möglichst passende Abstimmung des Reifenluftdruckes und damit der Federrate insbesondere auf das Fahrergewicht ist also nötig.

Damit sind wir bei der ersten, grundsätzlichen Zielsetzung eines Federungssystems: Es soll die Sekundärseite des Federungssystems (Fahrer und Rahmen) von den Anregungen in Form von Beschleunigungen auf der Primärseite (Straße) entkoppeln. Wesentliche Beweggründe hierfür sind: Komfort und Gesundheit für den Fahrer sowie Schonung der sekundärseitigen Bauteile. Erfüllt das Federungssystem diese Punkte, dann resultiert bei einem Fahrzeug daraus ganz automatisch ein weiterer Vorteil: Es kann schneller bewegt werden, bei gleicher bzw. sogar geringerer sekundärseitiger Schwingungsbelastung gegenüber einem Fahrzeug ohne Federungssystem.

Insbesondere bei einem Radfederungssystem gibt es noch eine zweite, immens wichtige Zielsetzung: Der zeitliche Verlauf der Aufstandskraft des Rades auf dem Boden soll möglichst gleichmäßig sein, damit stets ein hohes Maß an Längs- und Seitenführungskräften übertragen werden kann. Dies bringt nicht nur höhere Fahr-sicherheit, sondern insbesondere bei Traktoren eine bessere Übertragung der Zugkräfte auf den Untergrund, was eine Steigerung des Wirkungsgrades und der Produktivität zur Folge hat.

Abbildung 1.1 erläutert die Zusammenhänge der Aufgaben, die ein Radfederungssystem übernimmt und die daraus abgeleiteten funktionellen Anforderungen

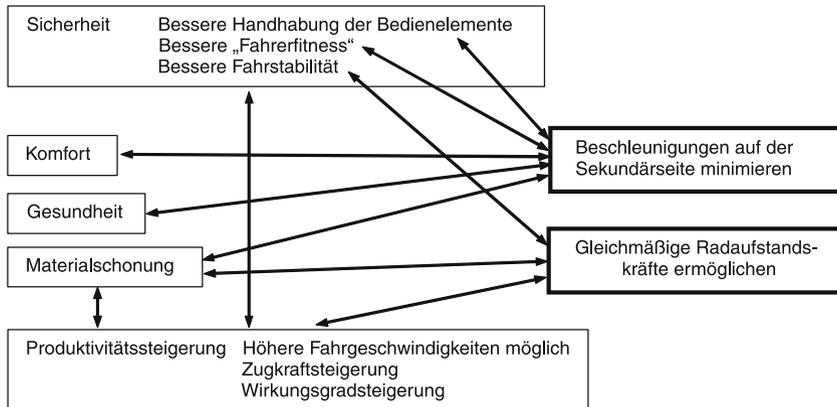


Abb. 1.1. Aufgaben und Anforderungen an ein Radfederungssystem

für das Federungssystem. Die beiden Anforderungen werden im Folgenden näher erläutert.

### Beschleunigungen auf der Sekundärseite minimieren

Während sich Bauteile auf der Sekundärseite oftmals so auslegen lassen, dass sie resistent gegenüber den dort auftretenden Schwingungen sind, ist in vielen Fällen der Mensch als „lebende Komponente“ der Sekundärseite der limitierende Faktor: Auch er darf durch Schwingungen nicht zu sehr belastet werden. Dabei werden Frequenzen von 1 bis 100 Hz von ihm als Beschleunigungen bzw. Bewegung empfunden, im Frequenzbereich von ca. 20 Hz bis 10 kHz werden sie akustisch wahrgenommen (Lärm). Reimpell gibt an, dass der Bereich von 1 bis 4 Hz im wesentlichen den „Federungskomfort“, der Bereich von 4 bis 80 Hz den „Abrollkomfort“ bestimmt [REI05]. Mit zunehmender Amplitude werden die Schwingungen vom Menschen, auch frequenzabhängig, ab einem bestimmten Grad als unkomfortabel empfunden [DUB90]. Dies hat im günstigsten Fall lediglich z. B. Unwohlsein und schnellere Ermüdung zur Folge. In schwereren Fällen können durch die häufige Einwirkung stärkerer Beschleunigungen Schäden insbesondere im Knochengerüst (z. B. Bandscheibenschäden) verursacht werden [SEI04]. Bei entsprechender Frequenz und Amplitude können beispielsweise auch Übelkeit sowie Herz- oder Magenprobleme auftreten.

Die Notwendigkeit, diesen schädlichen Faktoren zu begegnen, ist also offensichtlich. Der Gesetzgeber hat hierzu bereits genaue Richtlinien erlassen, welche die Lärmbelastungen streng reglementieren z. B. 2003/10/EG. Auch was die auf den Menschen einwirkenden Beschleunigungen betrifft, wurden bzw. werden in naher Zukunft europaweit gültige Regeln wirksam, nach denen sich dann insbesondere Arbeitgeber richten müssen (Richtlinie 2002/44/EC). Davon werden vor allem auch sämtliche Arbeitsplätze betroffen sein, die auf Fahrzeugen – hier wiederum insbesondere im schweren Gelände – installiert sind.

Wie komfortabel ein Federungssystem ist kann zunächst einmal dadurch bestimmt werden, wie gut es die Sekundärseite von den Anregungen der Primärseite isoliert. Zu diesem Zweck werden gemäß ISO 2631-1 für einen Zeitraum T die quadratischen Mittelwerte für die frequenzabhängig gewichteten Beschleunigungen  $a_w(t)$  auf der Sekundärseite berechnet. Für einen Fahrerarbeitsplatz werden hierfür die translatorischen und rotatorischen Beschleunigungen an der Sitzoberfläche herangezogen.

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} a_w^2(t) dt}$$

Diese Beschleunigungen werden dann zusammengefasst zu den Effektivwerten der gewichteten translatorischen bzw. rotatorischen Beschleunigung. Diese Effektivwerte berücksichtigen ihrerseits die Stärke der Auswirkung der jeweiligen Beschleunigung auf das Komfortempfinden über die Gewichtungsfaktoren.

$$a_{v,t} = \sqrt{(k \cdot a_{w,x})^2 + (k \cdot a_{w,y})^2 + (k \cdot a_{w,z})^2}$$

$$a_{v,r} = \sqrt{(k_x \cdot a_{w,rx})^2 + (k_y \cdot a_{w,ry})^2 + (k_z \cdot a_{w,rz})^2}$$

Hierbei sind  $k=1$ ,  $k_x=0,63$ ,  $k_y=0,4$  und  $k_z=0,2$  sowie X die Längs-, Y die Quer- und Z die Hochachse für die Komfortbewertung einer sitzenden Person nach ISO 2631-1.

Diese beiden Werte werden dann zum Gesamt-Effektivwert der gewichteten Sitzbeschleunigungen  $a_v$  zusammengefasst, welcher ein Maß für den Fahrkomfort darstellt.

$$a_v = \sqrt{a_{v,t}^2 + a_{v,r}^2}$$

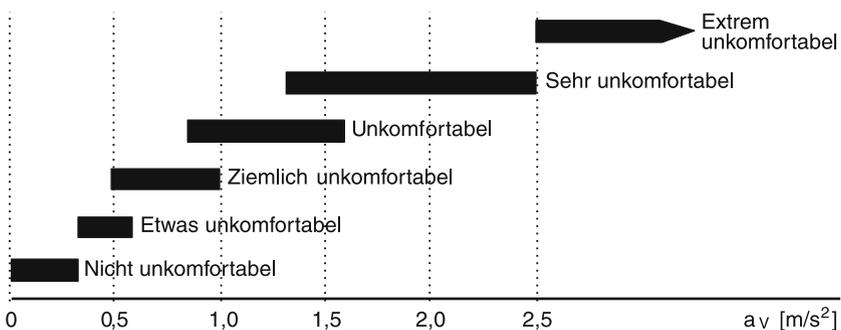


Abb. 1.2. Subjektives Komfortempfinden abhängig vom Gesamt-Effektivwert

Je geringer dieser Wert ist (bei gegebener primärseitiger Anregung), umso besser schafft es das Federungssystem die Sekundärseite, insbesondere den Fahrer, von den Anregungen der Primärseite zu isolieren und umso besser wird der Komfort bewertet werden. ISO 2631-1 gibt in einer Tabelle an, wie der Gesamteffektivwert der gewichteten Sitzbeschleunigungen und das subjektive Komfortempfinden des Fahrers zusammenhängen (Abb. 1.2).

### Gleichmäßige Radaufstandskräfte ermöglichen

Bei Federungssystemen, die in Fahrzeugen zur Achsen- bzw. Radfederung eingesetzt werden, ist dies ein weiterer, sehr wichtiger Punkt: Die Radaufstandskräfte auf dem Boden sollen möglichst gleichmäßig sein, damit insbesondere bei Längs- und Querbeschleunigungen ein stabiles Fahrverhalten erzielt wird und das Fahrzeug gut kontrollierbar auf dem gewünschten Kurs gehalten werden kann.

Die Radaufstandskraft bestimmt als Normalkraft direkt die möglichen Reibkräfte in der Aufstandsebene und damit die Längs- und Querführungskräfte. Als Bewertungskriterium für die Gleichmäßigkeit der Radaufstandskräfte wurde der Radlastfaktor  $n_R$  eingeführt. Er stellt die Standardabweichung der dynamischen Radlast bezogen auf die statische Radlast dar [THO01]. Je geringer dieser ist, umso gleichmäßiger ist der Verlauf der Radaufstandskraft über der Zeit.

$$n_R = \frac{\sqrt{\frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} [F(t) - F_{stat}]^2 dt}}{F_{stat}}$$

Ein Radlastfaktor von bis zu 0,33 gewährleistet eine relativ gute Kontrollierbarkeit, da statistisch gesehen noch keine Abhebevorgänge auftreten. Bei Werten über dieser Grenze wird es immer schwieriger die Kontrolle über das Fahrzeug zu behalten – die Abweichungen von der gewünschten Fahrstrecke und die damit erforderlichen Lenkkorrekturen werden immer größer. So hat sich in der Praxis gezeigt, dass ein Traktor bei einem dynamischen Radlastfaktor von über 0,4 nicht mehr auf einem engen Feldwirtschaftsweg gehalten werden kann und von der Fahrbahn abkommen würde [THO01].

In diesem Zusammenhang ist es sinnvoll zu erwähnen, dass in realen Federungssystemen immer nur ein begrenzter Federweg zur Verfügung steht. Ist dieser aufgebraucht, geht die Federung mechanisch auf Anschlag, was eine erhebliche Verschlechterung des Radlastfaktors und auch der Isolationswirkung bedeutet. Daher kommt der richtigen Auslegung eines Federungssystems eine besonders wichtige Bedeutung zu. Kapitel 2 wird dazu nähere Erläuterungen geben.

Bis hierhin wurden nur die funktionellen Anforderungen an ein Federungssystem genannt. Es gibt aber auch die nicht-funktionellen Anforderungen, welche sich im wesentlichen aus den Umgebungsbedingungen ergeben. Hierzu zählen vor allem die Kosten, der Bauraumbedarf, Zuverlässigkeit und Sicherheit, Robustheit und Wartungsaufwand. Ist das Federungssystem als Teil eines Gesamtsystems von außen erkennbar, so wird teils auch eine gute optische Integration verlangt.

Je nach Anwendungsfall und dessen Randbedingungen werden die verschiedenen Anforderungen unterschiedlich gewichtet und bei der Auswahl einer geeigneten Lösung entsprechend berücksichtigt.

## 1.2 Grundsätzlicher Aufbau eines Federungssystems

Obwohl üblicherweise lediglich von einem „Federungs“system gesprochen wird, reicht eine Feder allein nicht aus, um eine solche Funktion zu erfüllen. Dies liegt daran, dass die Feder zwar durch ihre elastischen Eigenschaften eine Anregung auf der Primärseite in reduziertem Maß an die Sekundärseite weitergibt, das System jedoch dann aufgrund der in der Feder gespeicherten Energie dauerhaft weiterschwingen wird. Und nicht nur das: Bei weiteren Anregungen mit entsprechender Frequenz und Phase wird sie weitere Energie aufnehmen und die Amplitude der Schwingung auf der Sekundärseite wird sich vergrößern (Resonanz). Damit hat man dann möglicherweise das Gegenteil von dem erreicht, was eigentlich Sinn des Federungssystems ist: Die Beschleunigungen werden verstärkt statt verringert.

Aus diesem Grund wird zusammen mit einer Feder auch immer ein Dämpfer zum Einsatz kommen. Dieser setzt die Energie, welche temporär in der Feder gespeichert wurde, in Wärme um und lässt somit die Schwingung abklingen. Je größer die Dämpferkräfte, umso schneller wird die Schwingung zwar abklingen, um so stärker ist allerdings auch die direkte (nicht-„gefederte“) Koppelung der Primärseite an die Sekundärseite: die Anregungen werden dadurch stärker übertragen. Bei der Abstimmung eines Feder-Dämpfer-Systems ist also viel Fingerspitzengefühl und Aufwand erforderlich, um ein möglichst gutes Ergebnis zu erzielen. In der Regel wird als Dämpfer ein ölhdraulisches Element verwendet, welches ein geschwindigkeitsabhängiges Dämpfungkraftverhalten zeigt.

Der genannte Dämpfer bringt allerdings üblicherweise auch eine Festkörperreibung mit sich, welche das Federungsverhalten wiederum negativ beeinflusst. Insbesondere die Haftreibung wirkt als direktes Bindeglied zwischen Primär- und Sekundärseite: Alle Anregungen, die unterhalb dieses Schwellenwertes liegen, werden ungemindert an die Sekundärseite weitergegeben – die Geräuschübertragung ist hier besonders ungünstig. Auch die Gleitreibung beeinflusst das Übertragungsverhalten negativ, weshalb in der Praxis große Anstrengungen unternommen werden, um den allgemeinen Störfaktor Festkörperreibung zu minimieren.

Abbildung 1.3 zeigt den grundlegenden Aufbau eines Federungssystems bei dem die Anregungen der Primärseite über eine Feder, einen hydraulischen Dämpfer und ein Reibungselement auf die sekundärseitige Masse  $m$  übertragen werden und dort als Reaktion eine Bewegung der Masse verursachen.

Eine elegante und häufig genutzte Maßnahme, um den Anteil an Festkörperreibung zu kompensieren ist es, ein sehr reibungsarmes, weiteres Feder-Dämpfer-Element in Reihe zur hydraulischen Dämpfung und Reibung zu schalten, welches