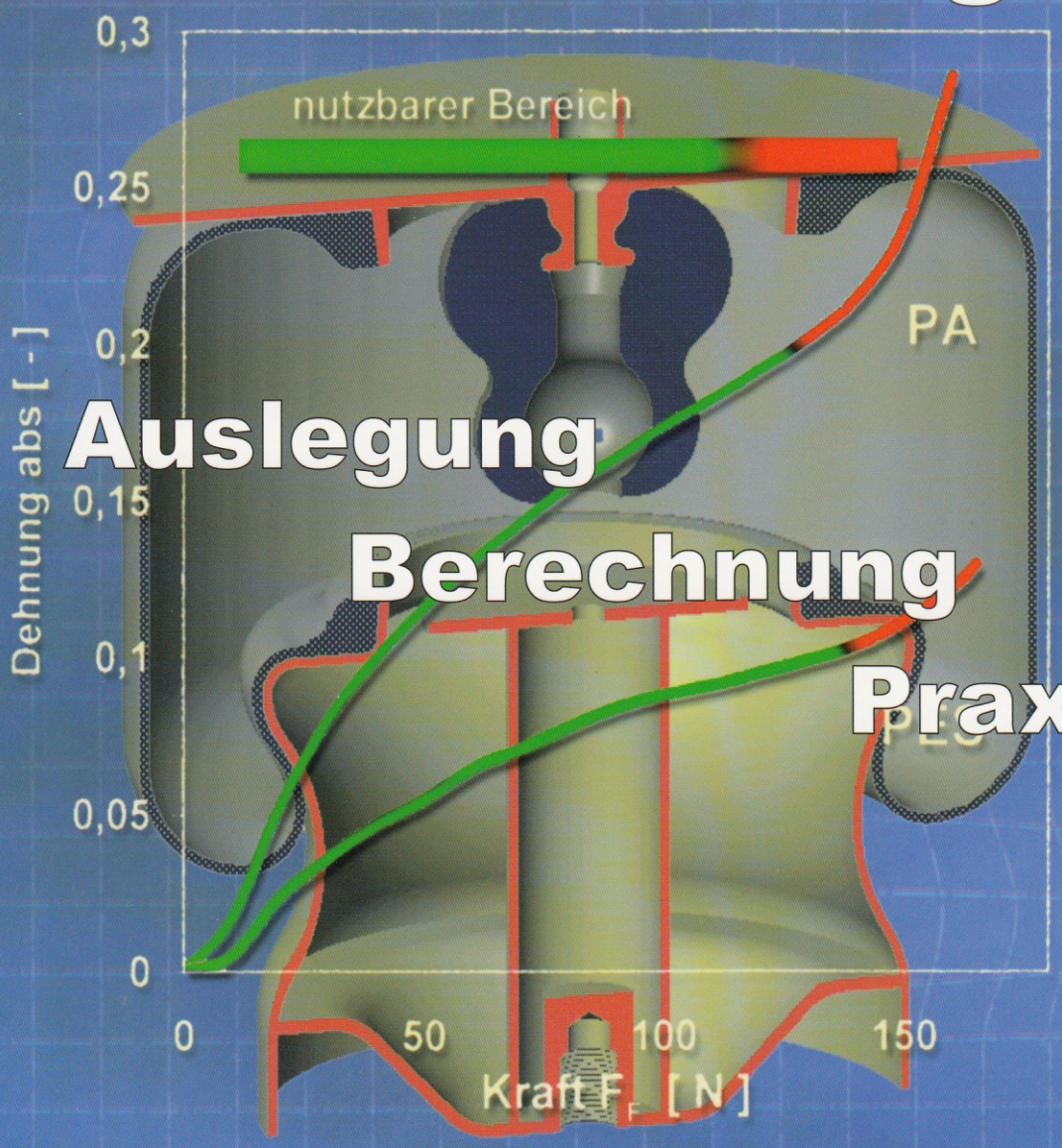
Hans Joachim Pahl

Luftfedern in Nutzfahrzeugen



Auslegung
Berechnung
Praxis

Vorwort

Dieses Buch wendet sich an Fahrzeugkonstrukteure, Studierende des Maschinenbaus und der Fahrzeugtechnik sowie an alle, die beruflich mit Luftfedern zu tun haben und etwas mehr über dieses Produkt erfahren möchten.
Ein Fachbuch wird sicher niemand in einem Zuge durchlesen. Man wird mit den Kapiteln beginnen, die einen besonders interessieren, sei es nun die Auslegung für einen bestimmten Einsatz, die Berechnung oder die Anwendung in der Praxis.
Ich habe mich daher bemüht, dass die Kapitel weitgehend für sich allein verständlich sind und wo nötig auf andere Kapitel verwiesen. Wiederholungen ließen sich daher nicht ganz vermeiden.
Ich bedanke mich bei den Firmen DaimlerChrysler, EvoBus, Volvo, Wabco und der Achsenfabrik Sauer, die mich mit Informationen und Bildmaterial versorgt haben.
Nicht zuletzt bedanke ich mich bei den Firmen LFT Germany GmbH und AKTAS, die mich beim Zustandekommen dieses Buches unterstützt haben.

Inhalt

1.	**Einleitung**	1
1.1.	Formelsammlung	3
2.	**Kennwerte von Luftfedern**	8
2.1	Bauteile	8
2.2	Geometrische Kenngrössen	9
2.3	Federcharakteristik	10
2.3.1	Vergleich Luftfeder Stahlfeder	10
2.3.2	Vergleich Luftfeder Gasfeder	13
2.3.3.	Die wirksame Fläche	14
2.4	Technische Dokumentation	14
2.4.1	Isobare und Adiabatische Kennlinien	14
2.4.2	Tragkraft Druckdiagramm	16
2.4.3	Eigenfrequenz und Federrate als Funktion der Einbauhöhe	17
2.4.4	Durchmesser und Faltenhöhe als Funktion der Einbauhöhe	18
2.4.5	Volumenkurve	19
2.4.6	Erreichter Spitzendruck als Funktion der Einbauhöhe	20
3.	**Berechnungen an Luftfedern**	22
3.1	Auslegung von Luftfedern	22
3.1.1	Variantenkonstruktion	22
3.1.2	Abstimmung mit der Sekundärfeder	26
3.1.3	Neukonstruktion	29
3.1.3.1	Die Zustände des Luftfederbalges	29
3.1.3.2	Vorgehen	30
3.2	Bestimmung der Eigenfrequenz und Federrate	36
3.2.1	Mit Näherungsformel	36
3.2.2	Berechnung der Adiabatischen Kennlinie	38
3.2.3	Berechnung des Volumens und des Volumengradienten	38
3.3	Beeinflussung der Kennlinien	40
3.3.1	Federvolumen	41
3.3.2	Kolbenkontur	41
3.3.3	Kolbenkontur im Versuch bestimmen	45

3.4	Nachrechnung der Festigkeit	46
3.4.1	Der Aufbau des Luftfederbalges	46
3.4.2	Kenngrößen für Festigkeitsträger	48
3.4.3	Berechnung	52
4.	**Bauarten**	55
4.1	Luftfederbälge	55
4.1.1	Faltenbälge	56
4.1.2	Zylindrische und konische Luftfederbälge	56
4.1.3	Abrollverhalten im drucklosen Zustand	58
4.2	Luftfedern	58
4.2.1	Faltenbälge	58
4.2.2	Luftfedern mit beidseitigen Dichtkonen	59
4.2.3	Luftfedern mit Bördelplatten und Spanntellern	61
4.2.4	Luftfedern mit einvulkanisierten Konusplatten	63
5.	**Luftfedern im Fahrzeug**	65
5.1	Die Regelung der Luftfedern	65
5.1.1	Die Höhenregelung	65
5.1.2	Heben und Senken	67
5.1.3	Die Lastaufteilung zwischen Antriebs- und Nachlaufachse	68
5.1.4	Regelung der Bremskraftaufteilung	69
5.2	Übersetzung zwischen Rad und Feder	70
5.3	Dynamischer Ausfederweg	71
5.4	Wankverhalten	73
5.5	Komfortverbesserung durch Luftfedern	79
5.5.1.1	Abhängigkeit vom Last- Leerverhältnis des Fahrzeugs	80
5.5.1.2	Harshness bei kleinen Baugrössen	82
5.5.2	Strassenschonung durch Luftfedern	83
5.5.2.1	gesetzliche Grundlagen	83
6.	**Hochdruckluftfedern**	86
7.	**Anwendungsbeispiele**	95
7.1	Luftfedern für Lkw und Sattelzugmaschinen	95
7.2	Luftfedern für Reise- und Linienbusse	104
7.3	Luftfedern für Anhänger	108
8.	**Typische Schäden an Luftfedern**	113
	Literaturverzeichnis	
	Stichwortverzeichnis	

1. Einleitung

Federn sind Konstruktionselemente, die in der Lage sind, Arbeit auf einem relativ grossem Wege aufzunehmen, und diese ganz oder teilweise als Formänderungsenergie zu speichern.

Beim Entlasten der Feder wird diese Energie größtenteils wieder abgegeben.

Unabhängig vom Verwendungszweck kann man Federn in folgende Gruppen nach der Bauform oder dem verwendetem Material einordnen.

Federn aus metallischen Werkstoffen:

Blattfeder

Drehstäbe

Schraubenfedern

Federn aus elastomeren Werkstoffen

Gummifedern ,Gummihohlfedern, Kunststofffedern

Gasfedern

Luftfedern

Man unterscheidet zwischen Formfederung und Volumenfederung.

Bei der Formfederung wird der Werkstoff der Feder selbst elastisch verformt und nimmt hierbei Energie auf, die bei Entlastung der Feder wieder abgegeben wird.
Eine technisch nutzbare Dämpfung in Form einer Hysterese ist bei Blattfedern realisierbar, indem die Reibung der einzelnen Blätter untereinander ausgenutzt wird.
Bei Gummi und Gummihohlfedern lässt sich durch die Wahl einer geeigneten Gummimischung eine gewisse Eigendämpfung erreichen.

Bei der Volumenfederung beruht die Federwirkung auf Volumen- und damit auf Druckänderung des federnden Mediums.
Teilweise wird dieses mit Kunststofffedern, die aus einem aufgeschäumten Material bestehen, realisiert. Die klassischen Federnarten, die auf dem Prinzip der Volumenfederung beruhen, sind Gas- und Luftfedern.

Das federnde Medium ist hierbei Gas oder Luft, welches von einem anderen Werkstoff umschlossen wird. Die von außen einwirkenden Kräfte bewirken eine Volumenänderung, wodurch sich auch der Druck verändert.
In der vorliegenden Ausarbeitung bin ich besonders auf die Rollbalgluftfedern eingegangen, da diese hauptsächlich im Fahrzeugbau eingesetzt werden. Die einzelnen Konstruktionsprinzipien zum Verbinden von Luftfederbalg, Platte und Kolben, wie z.B. Dichtkonus, Bördelplatte etc. habe ich im Text nicht näher erläutert.
Die beschriebenen Verfahren zum Auslegen von Luftfedern lassen sich weitgehend unabhängig vom Konstruktionsprinzip anwenden.

Dabei werden die Belange des Luftfederkonstrukteurs besonders beachtet.
In Kraftfahrzeugen und Anhängern werden alle bisher aufgeführten Federn als tragende Feder für die Last des Aufbaus eingesetzt. Dagegen wird die Gasfeder für andere Funktionen z.B. als Aufsteller für Heckklappen an Pkw verwendet.
Man unterscheidet hierbei zwischen einer Primär- und Sekundärfederung. Die Primärfederung trägt ständig die Last des Fahrzeugaufbaus, während die Sekundärfederung nur bei extrem harten Fahrbahnstößen oder bei Ausfall der Primärfederung zum Einsatz kommt.
Primär- und Sekundärfederung müssen gut aufeinander abgestimmt werden, wobei bei Fahrzeugen zur Personenbeförderung dem Fahrkomfort und bei denen zur Güterbeförderung der Handhabung (Heben und Senken des Fahrzeugaufbaus) höhere Priorität eingeräumt wird.

Als Primärfederung verwendet man bei Pkw hauptsächlich Schraubenfedern und Drehstäbe. Bei Lkw und Anhängern wird die hier bisher vorherrschende Blattfederung mehr und mehr durch die Luftfederung ersetzt. Diese Variante ist bei Reise- und Linienbussen bereits vollzogen. Eine Ausnahme machen derzeit noch Kleinbusse.
Die Sekundärfederung wird meistens durch eine Gummi, Gummihohl- oder Kunststofffeder dargestellt.

Während früher die Luftfederung bei Lkw als aufpreispflichtige Sonderausstattung angeboten wurde, ist die Luftfeder heute zur Serienausstattung geworden. Man kann davon ausgehen, dass die Lkw-Baureihen der Zukunft nur noch mit luftgefederten Hinterachsen ausgestattet sind.

Wie bereits erwähnt, haben die Federn mit Ausnahme der Blatt- und der meist als Sekundärfeder eingesetzten Kunststoffedern keine technisch nutzbare Eigendämpfung.

Die Funktionen „Federn“ und „Dämpfen“ müssen daher sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Bei Lkw handelte es sich für diese beiden Funktionen um getrennte Bauteile, die als Feder und Stoßdämpfer von verschiedenen Herstellern bezogen werden.
Einige große Nutzfahrzeughersteller gehen jedoch dazu über, an den Vorderachsen ihrer Lkw und Busse Luftfeder- Dämpfersysteme einzusetzen.

1.1 Formelsammlung

in alphabetischer Reihenfolge

Bezeichnung	Formelzeichen
Wickelwinkel	α
Metallteilabstand	**A, B**
Fadenabstand im Rohlingsgewebe	$\mathbf{A}\alpha$
Fadenabstand im Herstellzustand	$\mathbf{A}\beta$
Fadenabstand im Betrieb	$\mathbf{A}\gamma$
Wirksame Fläche	$\mathbf{A_w}$
Fadenwinkel im Herstellzustand	β
Federrate	**c**
Isentropenexponent	χ
Gewebedehnung	**D**
Aussendurchmesser der Luftfeder	$\mathbf{D_A}$
Breite einer Fadenraute im Rohlingsgewebe	$\mathbf{D}\alpha$
Breite einer Fadenraute im Betriebszustand	$\mathbf{D}\gamma$
Kolbendurchmesser	$\mathbf{D_K}$
Trommeldurchmesser	$\mathbf{D_T}$
Wirksamer Durchmesser	$\mathbf{D_w}$
Fadendehnung	ε
Federkraft der Luftfeder	**F**
Kegelwinkel eines Balgsegments	φ
Eigenfrequenz	$\mathbf{f_e}$
Fadenkraft	$\mathbf{F_F}$
Freie Kolbenlänge	$\mathbf{F_K}$
Faltenüberhang	$\mathbf{F_Ü}$
Gleichgewichtswinkel	γ
Einbauhöhe	$\mathbf{H_{ges}}$, **H**
Kolbenhöhe, nutzbare	$\mathbf{H_K}$
Höhe einer Fadenraute im Rohlingsgewebe	$\mathbf{L}\alpha$
Höhe einer Fadenraute im Betriebszustand	$\mathbf{L}\gamma$
Länge eines Balgabschnitts auf Wickeltrommel	**LT**
Masse	**m**
Fadendichte im Betrieb	$\mathbf{n_B}$
Fadendichte im Rohlingsgewebe	$\mathbf{n_R}$
Betriebsdruck, stat.	**p**, $\mathbf{p_0}$, $\mathbf{p_ü}$
äusserer Radius eines Balgsegments	**RA**
innerer Radius eines Balgsegments	**RI**
Radius der Wickeltrommel	**RT**
Federweg	**s**
Volumen	**V**
Volumengradient	**v**
Volumen in Konstruktionslage	$\mathbf{V_0}$
Volumen nach Federweg s	$\mathbf{V_1}$

Formel 1

$$c = \frac{\chi\,(1 + p_0)\,A_w^2}{V_0}$$

Federrate in Abhängigkeit von wirksamer Fläche und Volumen errechnen

Formel 2

$$F = p_0\ A_w \left(\frac{V_0}{V_0 - v\,s}\right)^{\chi}$$

Federkraft in Abhängigkeit vom Federweg

Formel 3

$$p_1 = p_0 \left(\frac{V_0}{V_1}\right)^{\chi}$$

Druck in Abhängigkeit vom Volumen

Formel 4

$$c = p_{ü}\ \frac{dA_w}{ds} + A_w\ \frac{dp_{ü}}{ds}$$

Federrate in Abhängigkeit von Kolbenkontur und Volumen

Formel 5

$$f_e = \frac{1}{2\,\pi}\ \sqrt{\frac{c}{m}}$$

Eigenfrequenz in Abhängigkeit von Federrate und abzufedernder Masse

Formel 6

$$A_w \sim \frac{V_0}{H}$$

vereinfachte Beziehung zwischen wirksamer Fläche, Volumen und Einbauhöhe

Formel 7

$$V = \frac{\pi}{4}\,(\,0{,}4\ D_A^2 - 0{,}6\ D_K^2\,)$$

Volumengradient in Abhängigkeit von Außen- und Kolbendurchmesser

Formel 8

$$\gamma = \sqrt{\frac{1 - \frac{D_w}{D_A}}{2}}$$

Gleichgewichtswinkel in Abhängigkeit von Außen- und wirksamen Durchmesser

Formel 9

$$\alpha = \arccos \frac{D_T (1+ D) \cos \gamma}{D_A}$$

Wickelwinkel in Abhängigkeit vom Gleichgewichtswinkel, Wickeltrommeldurchmesser und Außendurchmesser

Formel 10

$$n_B = n_R \frac{D_T \sin \alpha}{D_A (1+ D) \sin \gamma}$$

Fadendichte im Betrieb in Abhängigkeit von der Fadendichte im Rohlingsgewebe,dem Außen- und dem Trommeldurchmesser sowie dem Gleichgewichtswinkel. Die Gewebedehnung D muss vorerst geschätzt werden.

Formel 11

$$F_F = \frac{p D_A}{2 n_B \cos^2 \gamma}$$

Fadenkraft in Abhängigkeit vom Druck, dem Außendurchmesser, dem Gleichgewichtswinkel und der Fadendichte im Betrieb

Formel 12

$$f_e = \sqrt{\frac{\chi (1+ p_0)}{H p_0 g}}$$

Überschlägige Berechnung der Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Einbauhöhe und dem statischen Druck

Formel 13

$$\text{Dehnung}_{abs} = a F_F + b F_F^2 + c F_F^3 + d F_F^4 + e F_F^5 + f F_F^6 + g F_F^7$$

Gewebedehnung als Funktion der Fadenkraft. Die Koeffizienten a, b, c..... müssen aus einem Messschrieb ermittelt werden. z. B mit Excel Solver.

Formel 14

$$L_\alpha = L_\gamma \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \quad (1 - \varepsilon)$$

Beziehung zwischen der Höhe einer Fadenraute im Rohlingsgewebe und im Betriebszustand und den Fadenwinkeln im Rohlingsgewebe und im Betriebszustand

Formel 15

$$D_\alpha = D_\gamma \quad \frac{\cos \alpha}{\cos \gamma} \quad (1 - \varepsilon)$$

Beziehung zwischen der Breite einer Fadenraute im Rohlingsgewebe und im Betriebszustand und den Fadenwinkeln im Rohlingsgewebe und im Betriebszustand

Formel 16

$$A_\alpha = l_\alpha \sin (180° - 2\alpha)$$

Fadenabstand im Rohlingsgewebe (l_α = Seitenlänge der Fadenraute)

Formel 17

$$l_\gamma = l_\alpha \sin (1 + \varepsilon)$$

Beziehung zwischen den Seitenlängen der Fadenrauten im Rohlingsgewebe und im Betriebszustand (ε ist die Fadendehnung absolut)

Formel 18

$$A_\alpha = A_\gamma \frac{\sin (180° - 2\gamma)(1 + \varepsilon)}{\sin (180° - 2\alpha)}$$

Beziehung zwischen den Fadenabständen im Rohlingsgewebe und im Betriebszustand (ε ist die Fadendehnung absolut)

Formel 19

$$LT = (1 + \varepsilon) \quad \frac{RT \tan \alpha}{\sin \varphi} \quad \left(\arcsin \frac{RA \cos \alpha}{RT} - \frac{RI \cos \alpha}{RT} \quad \arcsin \right)$$

Länge eines kegeligen Balgabschnitts auf der Wickeltrommel in Abhängigkeit vom Wickelwinkel, Wickeltrommeldurchmesser, dem größeren (RA) und kleineren (RI) Radius des Kegelstumpfs

Formel 20

$$c_{Achse} = c_{Feder} \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^2$$

Federate der Feder auf längerem oder kürzerem Hebelarm umgerechnet auf die Achse

Formel 21

$$E_{feder} = p_0 \int_0^e A_w(s) \left(\frac{V_0}{V_0 - v\,s}\right)^{\chi} ds$$

In der Feder gespeicherte Energi

Formel 22

$$a = \frac{E_{pot}}{m\,g}$$

Ausfederweg

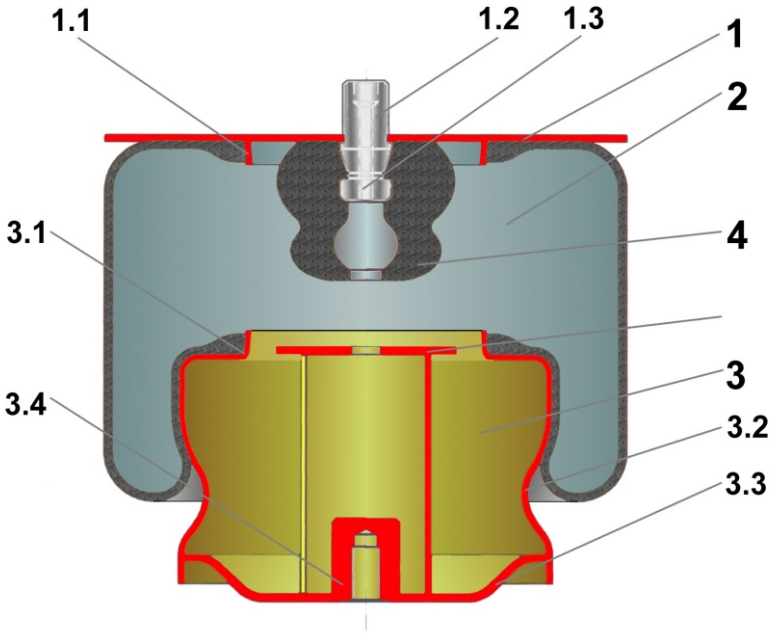
Formel 23

$$c_D = c\,s^2/2$$

Drehfederrate

2. Kennwerte von Luftfedern

2.1 Bauteile

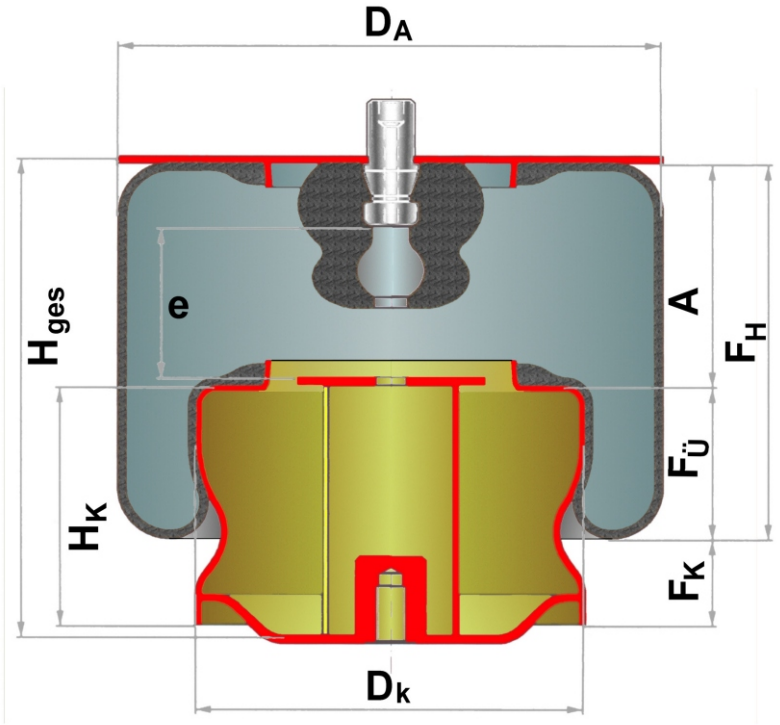


In Bild 1 sind die Bauteile einer Luftfeder am Beispiel eines Rollbalges mit beidseitigen Dichtkonen dargestellt.

1	**Konusplatte**
1.1	**oberer Dichtkonus**
1.2	**Befestigungsbolzen mit Luftanschluss**
1.3	**Pufferknopf**
2	**Luftfederbalg**
3	**Abrollkolben**
3.1	**unterer Dichtkonus**
3.2	**Kolbenmantel**
3.3	**Bodenplatte**
3.4	**untere Befestigung**
4	**Puffer**

Für Luftfederbauteile haben sich bisher keine einheitlichen Bezeichnungen durchsetzen können. Die Hersteller und Abnehmer haben eigene Namen für die verschiedenen Bauteile eingeführt. Die Auslegung und Berechnung von Luftfeder ist in diesem und in Kapitel 3 “Berechnung an Luftfedern” am Beispiel der in Bild 1 gezeigten Luftfeder beschrieben. Im Kapitel 4 “Bauarten von Luftfedern” bin ich dann näher auf die bei anderen Konstruktionsprinzipien verwandten Bauteile und Bezeichnungen eingegangen.

2.2 Geometrische Kenngrößen



Die eine Luftfeder charakterisierenden Hauptabmessungen sind im obigen Bild dargestellt.

D_A	**Außendurchmesser**
D_K	**Kolbendurchmesser**
A	**Metallteilabstand**
F_H	**Faltenhöhe**
$F_Ü$	**Faltenüberhang**
F_K	**Freie Kolbenlänge**
H_K	**Nutzbare Kolbenhöhe**
H_{ges}	**Gesamte Einbauhöhe**
e	**möglicher Einfederweg**

Auch hier haben sich keine einheitlichen Bezeichnungen durchsetzen können. In Datenblättern werden die Eigenschaften von Luftfedern meistens als Funktion des Federweges oder des Metallteilabstands mit dem Druck als Parameter dargestellt. Seltener wird die Einbauhöhe als X Achse in Diagrammen verwandt, da hier die Kolbenhöhe mit eingeht. Kolben werden manchmal höher ausgeführt als für die Balglänge notwendig ist um sich dem vorhandenen Bauraum anzupassen.

2.3 Federcharakteristik

2.3.1 Vergleich: Luftfeder - Stahlfeder

Während sich die Federkennung einer Stahlfeder im Allgemeinen mit einer geraden Linie im Kraft / Weg Diagramm beschreiben lässt, benötigt man für diese bei Luft- und Gasfedern eine Kurvenschar. Die Kurve zeigt den höchsten Betriebsdruck als obere Grenze, die Linie für den niedrigstmöglichen Betriebsdruck die untere Grenze. Dieser Bereich ist im rechten Diagramm grün gekennzeichnet.
Eine Stahlfeder, die nach dem Prinzip der Formfederung arbeitet, kann daher als Fahrzeugfederung nur für einen Lastzustand, optimal ausgelegt werden. Dieses ist üblicherweise der beladene Zustand. Bei Teillast und im unbeladenen Zustand ist diese Feder dann zu hart.

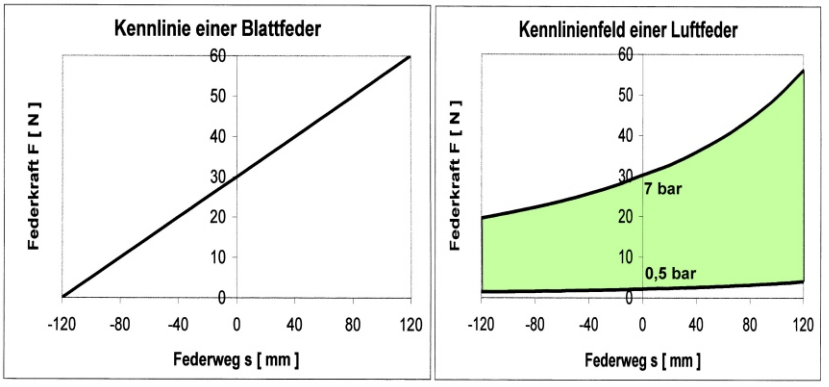


Bild 3: Vergleich Luftfeder Stahlfeder

Eine Luft- oder Gasfeder, die nach dem Prinzip der Volumenfederung arbeitet, stellt sich durch mehr oder weniger hohen Betriebsdruck auf den jeweiligen Lastzustand ein.

Für beide Federarten lässt sich die Beziehung zwischen Federweg und Federkraft durch die Gleichung:

$$\mathbf{F = c \times s}$$

mit F = Federkraft
c = Federrate
s = Federweg beschreiben

Bei der Stahlfeder ist die Federrate von der Geometrie der Feder und dem E Modul von Stahl abhängig und damit meistens eine Konstante.
Die Luft- oder Gasfeder arbeitet nach dem Prinzip der Volumenfederung. Hier beruht die Zunahme der Kraft beim Einfedern auf der isentropen Zustandsänderung des eingeschlossenen Gases.
Die Beziehung zwischen Kraft F und Federweg s lässt sich daher bei Luft- und Gasfedern durch die folgenden beiden Funktionen beschreiben.

$$F = p_0 \; A_w \left(\frac{V_0}{V_0 - v\,s} \right)^{\chi}$$

$$s = \frac{F}{c}$$

Formel 2

$$c = \frac{\chi \, (1 + p_0) \, A_w^2}{V_0}$$

Formel 1

Hierbei bedeuten:

p_0	=	**Betriebsdruck**
V_0	=	**Volumen**
v	=	**Volumengradient**
s	=	**Federweg**
A_w	=	**wirksame Fläche**
χ	=	**isentropen Exponent**
c	=	**Federrate**

Die wirksame Fläche A_w wird im folgenden Abschnitt „Vergleich Luftfeder Gasfeder“ näher beschrieben. Die Bestimmung des Volumengradienten ist im Abschnitt „ Berechnung des Volumengradienten“ genauer erläutert.

Formel 1 ist eine Näherungsformel, mit der sich die Federrate und damit die Eigenfrequenz einer Luftfeder mit zylindrischem Kolben schnell überschlägig bestimmen lässt.
Möchte man eine vorhandene Feder härter oder weicher machen, so kann man mit dieser Formel das dazu notwendige Volumen berechnen und durch Änderung des Federvolumens die Federcharakteristik beeinflussen.

Formel 2 berechnet den Kraft Druckverlauf für die gesamte Kennlinienschar.

Resümee: Alle möglichen Betriebspunkte einer Stahlfeder liegen auf einer Linie, meist einer Geraden. Bei einer Luftfeder befinden sich diese innerhalb eines Kennlinienfeldes. Durch die Regelung der Luftfederanlage kann jede Höhe innerhalb des Kennlinienfeldes als statische Betriebshöhe eingestellt werden, wobei sich dann jedoch die möglichen Ein- und Ausfederwege sowie die Eigenfrequenz ändern.
Beim Erhöhen der Last wird durch die Regelungsanlage ein höherer Druck eingestellt. Im Gegensatz zur Stahlfeder ist die Einbauhöhe der Luftfeder vom Lastzustand unabhängig.

Diese Eigenschaft ist besonders für den Einsatz in Nutzfahrzeugen wichtig. Während bei Stahlfederungen die Federn mit zunehmender Beladung einfedern, wird mit Luftfedern eine konstante Fahrhöhe beibehalten.
Wie aus Formel 1 ersichtlich ist, ändert sich durch den erhöhten Betriebsdruck mit zunehmender Last auch die Federrate, sodass zu einer erhöhten Last sich immer die passende Federrate einstellt und damit die Eigenfrequenz nahezu gleich bleibt.
Bei Fahrzeugen mit einem hohen Last/Leer Verhältnis wirkt sich dieses besonders positiv aus. Ein vollbesetzter Bus mit Stahlfederung kann bei entsprechender Auslegung der Federn für die Fahrgäste genauso komfortabel sein wie ein luftgefederter Bus. Im nur halb besetzten oder nahezu leeren Bus erweist sich die Stahlfeder jedoch als zu hart, da die Federrate auf den Beladungszustand nicht einstellbar ist.

Aus diesem Grund hat sich die Luftfederung auch an den Hinterachsen von schweren Lkw und deren Anhängern weitgehend durchgesetzt.
Das zulässige Gesamtgewicht einer Lkw Antriebsachse beträgt derzeit in Europa 11,5 to. Bei leerem Fahrzeug verringert sich diese je nach Art des Aufbaus auf bis zu 2 to. Also weniger als ein Fünftel. Eine auf die zulässige Achslast ausgelegte Stahlfeder ist bei teilbeladenem oder annähernd leerem Fahrzeug zu hart. Dieses kann bei empfindlichen Ladegütern zu Transportschäden führen.

Seit einiger Zeit lässt der Gesetzgeber für Achsen mit Luftfederung eine erhöhte Achslast zu. Die Anforderungen an das Federungs- und Dämpfungsverhalten sind in der StVZO genau definiert und lassen sich auch mit Stahlfedern bei entsprechender Auslegung erreichen.
Hierzu muss eine Stahlfeder jedoch recht weich ausgelegt sein. Bei Blattfedern erfordert dies allerdings eine große Baulänge, die sich am Fahrzeug aber ungünstig unterbringen lässt. Die weiche Feder besitzt außerdem noch einen weiteren Nachteil. Er liegt in dem großen Einfederweg vom leeren zum beladenen Zustand. Da die maximale Höhe von Fahrzeugen gesetzlich begrenzt ist, muss das leere Fahrzeug diese maximale Höhe einhalten. Das beladene Fahrzeug ist dann um den Betrag der Einfederung niedriger, was an Ladevolumen verloren geht.

Bei Pkw mit herkömmlicher, nicht aktiv geregelter Federung, hat sich die Luftfederung trotz des hohen Komfortbedarfs bei dieser Fahrzeugart nicht im großen Umfang durchsetzen können. Grund dafür ist, dass einige der oben genannten Vorteile hier nicht ausreichend zum Tragen kommen.
Die Fahrzeughöhe ist bei Pkw eher von untergeordneter Bedeutung. Eine Ausnahme bilden hier die Großraumlimousinen, die sich in den letzten Jahren mehr und mehr auf dem Fahrzeugmarkt etabliert haben.

Nehmen wir an, die Federung eines Mittelklasse Pkw, mit einem Leergewícht von 1350 kg, ist für zwei Passagiere plus Fahrer ausgelegt. Das Gesamtgewicht liegt dann bei etwa 1575 kg. Steigen zwei weitere Passagiere zu, erhöht sich das Gewicht um etwa 150 kg oder 9,5 % auf 1725 kg. Steigen zwei Passagiere aus, verringert sich das Gewicht um etwa 150 kg oder 10 % auf 1575 kg. Das Gewicht des Fahrzeugs ändert sich also lediglich um ± 10 % zwischen dem leeren und beladenen Zustand. Hierfür ist eine konstante Federrate ausreichend.

Lediglich für Kleinwagen, bei denen der Anteil des Personengewichts, gemessen am Gesamtgewicht, vergleichsweise groß ist, wäre eine Luftfederung von Vorteil. Dies ist aber preislich nicht durchsetzbar, da die Druckluftversorgung bei Pkw üblicherweise nicht vorhanden, und damit ein erheblicher Mehraufwand verbunden ist.

2.3.2 Vergleich: Luftfeder Gasfeder
Beide Federnarten arbeiten nach dem Prinzip der Volumenfederung. Die Unterschiede liegen lediglich im Material, welches das federnde Medium (im allgemeinen Luft oder Gas) umhüllt.

Bei der Gasfeder ist das umhüllende Material ein meist aus metallischem Werkstoff hergestellter Zylinder, in dem sich ein Kolben auf- und ab bewegt.

Luftfedern bestehen aus mindestens drei Bauteilen:

a.) dem eigentlichen Luftfederbalg, einem schlauchartigen Bauteil aus elastomerem Werkstoff, versehen mit einem Festigkeitsträger.

b) einer Platte, durch welche dieser Schlauch oben verschlossen wird und die gleichzeitig als Verbindungsteil zur abzufedernden Last dient.

c) einem Abrollkolben auf der Unterseite des Luftfederbalges, der bei Einsatz im Fahrzeug mit der Achse verbunden ist.

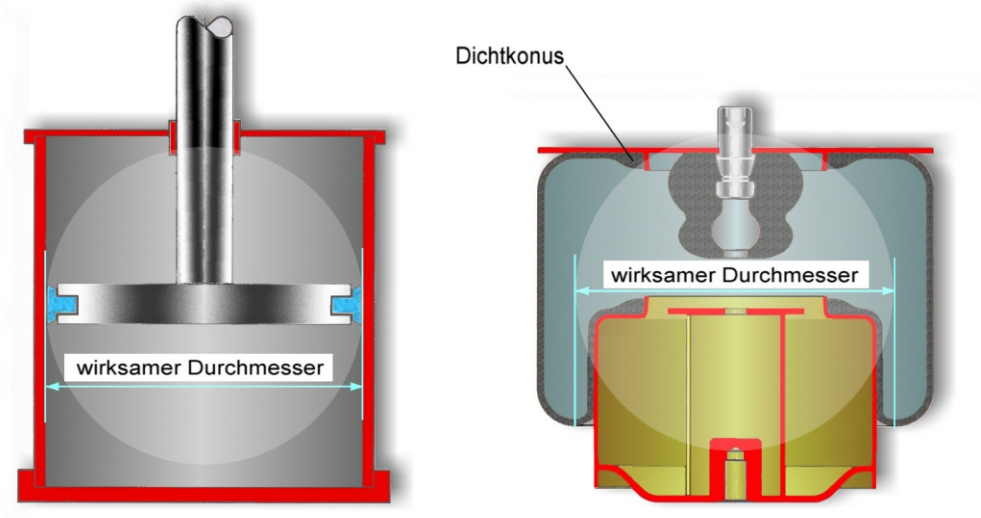


Bild 4: Vergleich Gasfeder Luftfeder

Bei gleichem Kraft / Druck Verhältnis ist der Durchmesser einer Luftfeder immer größer als der einer Gasfeder. Dafür benötigt eine Luftfeder für den gleichen Hub weniger Baulänge als eine Gasfeder. Die Mindestlänge einer Gasfeder entspricht dem möglichen Hub plus der Höhe des Kolbens und der Abschlußplatten. Eine Luftfeder beansprucht für den gleichen Hub einen Abrollkolben von der 0,6-fachen Höhe des Hubs. Hinzu kommen die Bauhöhen der Dichtkonen und der oberen Platte.

Für den gleichen Einsatz benötigt eine Luftfeder etwa das 0,6-fache an Bauhöhe, dafür aber etwas mehr Bauraum im Durchmesser.

Gasfedern werden im Fahrzeugbau kaum als Federung eingesetzt sondern überwiegend

als Arbeitszylinder wie z.B. Türöffner bei Omnibussen, Aufsteller für Gepäckklappen usw.

2.3.3 Die wirksame Fläche

Die wirksame Fläche ist bei einer Luftfeder als die Fläche definiert, die multipliziert mit dem Druck die Federkraft ergibt. Der wirksame Durchmesser ist dann der zu dieser Fläche gehörige Durchmesser.
Bei der Gasfeder entspricht der wirksame Durchmesser dem Innendurchmesser des Zylinders, während an einer Luftfeder dieser Durchmesser an keiner Stelle direkt messbar ist. Es gibt aber Erfahrungswerte, welchen Durchmesser die wirksame Fläche bei gegebenem Kolben- und Außendurchmesser annimmt.
(mehr hierzu im Abschnitt Auslegung)

2.4 Technische Dokumentation

Luftfedern werden im allgemeinen für einen bestimmten Einsatzzweck entwickelt. Deren Herstellung aber erfordert zunächst einen immensen Investitionsaufwand für die erforderlichen Werkzeuge. Es wäre daher empfehlenswert, wenn die Luftfeder in möglichst vielen Fahrzeugtypen Verwendung fände.
Damit dies für den Fahrzeugkonstrukteur realisierbar ist, sollte eine möglichst ausführliche technische Dokumentation erstellt werden. Die hierzu gängigen Kenngrößen und Diagramme sind in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

2.4.1 Isobare und Adiabatische Kennlinien

Das Betriebsverhalten einer Luftfeder lässt sich, wie bei Federn üblich, im Druck Weg Diagramm beschreiben.
Bei Federn, welche nach dem Prinzip der Volumenfederung arbeiten, kommt neben der Federkraft und dem Weg der Druck im Federvolumen als dritte beschreibende Größe hinzu.
Luftfedern in Fahrzeugen sind normalerweise mit einer Höhenregelung versehen, auf die im Abschnitt „ Die Regelung der Luftfedern “ näher eingegangen wird.
Die Höhenregelung sorgt dafür, dass die Einbauhöhe unabhängig von der Last konstant gehalten wird.
Hierzu muss der Druck entsprechend eingestellt werden.
Die Luftfeder muss also mit einem bestimmten Druck befüllt sein, um eine Kraft-Weg-Kurve aufzunehmen.
Sinnvollerweise wählt man hierzu mehrere Drücke, die den zulässigen Druckbereich zwischen dem niedrigsten, noch möglichen Betriebsdruck (meistens 0,5 bis 1 bar) und dem höchst vertretbaren Druck abdeckt.
In den folgenden Diagrammen sind hierzu die Drücke 1; 3; 5; und 7 bar gewählt.
Zur besseren Lesbarkeit sind den Drücken in den Diagrammen die folgenden Kennfarben zugewiesen:

Grün	1 bar
Blau	3 bar
Rot	5 bar
Schwarz	7 bar

Zur Aufnahme der Kraft-Weg-Kurve, der Kennlinie einer Luftfeder, wird diese in eine geeignete Prüfmaschine eingespannt, und die Federkraft bei durchfahrenem Federweg gemessen.
Bei Federn mit linearer Kennlinie wie Blatt und Schraubenfedern, die nach dem Prinzip der Formfederung arbeiten, nimmt die Kraft mit dem Einfederweg kontinuierlich zu.

Dadurch entsteht auf einem angeschlossenen X -Y Schreiber eine gerade ansteigende Linie.

Bei einer Luftfeder basiert das Verhältnis zwischen Einfederweg und Druckanstieg auf der Isentropengleichung. (vgl.: Formel 1)

Adiabatische Kennlinien:
Wird der Federweg einer Luftfeder bei geschlossener Luftzufuhr schnell durchfahren, d.h. mit einer Prüffrequenz von ca. 0,5 Hz, so entsteht eine sogenannte Adiabatische Kennlinie. Diese ist vergleichbar mit der Kennlinie einer Stahlfeder. Aufgrund der Materialdämpfung des Luftfederbalges ergibt sich eine Hysterereschleife. Diese Dämpfung ist jedoch zu gering um technisch nutzbar zu sein. Sie sollte auch so klein als möglich sein, damit der Luftfederbalg der ja aus elastomerem Werkstoff besteht, so wenig wie möglich durch Wärmeeinwirkung belastet wird. Der Ausdruck adiabatisch ist nicht ganz korrekt, da ein geringer Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet.

Isobare Kennlinien:
Hält man beim Durchfahren des Federweges den Druck durch einen geeigneten Druckregler konstant, so entstehen sogenannte Isobare Kennlinien - Kurven gleichen Drucks.
Diese Kurven geben den Verlauf der wirksamen Fläche wieder. Dividiert man die abgelesenen Druckwerte durch den konstanten Druck, bei dem die Kennlinie aufgenommen wurde, so erhält man die Größe der wirksamen Fläche. Isobare Kennlinien werden auch Hebekurven genannt.
Sie geben uns Aufschluss über das Hubvermögen der Luftfeder bei Einsatz in Fahrzeugen mit Wechselaufbauten.

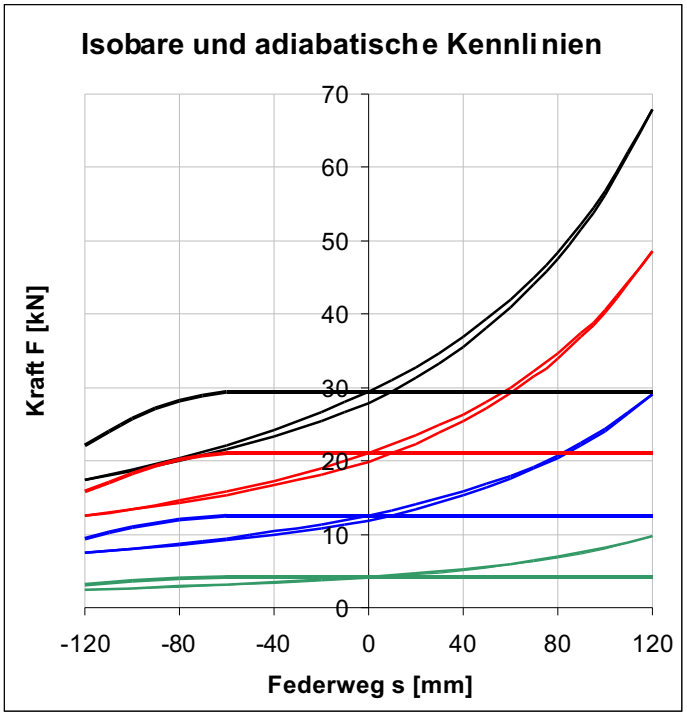


Diagramm 1: Isobare und Adiabatisch Kennlinien

Aus dem bei der Messung der Isobaren und Adiabatischen Kennlinien entstandenen Kennlinienblatt lassen sich bei bekannter Geometrie die übrigen Kenngrößen einer Luftfeder ableiten.
Die Federrate entspricht der Steigung der Adiabatischen Kennlinie im Nulldurchgang. Mit der so ermittelten Federrate und der gleichzeitig dort abgelesenen Tragkraft lässt sich die Eigenfrequenz errechnen. Aus den Geometriedaten Durchmesser und Faltenhöhe kann das Volumen der Feder errechnet werden.
Liegt ein Kennlinienfeld auf dem Papier vor, ist es nicht exakt möglich, die Steigung der Kennlinien zu bestimmen. Es bietet sich daher an, da die Messwerte üblicherweise elektronisch aufgenommen und ausgewertet werden, die für den Fahrzeugkonstrukteur relevanten Daten in gesonderten Diagrammen darzustellen.

Im nachfolgenden Diagramm sind die Isobaren Kennlinien noch einmal separat dargestellt. Wie bereits erwähnt, werden diese Kennlinien auch Hebekurven genannt. Der Fahrzeugkonstrukteur kann hieraus den notwendigen Druck ablesen, mit dem aus der Konstruktionslage heraus eine bestimmte Hubhöhe erreicht werden kann. Im dargestellten Beispiel ist zum Heben um ca. 60 mm eine Druckerhöhung von 5 bar auf rund 7 bar notwendig. Zusammen mit der Volumenkurve kann so die Kapazität der Druckluftversorgung bestimmt werden. Es sollte möglich sein, auch bei nicht laufendem Motor mit dem Vorratsvolumen zwei Hubvorgänge durch zuführen.

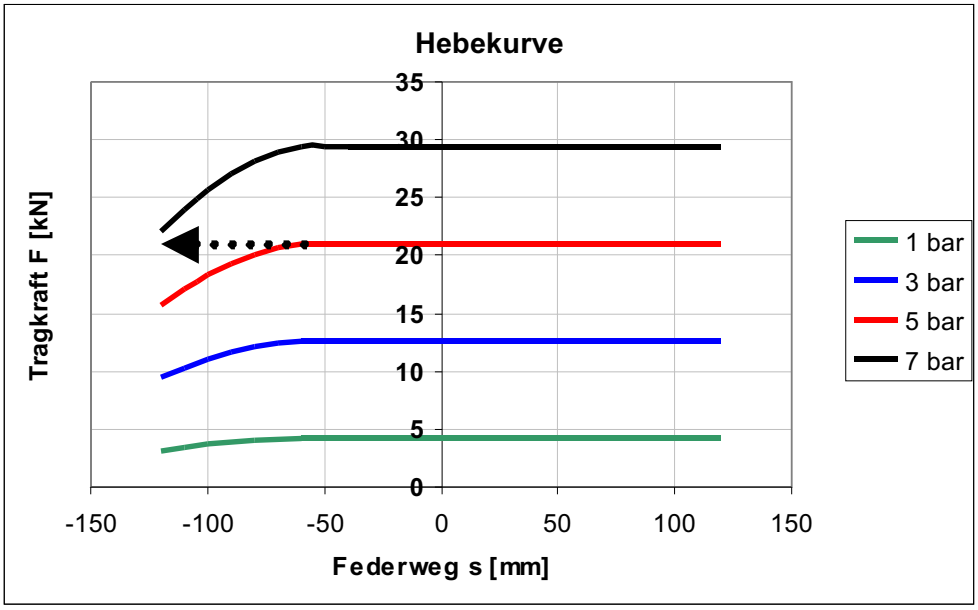


Diagramm 2: Hebekurve

2.4.2 Tragkraft Druckdiagramm
Aus den bisher beschriebenen Diagrammen lässt sich ablesen, welche Tragkraft sich bei welchem Betriebsdruck einstellt. Für den Fahrzeugkonstrukteur ist es jedoch interessanter zu wissen, welcher Druck für eine gegebene Tragkraft notwendig ist. Im Diagramm 3 ist daher die Tragkraft über dem Druck aufgetragen.
Die Angaben aus diesem Diagramm werden benötigt um die Lastaufteilung zwischen Antriebs- und Nachlauf- bzw. Vorlaufachse auszulegen.

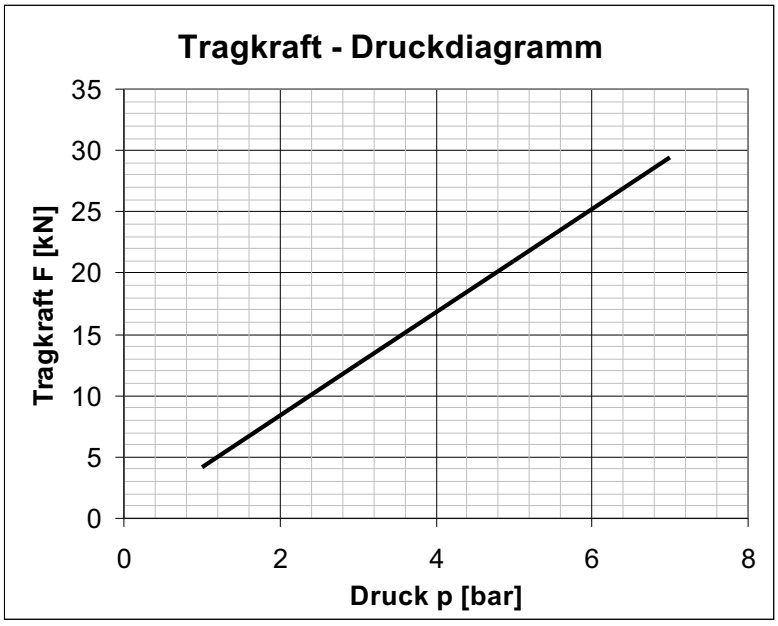


Diagramm 3: Tragkraft Druckdiagramm

2.4.3 Federrate und Eigenfrequenz als Funktion der Einbauhöhe

Mit Hilfe der Höhenregelanlage können Luftfedern auf verschiedene Einbauhöhen eingestellt werden. Vergrößert sich die der Einbauhöhe, erhöht sich natürlich auch das Federvolumen. Mit größerem Federvolumen wird die Feder weicher, d.h. die Federrate und damit auch die Eigenfrequenz verringern sich. Dieses hat Einfluss auf sowohl auf den Fahrkomfort als auch auf das Kurvenverhalten eines Fahrzeugs. Diese beiden Werte sind ausschlaggebend für die Auslegung der Stoßdämpfer und des Stabilisators

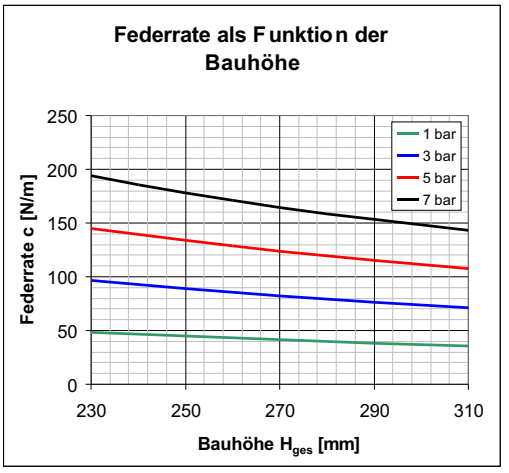


Diagramm 4: Federrate als Funktion der Bauhöhe

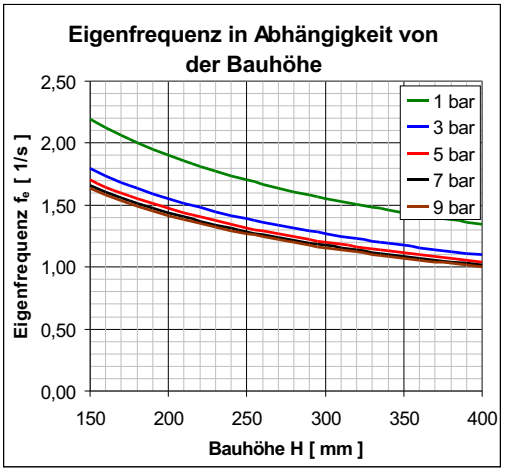


Diagramm 5: Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Bauhöhe

Es ist allgemein erwünscht, dass sich die Federungseigenschaften eines Fahrzeugs dem Beladungszustand anpassen. Mit einer Luftfederung ist dieses bei günstiger Auslegung weitgehend möglich. Wird die Last größer, erhöht sich auch die Federrate. Auf diese Weise nimmt die Federung für jeden Lastzustand die passende Federrate an. Das Diagramm „Eigenfrequenz als Funktion der Einbauhöhe“ macht jedoch deutlich, dass die Eigenfrequenz druckabhängig ist. Mit abnehmendem Druck wird die Feder progressiv härter.
Bei der Auslegung sollte man deshalb drauf achten, dass die Luftfeder möglichst immer im oberen Bereich des Kennfeldes betrieben wird. Gefühlsmäßig ist eine mit hohem Druck betriebene Feder hart und eine mit niedrigem Druck betriebene weich. In der Realität erreicht man jedoch bei einer mit höherem Druck betriebenen Feder eine geringere Eigenfrequenz, als bei solcher, die mit niedrigem Druck betrieben wird.

2.4.4 Durchmesser und Faltenhöhe als Funktion der Einbauhöhe

In der technischen Dokumentation für eine Luftfeder sollte auch die Beschreibung der Geometrie in den verschiedenen Betriebszuständen nicht fehlen. Dazu gehören Konstruktionsanlage, ein- und ausgefederter Zustand, sowie unter verschiedenen Betriebsdrücken. Diese Angaben helfen dem Fahrzeugkonstrukteur, den Raumbedarf für eine Luftfeder im Fahrzeug abzuschätzen. Weiterhin lässt sich aus diesen Messwerten das Volumen der Luftfeder errechnen.

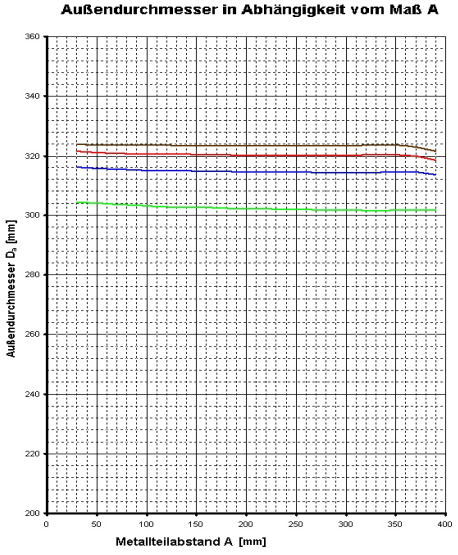


Diagramm 6: Aussendurchmesser als Funktion des Metallteilabstands A

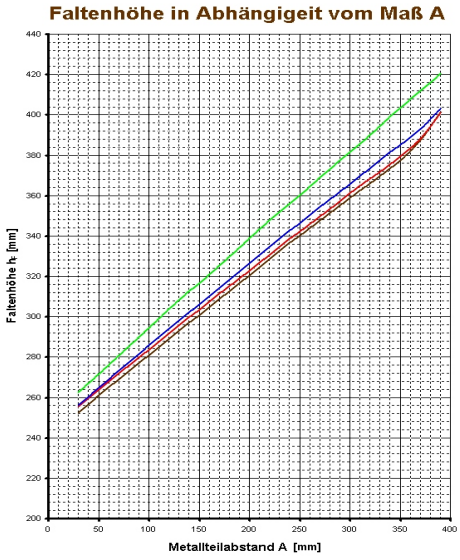


Diagramm 7: Faltenhöhe als Funktion des Metallteilabstands A

Die beiden obigen Diagramme kommen zustande, indem man während des Durchfahrens des Federweges kontinuierlich oder punktweise diese Größen misst.
Sowohl beim Durchmesser als auch bei der Faltenhöhe liegen alle Kurven recht dicht beieinander mit Ausnahme der Kurven für 1 bar.

2.4.5 Volumenkurve

Bei einer Rollbalgluftfeder ist die Volumenkurve eine Gerade. Das Volumen nimmt mit steigender Ausfederung linear zu. Bestimmt werden kann dieses aus der gemessenen Geometrie des Luftfederbalges. Wie aus den Diagrammen für den Durchmesser und die Faltenhöhe hervorgeht, sind diese Größen nur wenig vom Druck abhängig und einigermaßen linear.

Für die Beschreibung einer Luftfeder reicht es daher in vielen Fällen vollkommen aus, das Balgvolumen bei einer bestimmten Einbauhöhe und die Steigung der Volumenkurve, den sog. Volumengradienten anzugeben.

Mit Hilfe der Volumenkurve und Hebekurve lässt sich die Kapazität der Druckluftversorgungsanlage bestimmen.

Aus dem Tragkraft- Druck Diagramm liest man den für eine bestimmte Tragkraft notwendigen Druck ab. Die Volumenkurve gibt das Volumen zu der vorgesehenen Einbauhöhe an.

Aus der Hebekurve ersieht man dann den notwendigen Druck, mit dem eine bestimmte Hubhöhe erreicht werden kann. Die Volumenkurve zeigt das Volumen der durch den Hub erreichten Gesamthöhe an.

Jetzt kennt man für die beiden Zustände „Fahrhöhe“ und „angehobenen Zustand“ den Druck und das Federvolumen. Die zusätzliche Luftmenge, die für das größere Volumen im angehobenen Zustand, sowie für den höheren Druck notwendig ist, muss von der Druckluftversorgungsanlage bereitgestellt werden.

Die Bestimmung von Volumen und Volumengradienten aus Messwerten und Auslegungsdaten ist im Abschnitt „Berechnung des Volumens“ und „Bestimmung des Volumengradienten“ ausführlich beschrieben.

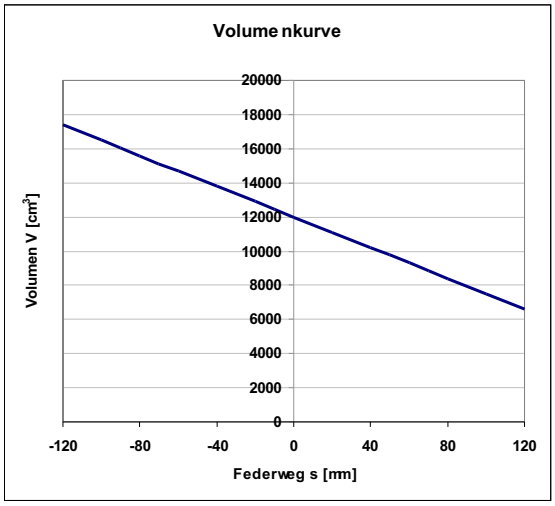


Diagramm 8: Volumenkurve

Wie Diagramm 8 zeigt, ist es möglich, die Volumenkurve bei vorgegebener Einbauhöhe über dem Federweg darzustellen. Da Luftfedern jedoch innerhalb gewisser Grenzen mit verschiedenen Einbauhöhen betrieben werden können, wäre es sinnvoll, die Volumenkurve in Abhängigkeit von der Einbauhöhe darzustellen, oder beide Skalen in das Diagramm einzutragen.

2.4.6 Erreichter Spitzendruck als Funktion der Einbauhöhe

Wie bereits erwähnt, können Luftfedern mit verschiedenen Einbauhöhen eingesetzt werden. Bevor man die Luftfeder in einer größeren Einbauhöhe betreibt, muss sicher gestellt sein, dass keine zu hohen Spitzendrücke entstehen. Sie können das Material, insbesondere den Festigkeitsträger langfristig überlasten.
Das Volumen einer Luftfeder im ganz eingefedertem Zustand ist immer gleich groß und kann aus der Volumenkurve abgelesen werden.

Je nach Einbauhöhe variiert das Volumen in der Fahrhöhe. Der Druck, der sich zum Ende des Einfederweges einstellt, ist von dem Verhältnis der Volumina gemäß der Isentropenbeziehung:

$$p_1 = p_0 \left(\frac{V_0}{V_1}\right)^{\chi}$$

Formel 3

abhängig.

Die beim Einfedern erreichten Spitzendrücke lassen sich mit Hilfe der Volumenkurve errechnen oder man misst bei der Messung der Adiabatischen Kennlinie auch die Drücke mit, z.B. mit einem Manometer mit Schleppzeiger.
In den meisten Fällen wird die Messung bevorzugt, da die Rechnung von idealisierten Bedingungen ausgeht. Bei der Rechnung werden gegenüber der Messung in der Realität auftretende Effekte, wie eine Vergrößerung des Volumens durch Materialdehnung vernachlässigt. Die Rechnung kommt daher immer zu höheren Druckwerten und ist damit dann allerdings auch auf der sicheren Seite.
Kennt man den ertragbaren Spitzendruck eines vorhandenen Luftfederbalges und möchte diesen in einer neuen Anwendung mit größerer Einbauhöhe einsetzen, so sollte man den beim Einfedern erreichten Spitzendruck ermitteln, und mit dem ertragbaren Druck vergleichen.

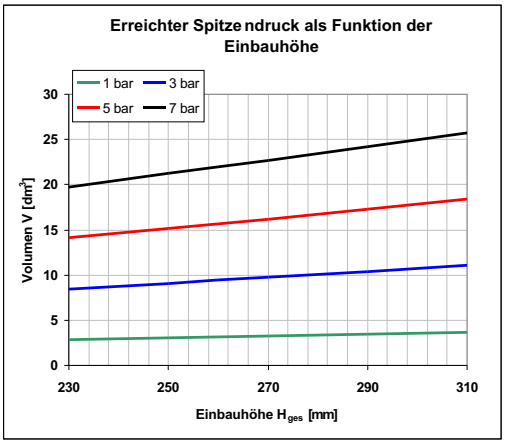


Diagramm 10: Erreichter Spitzendruck am Ende der Einfederung als Funktion der Bauhöhe. Je größer die Bauhöhe desto größer der mögliche Einfederweg.
Kleines Zusatzvolumen

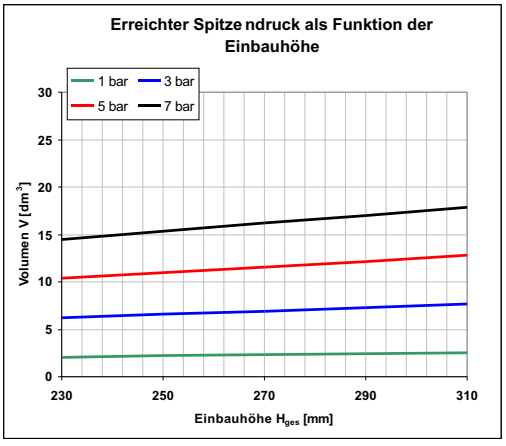


Diagramm 11: Erreichter Spitzendruck am Ende der Einfederung als Funktion der Bauhöhe. Je größer die Bauhöhe desto größer der mögliche Einfederweg.
Großes Zusatzvolumen

Das linke Diagramm 10 lässt folgendes erkennen: Bei einem statischen Druck von 7 bar ergibt sich ein Spitzendruck von 26 bar, wobei von einer Einbauhöhe von 310 mm ausgegangen wird. Dieser Druck würde für die meisten Bälge zu einer Überlastung des Festigkeitsträgers führen. Vergrößert man das Kolbenvolumen um 2,5 dm^3 so ergibt sich das rechte Diagramm auf Seite 13 unten. Hier wird nur ein Druck von ~ 18 bar erreicht, der wahrscheinlich zu vertreten ist. Aufgrund des vergrößerten Gesamtvolumens ergibt sich natürlich auch eine kleinere Federrate und Eigenfrequenz. (vgl.: Formel 1)
Der als dynamischer Spitzendruck ertragbare Druck ist nicht der Druck, der im Berstversuch ermittelt wird. Auch unterhalb dieses Druckes kommt es zu irreversiblen Schädigungen des Festigkeitsträgers, die längerfristig zum Ausfall durch Bersten führen können. Im Abschnitt „Nachrechnung der Festigkeit“ wird hierauf näher eingegangen.

3.Berechnungen an Luftfedern

3.1 Auslegung von Luftfedern

Im folgenden Beispiel ist die Luftfederauslegung an einer klassischen Rollbalgluftfeder mit Dichtkonen beschrieben. Es geht hier hauptsächlich darum, wie die Anforderungen des Kunden im Allgemeinen des Fahrzeugherstellers umgesetzt werden. Dieses ist vom Konstruktionsprinzip der Luftfeder wie Abdichtung durch Dichtkonus Bördelplatte oder Spannring und der Anbindung des Abrollkolbens zunächst relativ unabhängig.

3.1.1 Variantenkonstruktion

Wird die Luftfeder neu ausgelegt, so geschieht das in aller Regel innerhalb des bisherigen Anwendungsbereichs von Rollbalgluftfedern. Deren Durchmesser liegen etwa zwischen 250 und 370 Millimetern. Im Hinblick auf seine Geometrie wird der Luftfederbalg einem bereits bestehenden im druckbeaufschlagtem Zustand ähneln.

Vom Kunden erhält man meistens folgende Vorgaben zur Entwicklung einer neuen Luftfeder:

zur Verfügung gestellte Einbauhöhe	H_{ges}
zur Verfügung gestellter Einbau ø	D_a
geforderter Einfederweg	**e**
geforderter Ausfederweg	**a**
geforderte Tragkraft	**F**
zur Verfügung gestellter Betriebsdruck	**p**
Federrate und Eigenfrequenz	f_e , **c**

Oft sind nicht alle Forderungen gleichzeitig erfüllbar. Der Kunde muss dann abwägen, welche Merkmale für ihn relevant sind, und wo er Kompromisse eingehen kann.
Meistens liegen die Tragkraft und der zur Verfügung gestellte Einbauraum sowie der Einfederweg fest. Beim Betriebsdruck gelten 7 bar als noch gut beherrschbar und die meisten fahrzeugseitigen Druckluftversorgungsanlagen sind hiermit noch nicht überfordert.
Der geforderte Ausfederweg muß näher definiert werden:

Handelt es sich um den Weg, bei dem die Luftfeder in der Lage ist, diesen dynamisch auszufedern, und dabei die Gefahr einer Überdehnung ausschließt?

ist der Hubweg gemeint, um den der Fahrzeugaufbau bei konstantem Druck angehoben werden können soll? (kommt am häufigsten vor)

wird bei dem Hubweg unter b) eine Erhöhung des Drucks in der Luftfeder akzeptiert? (dieses bedeutet erheblich verlängerte Hubzeiten oder größeres Luftvorratsvolumen)

Bei Fahrzeugen zur Personenbeförderung wird großer Wert auf eine Eigenfrequenz von ~ 1 Hz gelegt; bei Lkw und Anhängern sind diese meist von sekundärer Bedeutung, solange die Eigenfrequenz in einem Bereich von etwa 1 bis 1,5 Hz liegt.

Folgender Ablauf wird in den meisten Fällen praktiziert:

Man geht von einem Betriebsdruck von 7 bar aus und errechnet mit der geforderten Tragkraft die notwendige wirksame Fläche, und daraus den wirksamen Durchmesser.
Ist dieser ermittelt, bestimmt man den Kolbendurchmesser mit Hilfe des folgenden Diagramms.

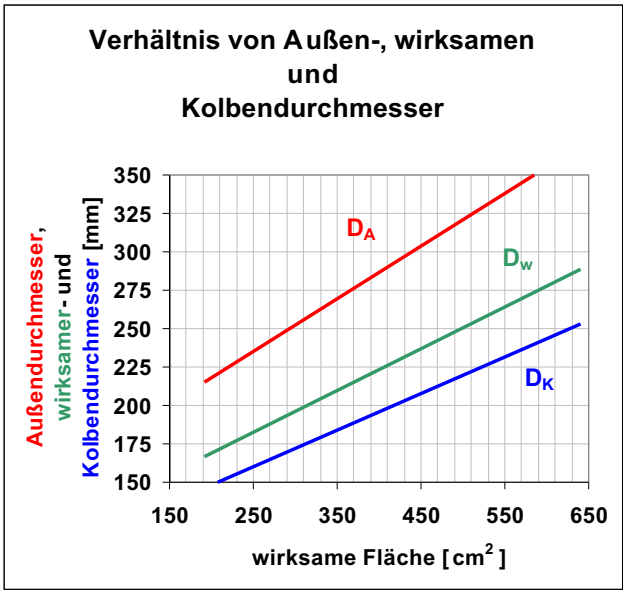


Diagramm 12: Verhältnis von Außen- wirksamen- Kolbendurchmesser

Hat man den wirksamen Durchmesser gefunden, liest man aus dem obigen Diagramm den passenden Kolbendurchmesser ab.
Existiert ein Kolben mit geringfügig abweichendem Durchmesser bereits als Serienteil, oder gibt es ein Tiefziehwerkzeug für diesen Durchmesser, so sollte man damit weitermachen.

Der Luftfederbalg besteht aus Werkstoffen, sich unter Innendruck mehr oder weniger stark dehnen. Jedoch lässt sich der Betrag der Dehnung während der Auslegung nicht exakt einordnen. In diesem Falle führt es schneller zum Ziel, wenn man den Außendurchmesser im Versuch bestimmt.

Bestimmung der Durchmesser
Man misst den Durchmesser und die Tragkraft eines Luftfederbalges, der mit diesen Werten in der Nähe der geforderten Größen liegt auf dem ausgewählten Kolben. Sind Durchmesser und Tragkraft kleiner *als die geforderten*, macht man Messungen mit Versuchsmustern, deren Wickelwinkel man in Stufen von 0,5 ° erhöht, bis der zur Verfügung gestellte Einbaudurchmesser erreicht ist. Liegt der notwendige Druck für die geforderte Tragkraft jetzt deutlich über 7 bar, kann man den Kolbendurchmesser vergrößern. Die Differenz zwischen Außen- und Kolbendurchmesser sollte allerdings nicht kleiner als 70 bis 80 Millimeter sein. Ist der Durchmesser zu groß, verfährt man in umgekehrter Reihenfolge. Der Wickelwinkel

wird solange verkleinert, bis der Einbaudurchmesser nicht mehr überschritten wird. Eine zu kleine Differenz, der Faltenbreite, wirkt sich bei Luftfedern mit vergleichsweise kleinem Durchmesser gravierender aus, als bei solchen mit größerem Durchmesser. Dieses liegt daran, daß bei kleinen Luftfederdurchmessern die Balgwand in zwei Ebenen um enge Radien gebogen wird. Hat man auf diese Weise einen Luftfederbalg gefunden, der auf dem vorgesehenen Kolben den erwarteten Durchmesser einnimmt und die richtige Tragkraft liefert, kann die Länge der Balgform bestimmt werden.

Bestimmung der Länge der Balgform
Auch die Länge der Balgform läßt sich auf einfache Weise im Versuch ermitteln. Auf einem Luftfederbalg, wie im obigen Absatz beschrieben, wird wie im Bild dargestellt ein vertikaler Strich von 100 Längeneinheiten gezogen. **(L_0)**

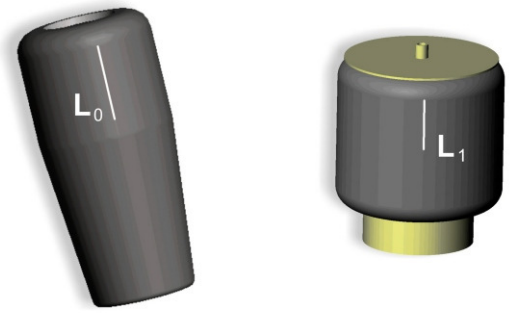


Bild 5: Bestimmung der Balglänge

Der Luftfederbalg wird eingebaut und mit Druck beaufschlagt. Der Strich von der Länge L_0 hat sich jetzt aufgrund der Durchmesservergrößerung verkürzt und die Länge L_1 angenommen. Das Verhältnis zwischen L_0 und L_1 sollte etwa **0,8** betragen.

In der Entwurfsskizze auf der folgenden Seite sind die vom Kunden vorgegebenen Maße grün, und die daraus hergeleiteten Maße rot eingetragen.
Will man jetzt die Höhenmaße der Luftfeder feststellen, geht man wie folgt vor:

Die zur Verfügung gestellte Einbauhöhe H_{ges} abzüglich des geforderten Einfederweges **e** und der notwendigen Höhe für die Dichtkonen von ca. 2 x 20 mm ergibt die mögliche Kolbenhöhe H_k.

Die Kolbenhöhe H_k teilt sich wie folgt auf: in den Faltenüberhang $F_ü$ und die freie Kolbenlänge F_k . Die freie Kolbenlänge F_k beträgt das **0,6**-fache des Einfederweges **e**. Die Differenz zur Kolbenhöhe H_k ergibt jetzt den Faltenüberhang $F_ü$.
Das **1/0,6** -fache des Faltenüberhangs ergibt den möglichen Hubweg bei konstantem Druck.

Die Längen H_k, $F_ü$ und F_k markiert man auf einem Kolben mit ausreichender Länge und korrektem Durchmesser.

Der Luftfederbalg wird dann so eingebaut, dass das Faltenende bei der Markierung $F_ü$

unabhängig von H_{ges} endet. Jetzt notiert man die Differenz zwischen der gewünschten und der eingestellten Einbauhöhe. Diese Differenz multipliziert mit dem Verhältnis von L_0 zu L_1 ergibt die notwendige Verkürzung oder Verlängerung der Vulkanisationsform.

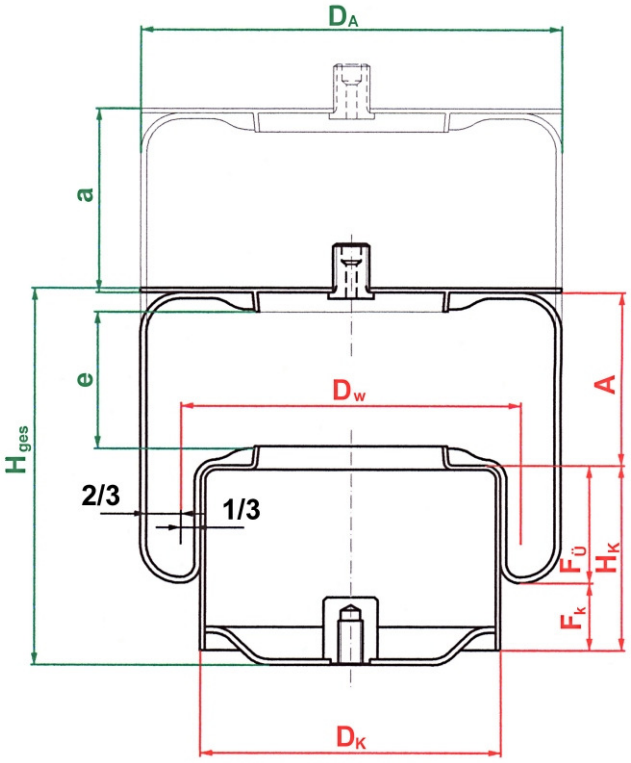


Bild 6: Vom Kunden vorgegebene Daten (grün eingezeichnet) und daraus hergeleitete Produktabmessungen.

wirksamer Durchmesser	D_w
Wirksamer Durchmesser	Dw
Abstand zwischen Kolbenschulter und Platte	A
Kolbendurchmesser	D_k
Kolbenhöhe	H_k
Faltenüberhang	$F_ü$
freie Kolbenlänge Formverlängerung-/ verkürzung	F_k

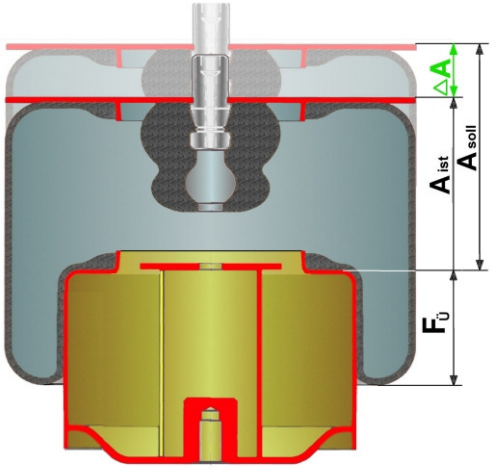


Bild 7: mit kürzerem Balg eingestellter Metallteilabstand $\mathbf{A_{IST}}$ (bei gewolltem Faltenüberhang $\mathbf{F_{Ü}}$) und gewollter Metallteilabstand $\mathbf{A_{SOLL}}$

Bild 8: Formverlängerungsring grün eingezeichnet

Der Einfachheit halber gehen wir davon aus, dass die Vulkanisationsform verlängert werden muss. Im obigen Bild ist ein Luftfederbalg gezeigt, der dem neu zu konstruierenden im Durchmesser unter Druck gleicht. Der Metallteilabstand A ist so eingestellt, dass der Faltenüberhang $\mathbf{F_{Ü}}$ dem gewollten Faltenüberhang, mit dem sich die geforderte Hubhöhe erreichen lässt, entspricht. Der Metallteilabstand ist natürlich zu klein um die geforderte Einfederung zu ermöglichen. Um bei gleichem Faltenüberhang einen grösseren Abstand A zu erhalten, muss der Balg und damit die Vulkanisationsform verlängert werden.
Das Maß, um das die Vulkanisationsform des neuen Balges länger sein muss als die , aus der der für die Messung verwandte Balg stammt, lässt sich aus dem Verhältnis von $\mathbf{L_0}$ zu $\mathbf{L_1}$ (siehe Bild 5) bestimmen.

In die Vulkanisationsform muss also ein zusätzlicher Ring eingefügt werden, um die Form zu verlängern. Die Länge diese Ringes beträgt

$$\Delta \mathbf{L_0} = \Delta A \times \mathbf{L_0} / \mathbf{L_1}$$

3.1.2 Abstimmung mit der Sekundärfeder

Die in der Luftfeder eingebauten Zusatzfedern werden allgemein als Puffer bezeichnet.
Hier unterscheidet man zwei Arten von Zusatzfedern: a) solche, die nur wenige Millimeter

vor dem Ende des Hubes wirksam sind sogenannte Endanschlagpuffer und b) solche Federn, die nach etwa der Hälfte des Einfederwegs in Funktion treten.

Endanschlagpuffer werden hauptsächlich in Fahrzeugen zu Güterbeförderung eingesetzt und verhindern, dass sich Kolben und Platte der Luftfeder berühren. Sie haben sonst keinen nennenswerten Einfluß auf die Federcharakteristik der Luftfeder.

Sekundärfedern sind Zusatzfedern, die über einen Großteil des positiven Federweges wirksam sind. Sie werden überwiegend in Fahrzeugen zur Personenbeförderung eingesetzt. Das Fahr- und Komfortverhalten dieser Fahrzeuge wird durch die Auslegung der Sekundärfeder nachhaltig beeinflußt. Die Kennlinie der Luftfeder einschließlich des Puffers ist stark progressiv. Bei Fahrzeugen mit niedrigen Schwerpunkt und geringem Stabilisierungsbedarf kann bei geeigneter Auslegung der Luftfeder mit internem Puffer auf einen Bügelstabilisator verzichtet werden.

Um diese Art von Puffern geht es in den folgenden Ausführungen.

Eine Luftfeder mit integriertem Puffer besteht aus zwei parallel geschalteten Federn mit unterschiedlichem Wirkungsprinzip.
Die Luftfeder arbeitet nach dem Prinzip der Volumenfederung. Der Puffer besteht meistens aus inkompressiblem Gummi und arbeitet damit nach dem Prinzip der Formfederung. Es gibt aber auch Puffer, die aus aufgeschäumtem Material bestehen. Hier ist die im Schaum eingeschlossene Luft das federnde Medium.
Diese Puffer arbeiten nach dem Prinzip der Volumenfederung. Ihre Federcharakteristik hängt jedoch nicht sehr stark von Innendruck der Luftfeder ab. Bei der rechnerischen Auslegung braucht man hierauf jedoch keine Rücksicht nehmen.
Eine Feinabstimmung im Fahrversuch wird in jedem Fall notwendig sein.

Diese beiden Federn arbeiten nach unterschiedlichen Prinzipien. Beim Zusammenfügen muss also ein Kompromiss gefunden werden, bei dem die Kennlinien des Puffers sowohl bei beladenem als auch bei leerem Fahrzeug tangential in die Kennlinien der Luftfeder übergeht.

Folgende Parameter können hierzu variiert werden:

Form und Größe des Puffers

Verwendetes Material

Einfederweg bis zum Pufferkontakt

Zuerst wird man natürlich immer, wenn möglich, einen bereites vorhandenen Puffer verwenden und
In diesem Fall wird man versuchen, den Abstand zwischen Puffer und Pufferstütze solange zu variieren, bis ein befriedigendes Ergebnis erreicht ist.
Dieses ist der Fall, wenn die zu Ende des konstruktiv vorgesehenen Einfederweges erreichte Kraft etwa dem 3fachen der statischen Kraft bei beladenem Fahrzeug entspricht.
Zur rechnerischen Auslegung können die aus den Kennlinien von Luftfeder und Puffer abgelesenen Kräfte addiert werden.
Hierzu steht ein unter Excel laufendes VBA Makro zu Verfügung, welches im Folgenden näher beschrieben wird:

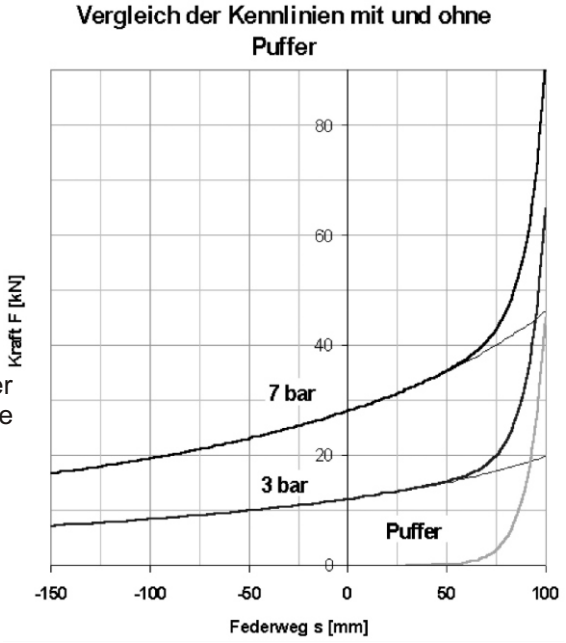


Diagramm 13 Addition der Pufferkennlinie

Das Diagramm zeigt eine brauchbare Auslegung einer Luftfeder mit Sekundärfeder. Bei 7 bar läuft die Kennlinie der Sekundärfeder tangential in die Kennlinie der Luftfeder hinein.
Bei 3 bar ist immer noch ein fließender Übergang vorhanden. Beide Kurven gehen zu Ende des Einfederweges asymptotisch in eine Senkrechte über. Beim Auslegungsdruck von 7 bar beträgt die Kraft zu Ende des Einfederweges etwa das 3fache der statischen Last in Konstruktionslage. Der Puffer kommt beim Einfedern nach etwa 30 mm sehr weich in Eingriff, sodaß kein Stoß beim Pufferkontakt spürbar sein wird.

Die Berechnung dieser Kennlinien erfolgt mit dem bereits erwähnten VBA Makro. Die Eingabemaske ist auf der nächsten Seite dargestellt.
Man benötigt die Auslegungsdaten der Luftfeder wie

gesamtes Federvolumen

wirksame Fläche

Volumengradient

Die Kennlinie des Puffers muß als Tabelle mit einem Wegabstand von 2 mm vorliegen. Mit den drei oben genannten Daten der Luftfeder werden die Adiabatischen Kennlinien errechnet.
Die Kennlinie des Puffers läßt sich dann auf dem Einfederweg verschieben. Alle Daten können solange geändert werden, bis ein befriedigendes Ergebnis erzielt ist. Eine Prüfung auf Plausibilität findet nicht statt. Man muss sich bei Auslegungsdaten vorher davon

überzeugen, daß die Daten realistisch und miteinander verträglich sind.
In der Berechnung wird davon ausgegangen, daß die wirksame Fläche konstant ist, also ein zylindrischer Kolben vorliegt.

3.1.3 Neukonstruktion
(Rohling und Form aus Betriebskontur)

Das am häufigsten angewandte Verfahren zur Auslegung eines Luftfederbalgrohlings ist das in Kapitel 3.1.1 beschriebene Verfahren.

Hierfür benötigt man zwar „Hardware“ einen ähnlichen Luftfederbalg und eine einstellbare Vorrichtung zum Messen der Geometrie. Es hat aber den Vorteil, dass es sehr schnell und sicher zum Ziel führt.

Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, d.h. man hat keinen Luftfederbalg zur Verfügung, der dem neu auszulegendem zumindest im Durchmesser unter Betriebsdruck gleicht, so kann man auch ein anderes Verfahren anwenden, welches nachfolgend beschrieben wird. Man sollte sich jedoch dessen bewusst sein, dass es einigen Rechenaufwand erfordert, und bezüglich der Genauigkeit nicht an die Auslegung im Versuch heranreicht. Grund hierfür ist, dass einige Annahmen im Hinblick auf die Fadendehnung getroffen werden müssen und, dass die Balgkontur in ein vereinfachtes Ersatzmodell umgewandelt werden muss.

3.1.3.1 Die drei Zustände des Luftfederbalges

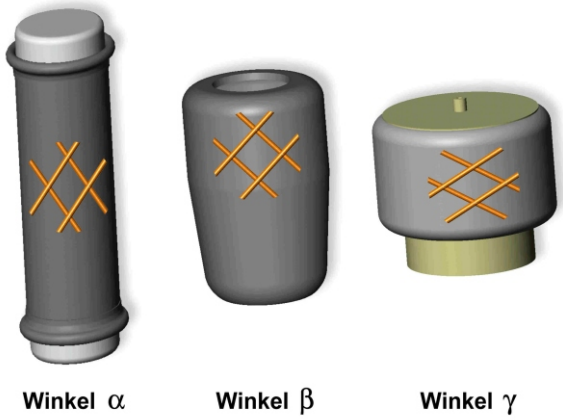


Bild 9: Die drei Zustände des Luftfederbalges

1. Der Rohling (Fadenwinkel α)
Dieses ist der Zustand vor der Vulkanisation. Die Bauteile Innengummi, innere und äußere Gewebelage sind auf dem Durchmesser der Wickeltrommel aufgewickelt. Kennzeichnend für den Rohling ist der Fadenwinkel α.

2. Der Luftfederbalg im Herstellzustand (Fadenwinkel β)
Zustand nach der Vulkanisation. Der fertig vulkanisierte Balg ist im Durchmesser größer und kürzer geworden. Der Fadenwinkel in diesem Zustand, β ist flacher geworden.

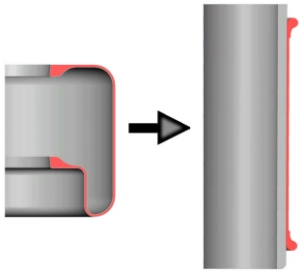
3. Der Luftfederbalg im Betriebszustand (Fadenwinkel γ)
Eingebaut zusammen mit Kolben und Platte unter Betriebsdruck. Durch den größeren Durchmesser im Betrieb ist der Fadenwinkel γ weiter abgeflacht.

Bild 9 verdeutlicht dieses. Dargestellt sind von links nach rechts der Rohling auf der Wickeltrommel, der Balg im Herstellzustand und im Betriebszustand. Auf der Oberfläche ist jeweils eine Fadenraute mit dem Kennzeichnenden Winkel α, β, γ dargestellt.

3.1.3.2 Vorgehen

Im Normalfall wird die Betriebskontur des Luftfederbalges, die sich aus den Anforderungen an die Luftfeder wie Tragkraft, Federwege, Hubvermögen und Federcharakteristik ergibt, festliegen.

Der Durchmesser der Wickeltrommel liegt durch die Konusabmessungen in engen Grenzen fest und orientiert sich zudem meistens noch an Werksnormen.

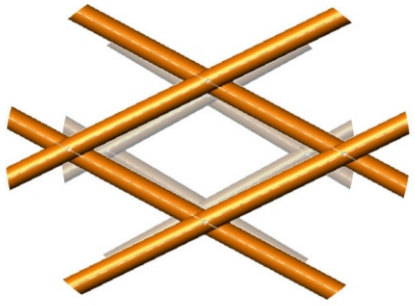


Man beginnt also damit die Betriebskontur des Luftfederbalges in eine zylindrische Kontur mit dem Durchmesser der vorgesehen Wickeltrommel umzurechnen. Das heißt, man rechnet vom durch den Fadenwinkel γ gekennzeichneten Zustand in den durch den Winkel α gekennzeichneten Zustand um.
Dazu benötigt außer den man außer den Abmessungen noch folgende Angaben:

Den Fadenwinkel im Betrieb γ (Gleichgewichtswinkel)
Die Fadenkraft und die dazugehörige Dehnung ε
(aus Kraft /Dehnungsdiagramm)

Wie aus Bild 10 ersichtlich, dehnt sich das Gewebe in radialer Richtung doppelt so viel wie in axialer.

Bild 10: Gewebedehnung in radialer und axialer Richtung



Gemäß Bild 11 teilt man jetzt die Betriebskontur des Balges in zylindrische und kegel- bzw scheibenförmige Bereiche auf.

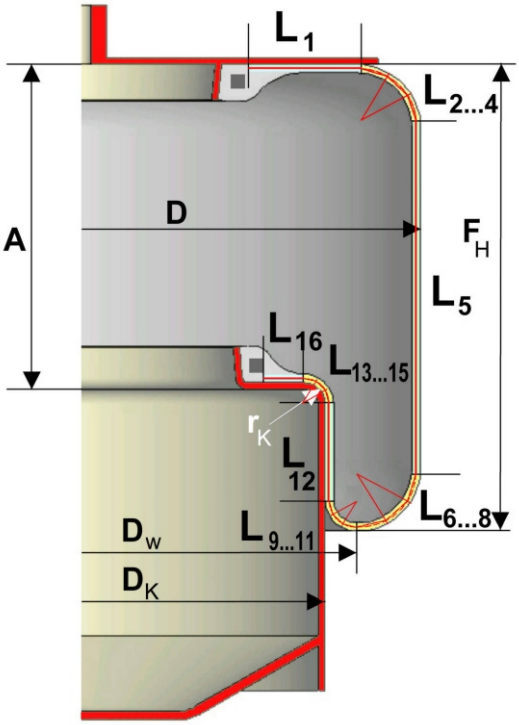


Bild 11: Aufteilung in zylindrische und konische Bereiche

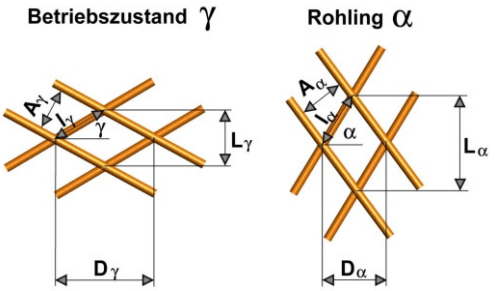


Bild 12: Fadenwinkel im Betriebszustand und im Rohling

$$L_\alpha = L_\gamma \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} (1 - \varepsilon)$$

Formel 14

$$D_\alpha = D_\gamma \frac{\cos \alpha}{\cos \gamma} (1 - \varepsilon)$$

Formel 15

Zylindrische Bereiche

Nachdem man durch Auflösen von Formel 15 nach cos α den Wickelwinkel auf dem vorgesehenem Wickeltrommeldurchmesser bestimmt hat, lässt sich mit Formel 14 die Länge der Abschnitte **L** $_5$ und **L** $_{12}$ auf die entsprechende Länge auf der Wickeltrommel umrechnen.

Bei dieser Gelegenheit sollte man gleich den Fadenabstand im Betriebsdurchmesser errechnen. Ein zu geringer Fadenabstand führt zu erhöhter Beanspruchung des Materials zwischen den Fäden. (siehe hierzu auch das Kapitel „Nachrechnung der Festigkeit“.

Der Fadenabstand errechnet sich wie folgt indem man Formel 18 nach **A** $_\gamma$ auflöst:

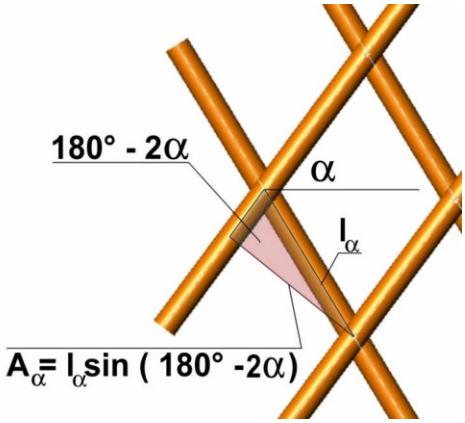
$$l_\gamma = l_\alpha \sin (1 + \varepsilon)$$

Formel 17

$$A_\alpha = A_\gamma \frac{\sin (180° - 2\gamma)(1 + \varepsilon)}{\sin (180° - 2\alpha)}$$

Formel 18

Bild 13: Fadenabstand



Kegelstumpfförmige und scheibenförmige Bereiche

Die Umrechnung der Bereiche **L** $_1$ bis **L** $_4$, **L** $_6$ bis **L** $_{11}$ und **L** $_{13}$ bis **L** $_{16}$ ist erheblich aufwendiger. Die Radien der Betriebskontur werden hierzu in kegelstumpfförmige Abschnitte zerlegt.

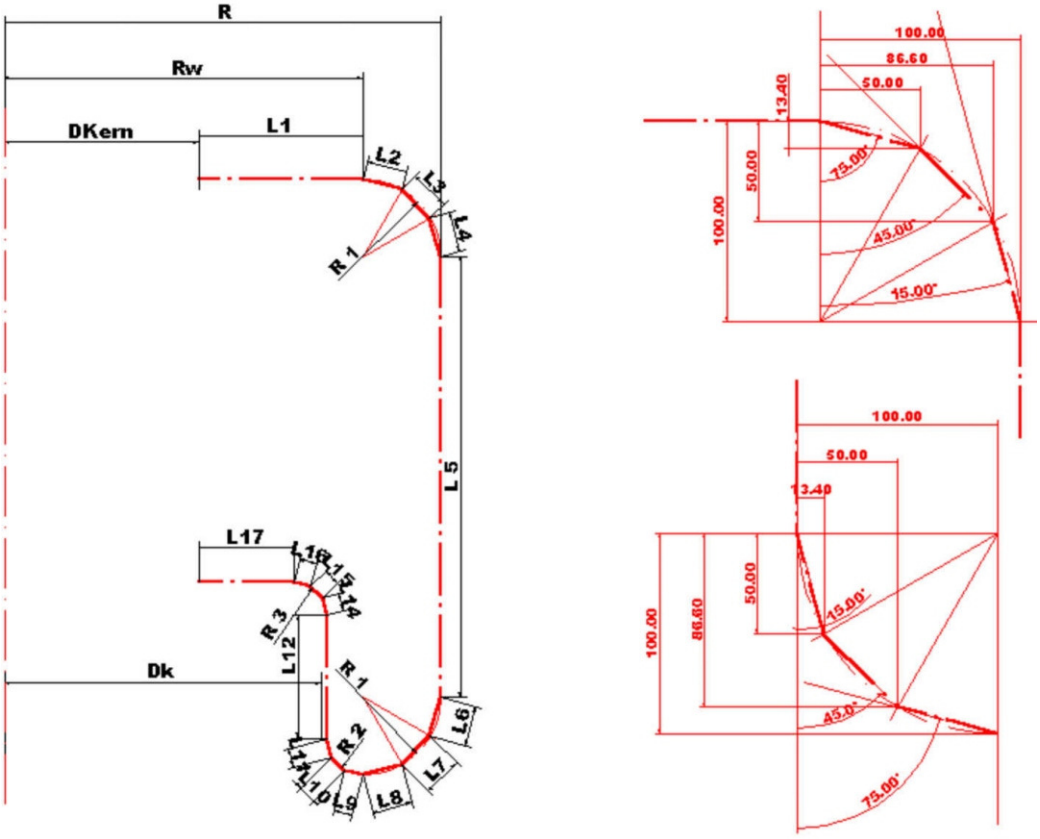
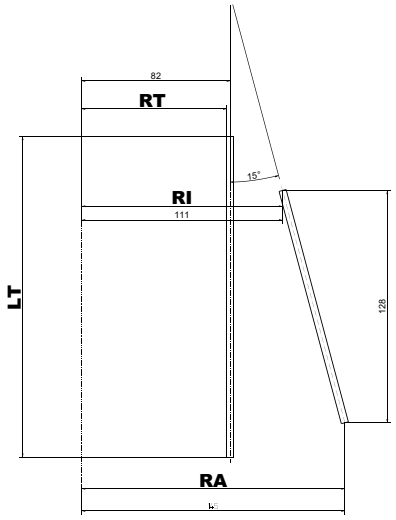


Bild 14: konische und zylindrische Bereiche

Von diesen kegelstumpfförmigen Abschnitten benötigt man dann jeweils folgende Abmessungen:



RT	Durchmesser der neutralen Faser auf der Wickeltrommel
RI	kleiner Radius des Kegelmantels
RA	großer Radius des Kegelmantels
φ	Kegelwinkel

daraus errechnet sich für jeden Abschnitt

LT	Länge auf der Wickeltrommel

Die Ergebnisse trägt man am besten in die folgende Tabelle ein:

	RA	RI	φ	LT
Länge 1	$D_w / 2$	$D_{Kern} / 2$	90	.....
Länge 2	$D_w / 2 + 0{,}5 \times R_1$	$D_w / 2$	75	.....
Länge 3	$D_w / 2 + 0{,}866 \times R_1$	$D_w / 2 + 0{,}5 \times R_1$	45	.....
Länge 4	$D_w / 2 + 1{,}00 \times R_1$	$D_w / 2 + 0{,}866 \times R_1$	15	.....
Länge 5	Formel 14		0	.....
Länge 6	$D_w / 2 + 0{,}5 \times R_1$	$D_w / 2$	15	.....
Länge 7	$D_w / 2 + 0{,}866 \times R_1$	$D_w / 2 + 0{,}5 \times R_1$	45	.....
Länge 8	$D_w / 2 + 1{,}00 \times R_1$	$D_w / 2 + 0{,}866 \times R_1$	75	.....
Länge 9	$D_w / 2$	$D_w / 2 - 0{,}5 \times R_3$	75	.....
Länge 10	$D_w / 2 - 0{,}5 \times R_3$	$D_w / 2 - 0{,}866 \times R_3$	45	.....
Länge 11	$D_w / 2 - 0{,}866 \times R_3$	$D_w / 2 - R_3$	15	.....
Länge 12	Formel 14		0	.....
Länge 13	$D_w / 2 - R_3$	$D_w / 2 - R_3 - 0{,}134 \times R_4$	15	.....
Länge 14	$D_w / 2 - R_3 - 0{,}134 \times R_4$	$D_w / 2 - R_3 - 0{,}5 \times R_4$	45	.....
Länge 15	$D_w / 2 - R_3 - 0{,}5 \times R_4$	$D_w / 2 - R_3 - R_4$	75	.....
Länge 16	$D_w / 2 - R_3 - R_4$	$D_{Kern} / 2$	90	.....
				.....

$$LT = (1 + \varepsilon) \frac{RT \tan \alpha}{\sin \varphi} \left(\arcsin \frac{RA \cos \alpha}{RT} - \frac{RI \cos \alpha}{RT} \arcsin \right)$$

Formel 19

LT für die Kegelstumpfförmigen Bereiche errechnet sich nach Formel 19

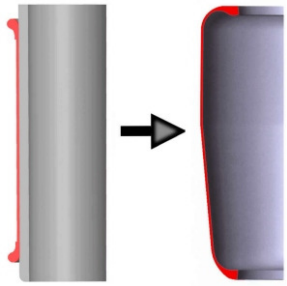
Umrechnung auf die Abmessungen der Vulkanisationsform

Die Gestalt des Luftfederbalges im Herstellzustand (Fadenwinkel β) wird durch den vorgesehenen Einsatzzweck bestimmt. Auf dieses Thema wird im Kapitel 4: „Bauarten“ näher eingegangen.

Nach Möglichkeit sollte der Formdurchmesser so gewählt werden, dass der Fadenwinkel β 45° beträgt, der Fadenabstand bei diesem Winkel ein Maximum hat. Bei Winkeländerungen wird das zwischen den Fäden liegende Gummi immer gestaucht. Der Gefahr der Lösung des Gummis vom Faden, die zum Ausfall führt, wird damit vorgebeugt.

Weiterhin sollte man darauf achten, dass der Formdurchmesser deutlich kleiner ist als der Außendurchmesser im Betrieb. Es kann sonst bei der Fertigung zwischen Rohling und Form Luft stehen bleiben, da der Innendruck bei der Vulkanisation nicht in der Lage ist, den Rohling ausreichend an die Form zu pressen. Dieses führt zu Oberflächenfehlern.

Vorgehen



Prinzipiell geht man bei der Umrechnung auf die Formabmessungen den gleichen Weg wie beim Betriebszustand.

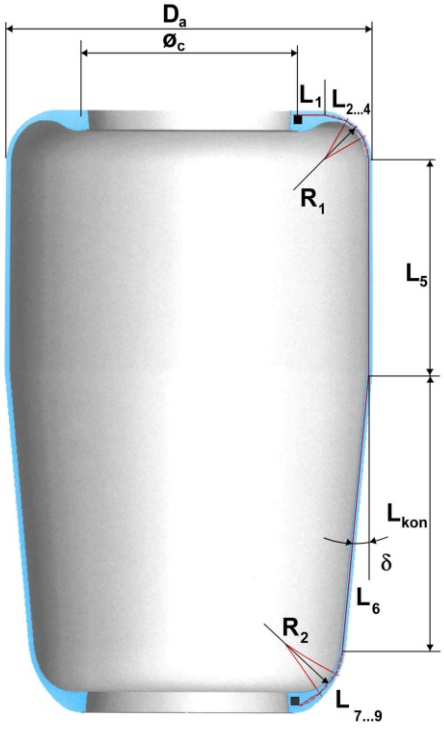


Bild 14: Aufteilung des Balges im Herstellzustand in zylindrische und konische Bereiche

Die Form wird entsprechend dem vorgesehenen Einsatzzweck der Luftfeder ausgelegt. Durchmesser und Länge des Balges werden auf den Einsatzzweck abgestimmt. Kommt es bei einer hochbelasteten Luftfeder in einem Reise- oder Linienbus (hoher Betriebsdruck, hinterschnittener Kolben) auf gute Dauerhaltbarkeit an, so sollte man darauf achten, dass der Fadenwinkel β möglichst nahe bei 45° liegt.

Bei einer für den Einsatz im Anhänger vorgesehenen Luftfeder kommt es mehr auf das problemlose Einrollen im drucklosen Zustand an wenn das Fahrzeug z. B. mittels eines Krans verladen wird. Man wird den Durchmesser daher möglichst groß wählen, damit der Balg auch ohne Innendruck noch auf dem Kolben abrollen kann.

Die Balglänge ergibt sich dann aus diesen Randbedingungen.

Wie gehabt, zerlegt man die Formkontur (neutrale Faser) in zylindrische, kegelstumpfförmige und scheibenförmige Bereiche.
Man kann hier genauso systematisch vorgehen, wie es hier am Beispiel eines konischen Rollbalges gezeigt ist.
Alle Abmessungen beziehen sich auf die neutrale Faser der Balgwand.
Da in beiden Fällen kein Innendruck herrscht gibt es auch keine Fadendehnung. ε ist daher in Formel 19 zu Null zu setzen.
In der folgenden Tabelle wird davon ausgegangen, dass der Radius R_2 direkt an den unteren Kern anschließt. Solange der Konuswinkel δ klein ist, hält sich der Rechenfehler in vertretbaren Grenzen, wenn man vernachlässigt, dass Radius R_2 keinen 90° Winkel beschreibt.
Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, entnimmt man die Geometrie einer maßstäblichen Zeichnung.

	RA	RI	φ	LT
Länge 1	$D_{Kern} / 2 + L_1$	$D_{Kern} / 2$	90	.....
Länge 2	$D_{Kern} / 2 + L_{1+} 0{,}50 \times R_1$	$D_{Kern} / 2 + L_1$	75	.....
Länge 3	$D_{Kern} / 2 + L_{1+} 0{,}866 \times R_1$	$D_{Kern} / 2 + L_{1+} 0{,}50 \times R_1$	45	.....
Länge 4	$D_{Kern} / 2 + L_{1+} R_1$	$D_{Kern} / 2 + L_{1+} 0{,}866 \times R_1$	15	.....
Länge 5	Formel 14		0	.....
Länge 6	$D_{Kern} / 2 + L_{1+} R_1$	$(D_{Kern} / 2 + L_{1+} R_1) \times \sin \delta \times L_{kon}$	δ	.....
Länge 7	$(D_{Kern} / 2 + L_{1+} R_1) - \sin \delta \times L_{kon}$	$..... -0{,}134 \times R_2$	15	.....
Länge 8	$..... -0{,}134 \times R_2$	$..... - 0{,}5 \times R_2$	45	.....
Länge 9	$..... - 0{,}5 \times R_2$	$..... - R_2$	75	.....
				.....

Die beiden Tabellen lassen sich gut mit einem Tabellenkalkulationsprogramm wie z.B. Excel bearbeiten. Unter www.hjpahl.com kann man sich eine entsprechende Excel Datei mit eingesetzten Formeln herunter laden.

3.2 Bestimmung der Eigenfrequenz und Federrate

3.2.1 Mit Näherungsformel

Die Federrate c [N/m] einer Feder ist allgemein definiert als der Quotient aus Federkraft und dem Federweg, durch welchen sich diese Kraft aufbaut.

$$c = \frac{F}{s}$$

Bei einer Luftfeder wird die Änderung der Federkraft mit dem Federweg durch zwei konstruktive Größen der Luftfeder bestimmt:

Kolbenkontur und Volumen.

Mit steigendem Druck nimmt die Kraft als das Produkt aus Innendruck und wirksamer Fläche zu. Durch die Verkleinerung des Volumens beim Einfedern steigt der Druck gemäß der Isentropenbeziehung:

$$p_1 = p_0 \left(\frac{V_0}{V_1}\right)^{\chi}$$

Formel 3

Mit größer werdendem Volumen V_0 strebt der Quotient V_0 / V_1 gegen den Wert 1. Hieraus wird ersichtlich, dass ein großes Volumen in Konstruktionslage geringe Druckanstiege beim Einfedern bewirkt, und geringen Kraftanstieg und eine kleine Federrate zur Folge hat.

Je größer das Volumen, desto weicher wird die Feder.

Eine weitere Möglichkeit zur Beeinflussung des Kraftanstiegs beim Einfedern ist die Fläche, auf die der Druck wirkt (wirksame Fläche), während des Einfederweges zu verändern.

Die Größe des zur wirksamen Fläche gehörenden wirksamen Durchmessers hängt vom Außen- und Kolbendurchmesser ab. Bei einem kleinerem Kolben ist die wirksame Fläche also kleiner, bei größerem Kolbendurchmesser also größer.

Ein Kolben mit nicht zylindrischer Kontur (etwa der Kontur einer Sanduhr) bewirkt somit eine Änderung der wirksamen Fläche während des Ein- und Ausfederns.

Der Kraftanstieg beim Einfedern hängt also vom Anstieg des Drucks und von der Änderung der wirksamen Fläche ab.
Damit läßt sich die Federrate c in Form der folgenden Summe aus zwei Differentialquotienten schreiben:

$$c = p_{ü} \frac{dA_w}{ds} + A_w \frac{dp_{ü}}{ds}$$

Formel 4

Der erste Summand läßt sich aus der Isobaren Kennlinie bestimmen, der zweite durch die folgende Näherungsformel:

$$c = \frac{\chi\,(1 + p_0)\,A_w^2}{V_0}$$

Formel 1

In Diagramm 14 sind die wirksamen Flächen einer Luftfeder, gemessen auf einem zylindrischen Kolben, (durchgezogene schwarze Linie) auf einem hinterschnittenem Kolben gemessen (rote Linie mit gelben Punkten) sowie die Tangente an die auf dem hinterschnittenem Kolben gemessene Kurve über dem Federweg dargestellt.
(hinterschnittener Kolben: siehe Kapitel: Beeinflussung der Kennlinien)

Wie durch die rote Linie mit den gelben Punkten darstellt, kann diese Kennlinie auch punktweise aufgenommen werden, wenn der Abstand zwischen den Punkten klein genug ist, um einen Kurvenzug durch diese Punkte hindurch zulegen.
Die Tangente (blaue Linie) an diesen Kurvenzug ergibt die (negative) Steigung der wirksamen Fläche beim Einfedern.
Die Steigung wird üblicherweise in den Einheiten cm^2 / cm abgelesen. Multipliziert mit dem Druck, bei dem die Kennlinie aufgenommen wurde in den Einheiten kN / cm^2 , ergibt sich die Federrate in den Einheiten kN / cm .

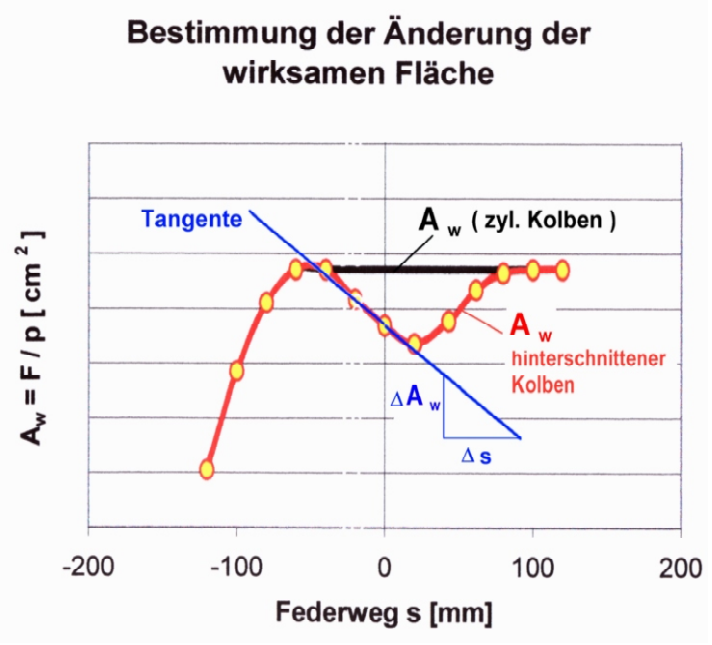


Diagramm 14:
Bestimmung der Änderung derwirksamen Fläche aus Meßschrieb

Nachdem man auf diese Weise den ersten Summanden von Formel 4 bestimmt hat, bestimmt man aus Formel 1 den zweiten Summanden.
Die so errechnete Federrate setzt man jetzt in der Einheit N / m in Formel 5 ein. Die Masse m erhält man, indem man die Federkraft (Druck mal wirksame Fläche) durch die Erdbeschleunigung g teilt.

3.2.2 Berechnung der Adiabatischen Kennlinie

Die Adiabatische Kennlinie lässt sich nur für zylindrische Kolben mit brauchbarer Genauigkeit für Auslegungszwecke vorausberechnen.
Daher wird hier nur auf den durch das Volumen bestimmten zweiten Summanden aus Formel 4 eingegangen. Bei einem zylindrischen Kolben ist die wirksame Fläche konstant.

Die Federkraft F_F als Funktion des Federweges s lässt sich durch die folgende Gleichung beschreiben:

$$F = p_0 \; A_w \left(\frac{V_0}{V_0 - v\,s} \right)^{\chi}$$

Formel 2

Trägt man die mit dieser Funktion errechneten Kraftwerte in einem Diagramm auf, entstehen Adiabatische Kennlinien, wie im Abschnitt „ Technische Dokumentation „ beschrieben.
Von gemessenen Kennlinien unterscheiden sich die errechneten Kennlinien in der Art, dass bei den errechneten Werten natürlich keine Hysterereschleife entsteht.

Legt man an die so erhalten Kurve im Arbeitspunkt bei s = 0 eine Tangente, so kann man aus der Steigung der Tangente die Federrate ablesen.

Man kann dieses sowohl bei errechneten als auch bei gemessenen Kennlinien so anwenden. Bei errechneten Kennlinien wird man der Einfachheit halber jedoch im allgemeinen nur dann die ganze Kennlinie errechnen und auftragen, wenn diese aus einem anderen Grund benötigt wird.
Wenn es darum geht, nur die Federrate zu berechnen, setzt man die Auslegungswerte für Volumen und wirksame Fläche in Formel 1 ein. Aus der so bestimmten Federrate errechnet man dann mit Formel 5 die Eigenfrequenz.

In die Formel 6 werden der Volumengradient und das Volumen eingesetzt. Der folgende Abschnitt beschreibt wie diese berechnet werden.

3.2.3 Berechnung des Volumens und des Volumengradienten

Berechnung des Volumens

Zur Berechnung des Volumens eines Luftfederbalges genügen diese Angaben :

Maß	A
Durchmesser	D_A
Faltenhöhe	F_H
Tragkraft	F_F
Druck	p

Mit diesen Werten kann für jeden Betriebszustand die Geometrie der Einzelvolumina V_1 bis V_9 bestimmt werden.(siehe Bild 15)
Alle Volumen sind rotationssymmetrisch und können nach Guldins Regel (das Volumen eines Körpers entspricht dem Flächeninhalt seiner Querschnittsfläche multipliziert mit dem Weg des Flächenschwerpunktes auf der erzeugenden Raumkurve).Die Raumkurve ist in

diesem Fall ein Kreis.
Unter www.hjpahl.com kann man sich ein auf Excel Makros basierendes Luftfederauslegungsprogramm herunter laden.

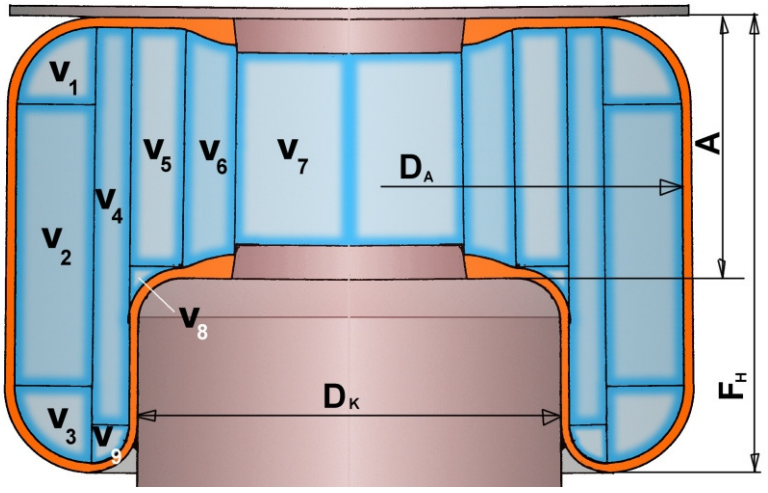


Bild 15: Aufteilung des Balgvolumens in 9 Einzelvolumina

Berechnung des Volumengradienten

Der Volumengradient ist in erster Näherung nur vom Außendurchmesser D_A und vom Kolbendurchmesser D_K abhängig.
Geht man davon aus, dass beim Einfedern um die Längeneinheit 1 das 0,6-fache an freier Kolbenlänge benötigt wird, so kann man das Volumen, welches beim Einfedern verloren geht (in Bild 16 rot gekennzeichnet), und das Volumen, welches hinzukommt, (grün gekennzeichnet) bestimmen.

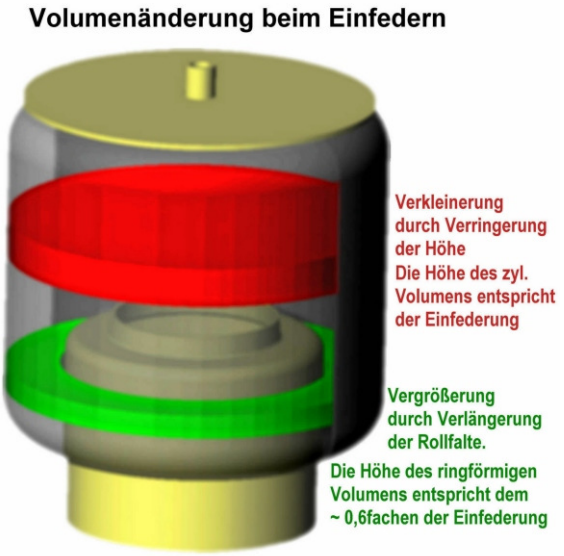


Bild 16: Volumenänderung beim Einfedern. Näherungsweise Berechnung mit Aussen- und Kolbendurchmesser

$$V = \frac{\pi}{4}(0{,}4\ D_A^2 - 0{,}6\ D_K^2)$$

Formel 7

Die Höhe der beiden Volumina unterscheidet sich um den Faktor 0,6. Die Durchmesser sind

aus den Abmessungen der Luftfeder bekannt.

Der Volumengradient lässt sich damit unter Vernachlässigung der Balgwandstärke mit Formel 7 berechnen.

3.3 Beeinflussung der Kennlinien

Die Eigenfrequenz einer Luftfeder ist in erster Näherung nur von der Bauhöhe und in geringerem Umfang vom Druck abhängig.

Setzt man in die Formel für die Eigenfrequenz $\mathbf{f_e}$:

$$f_e = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c}{m}}$$ Formel 5

für die Federrate **c**:

$$c = \frac{\chi\,(1+p_0)\,A_w^2}{V_0}$$ Formel 1

$$A_w \sim \frac{V_0}{H}$$ Formel 6

und ersetzt hier $\mathbf{V_0}$ durch $\mathbf{A_w}$ multipliziert mit der Höhe **H**, sowie für die Masse **m** den Ausdruck $\mathbf{p \times A_w}$ multipliziert mit der Erdbeschleunigung **g** so ergibt sich die folgende Beziehung, in der die Eigenfrequenz $\mathbf{f_e}$ nur noch von der Bauhöhe **H** abhängt.

$$f_e = \sqrt{\frac{\chi\,(1+p_0)}{H\,p_0\,g}}$$ Formel 12

$$m = p_0\,A_w\,g$$

Die Länge der Rollfalte wurde hierbei natürlich vernachlässigt.

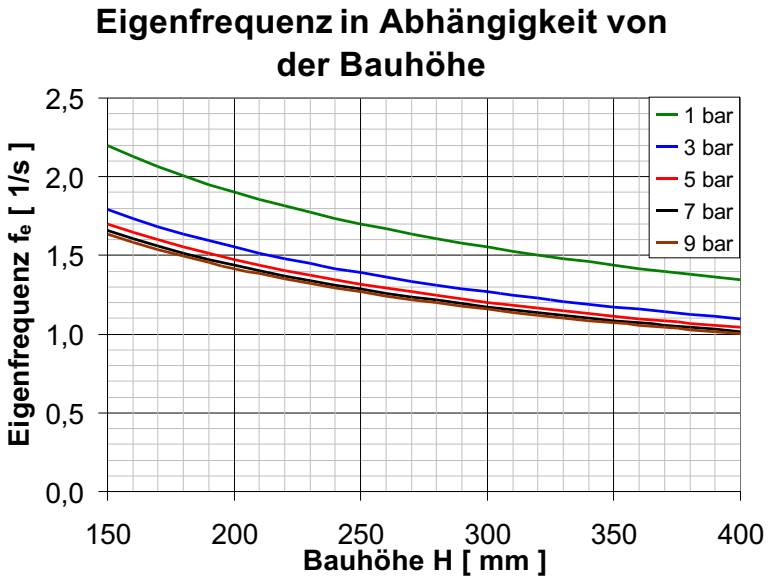


Diagramm 15:Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Bauhöhe

Im Diagramm 15 ist Formel 12 grafisch dargestellt. Die Eigenfrequenzen, die mit einer Luftfeder mit zylindrischem Kolben und Kolbenvolumen ohne weitere Maßnahmen etwa erreichbar sind, lassen sich hier ablesen.
Neben der bereits im Abschnitt „Abstimmung mit der Sekundärfeder " beschriebenen Möglichkeit das Betriebsverhalten einer Luftfeder zu beeinflussen, gibt es zwei weitere Varianten :

gemäß

$$c = p_{ü} \frac{dA_w}{ds} + A_w \frac{dp_{ü}}{ds}$$

Formel 4

lässt sich die Federrate durch zwei Summanden beschreiben, von denen einer von der Änderung des Druckes mit dem Federweg, der andere von der Änderung der wirksamen Fläche mit dem Federweg abhängt.

3.3.1 Federvolumen

Die Änderung des Volumens mit dem Federweg ist vom Kolben- und Außendurchmesser abhängig, egal wie hoch die Luftfeder ist und wie groß ein eventuell angeschlossenes Zusatzvolumen ist. Der Druck ändert sich jedoch um so mehr, je größer sich der Anteil der Volumenänderung am Gesamtvolumen darstellt.
Hieraus wird deutlich:

Je größer das Volumen, desto kleiner die Federrate.

Ist also der verfügbare Einbauraum größer (höher) als er für den benötigten Federweg gebraucht wird, so kann man durch einen längeren Abrollkolben mehr Federvolumen zur Verfügung stellen. Dieses führt zu einer weichen Feder.
Ein solcher Fall ist in der Praxis eher selten. Wesentlich häufiger kommt es vor, daß z. B. bei Bussen, die nutzbare Einbauhöhe für die geforderten Hubwege annähernd ausreicht.
Wenn sich aus dieser Einbauhöhe keine befriedigende Eigenfrequenz ergibt, so läßt sich diese meistens durch eine geeignete Kolbenkontur erreichen. Diese konstruktive Maßnahme ist in aller Regel günstiger als ein extern angeschlossenes Zusatzvolumen, da dieses von der Druckluftversorgung ja auch mit befüllt werden muss, was insbesondere beim Heben zu erheblich längeren Hubzeiten führt.

3.3.2 Kolbenkontur

Die Auswirkung der Kolbenkontur wird bei der Isobaren Kennlinie am deutlichsten:

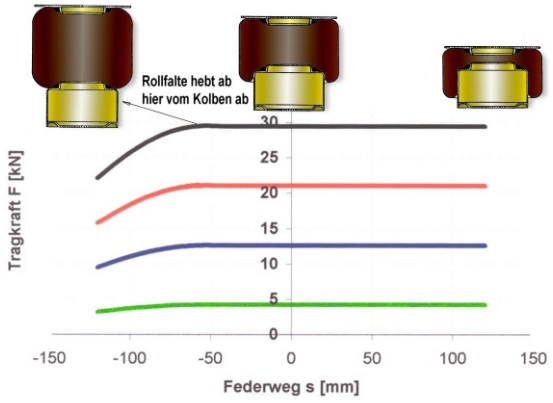


Bild 17: Isobare Kennlinie und Rollfalte

Solange sich eine Rollfalte auf dem Kolben befindet, verläuft bei einem zylindrischem Kolben, wie im Bild dargestellt, die Isobare Kennlinie waagerecht. D. h. der Differentialquotient $\mathbf{dA_w / ds}$ aus Formel 4 ist gleich Null. Sobald die Luftfeder soweit ausgefedert ist, dass die Rollfalte vom Kolben abhebt, wird die wirksame Fläche kleiner und der Differentialquotient nimmt negative Werte an.

Durch eine geeignet gestaltete Kolbenkontur kann der Differentialquotient $\mathbf{dA_w / ds}$ positive, negative und den Wert Null annehmen.

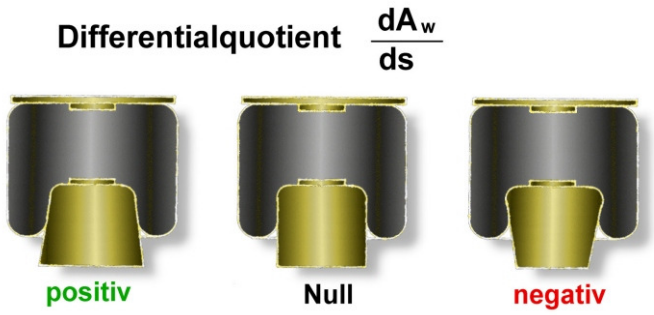


Bild 18: Differentialquotient dA_w / ds bei unterschiedlicher Kolbenkontur

Bei Fahrzeugen zur **Personenbeförderung** ist meistens eine Kennlinie erwünscht, die in der Konstruktionslage der Luftfeder relativ flach verläuft, d.h. eine kleine Federrate mit einer Eigenfrequenz von etwa einem Hertz. Zum Ende des Einfederweges soll die Kennlinie dann progressiv werden, so dass diese in völlig eingefedertem Zustand etwa das dreifache der statischen Last erreicht. Beim Ausfedern sollte die Kennlinie stark abfallen. Dadurch wird am Ende des Ausfederweges die Zugkraft auf die Stoßdämpfer gering gehalten. Bild 19 zeigt das Prinzip einer solchen Auslegung.
Der Kolben, der meistens aus Tiefziehblech gefertigt ist, wird nach dem eigentlichen Tiefziehvorgang auf einer Drückbank partiell im Durchmesser verringert. Die Stelle mit dem geringsten Durchmesser liegt dabei meistens etwa auf der halben Höhe.
Beim Einfedern aus der vollständig ausgefederten Stellung rollt die Rollfalte zuerst über einen kurzen zylindrischen Abschnitt des Kolbens. Dann folgt der Bereich, des Kolbens, in dem der Durchmesser abnimmt. Die wirksame Fläche wird dabei kleiner und der Differentialquotient $\mathbf{dA_w / ds}$ nimmt einen negativen Wert an. An der Stelle mit dem kleinsten Durchmesser wird der Differentialquotient zu Null, und beim weiteren Einfedern wieder positiv.
Die wirksame Fläche folgt also der Kolbenkontur. Wird der Kolbendurchmesser größer, nimmt die wirksame Fläche zu, wird er kleiner, nimmt sie ab. Der Außendurchmesser des Luftfederbalges erfährt hierbei keine nennenswerte Durchmesseränderung. Mit herkömmlichen Rechenmethoden läßt sich der wirksame Durchmesser aus einer gegebenen Kolbenkontur bzw. eine Kolbenkontur aus einem gewollten Verlauf der wirksamen Fläche nicht berechnen. In der Praxis wird diese Kolbenkontur normalerweise im Versuch ermittelt. Am Ende dieses Abschnitts ist hierzu ein Verfahren beschrieben.

Bei **Nutzfahrzeugen zur Güterbeförderung** wird weniger Wert auf den Fahrkomfort gelegt wie bei Omnibussen. Die Eigenfrequenz der Feder spielt hierbei eine untergeordnete Rolle, solange die Forderungen des Gesetzgebers nach straßenschonender Bauweise erfüllt werden.

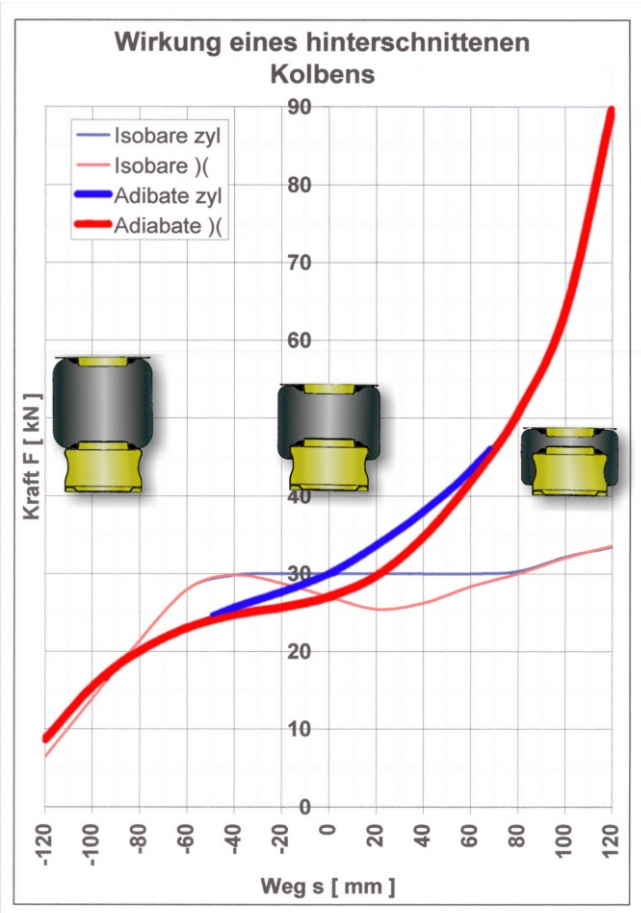


Bild 19: Wirkung eines hinterschnittenen Kolbens

Bei Lkw versucht man, die Ladefläche so niedrig als möglich zu halten, damit nicht allzu viel Ladevolumen verloren geht. Dies bedeutet, dass bei gegebenem Reifenhalbmesser die Einbauhöhe der Luftfeder umso kleiner wird, je niedriger die Ladefläche ist.
Damit sich ein Fahrzeug für Wechselpritschen eignet, muss der Einfederweg am Rad ~ 90 mm betragen. Für den Ausfederweg werden dann etwa 180 bis 200 mm benötigt.
Der Trend im Nutzfahrzeugbau geht zu niedrigeren Ladeflächenhöhen. Das bedeutet für die Luftfeder, aus weniger Einbauhöhe möglichst viel Hub bei konstantem Druck herauszuholen.

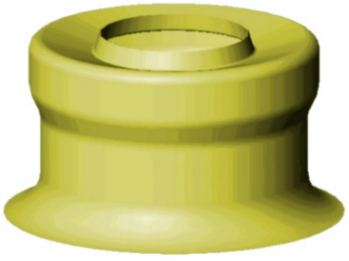


Bild 20: Kolben für Nutzfahrzeugvorderachse

Bei dem in Bild 20 abgebildeten Kolben liegt das Ende der Rollfalte in der Konstruktions- bzw. Fahrhöhe im mittleren, zylindrischen Teil. Bei kleinen Schwingungsamplituden, wie sie bei ungestörter Geradeausfahrt auftreten, hat die Kolbenkontur daher keinen Einfluß auf die Federungseigenschaften. Durch den unteren weit ausgestellten Rand des Kolbens wird die Falte jedoch daran gehindert, beim Einfedern über das Kolbenende hinauszulaufen. Durch den stark vergrößerten Kolbendurchmesser in diesem Bereich vergrößert sich auch der wirksame Durchmesser, was zu einer stark progressiven dynamischen Kennlinie führt.

Im oberen Bereich vergrößert sich der Kolbendurchmesser wieder. Die Kolbenschulter ist bis auf die Höhe des Dichtkonus hochgezogen. Hierdurch vergrößert sich die wirksame Kolbenhöhe auf die gesamte Höhe des Kolbens. Der ausgestellte obere Bereich bewirkt weiterhin eine Vergrößerung der wirksamen Fläche. Dieses führt dazu, daß sich der Hub bei konstantem Druck vergrößert. Die gleiche Hubhöhe ließe sich bei einem herkömmlichen Kolben nur mit einer durch die notwendige Druckerhöhung insgesamt größeren Luftmenge erreichen.

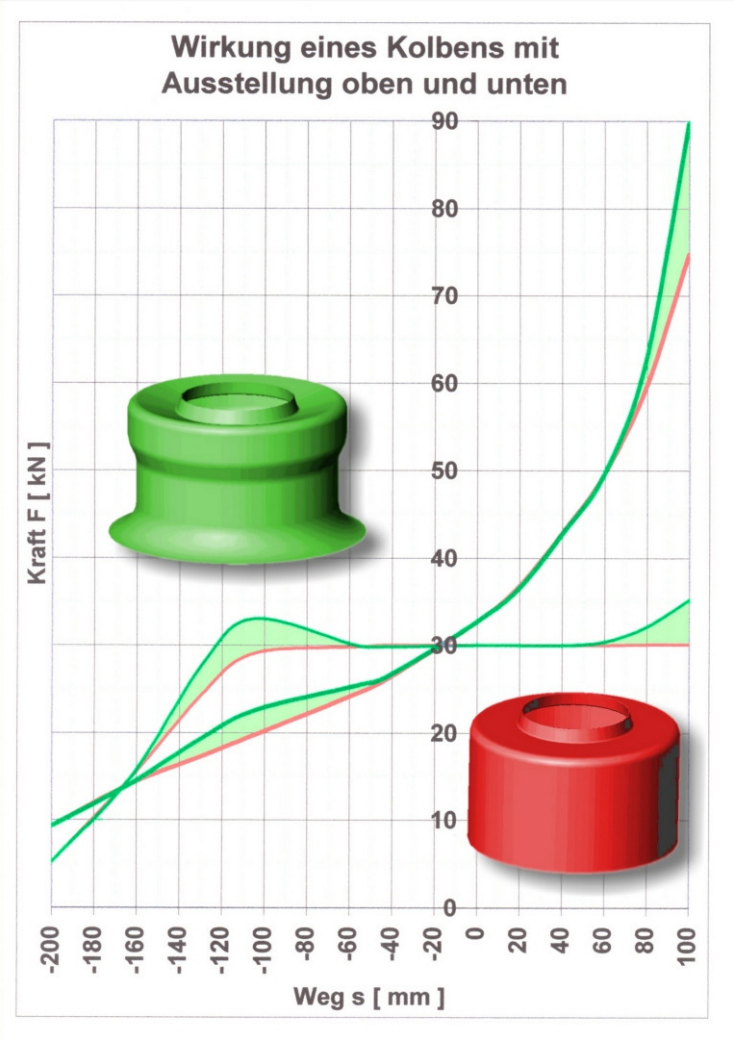


Bild 21 Wirkung eines Kolbens gemäss Bild 20 auf die Kennlinien

Bild 21 zeigt im Vergleich einen zylindrischen und einen oben und unten ausgestellten Kolben. Der Vorteil des ausgestellten Kolbens wird hier sehr deutlich. Während im Arbeitspunkt in der Konstruktionslage die Kennlinien beider Kolben gleich sind, zeigen sich zu Ende des Hubes auf beiden Seiten deutliche Vorteile. Beim Einfedern wird die Kennlinie stark progressiv. Hierdurch kann unter Umständen auf eine Sekundärfeder verzichtet, und lediglich ein Anschlagpuffer eingesetzt werden um eine Berührung und damit Beschädigung beweglicher Fahrzeugteile zu vermeiden.

Da beim Ausfedern die wirksame Fläche größer wird, sinkt der Druck, der der konstant bleibenden Last, das Gleichgewicht hält. Dieses bedeutet eine erhebliche Zeitersparnis beim Heben, da beim Hubvorgang Luft von einem unter höherem Druck stehenden Vorratsvolumen in die Luftfedern strömt.
Dieser Vorgang geht umso schneller, je größer der Druckunterschied zwischen den beiden Volumina ist. Im oben aufgeführten Beispiel wird der Druck bis zu einem Ausfederweg von 60 mm konstant bleiben. Bei einem Ausfederweg von 120 Millimeter erreicht dieser dann wieder den Wert des statischen Drucks. Bis zu einem Ausfederweg von 165 mm bleibt der Druck, dank der größeren wirksamen Fläche, unter dem Hebedruck, der für einen zylindrischen Kolben notwendig wäre. In diesem Stadium ist der Luftfederbalg dann soweit ausgefedert, dass er den Kolben nicht mehr berührt und die obere Ausstellung keine Wirkung mehr zeigt.
Durch einen mehr oder weniger langen Luftfederbalg verschiebt sich das Ende der Rollfalte entsprechend nach oben und unten. Ein längerer Balg bietet mehr Hubvermögen. Er neigt aber auch eher dazu, über das Kolbenende hinwegzurollen und führt zu einer stärker progressiven Kennlinie beim Einfedern.
Da diese Kolbenform keinen Einfluß auf das Betriebsverhalten der Luftfeder im Arbeitspunkt d.h. während der Fahrt hat, ist es ohne Nachteile möglich, einen solchen Kolben nachzurüsten, und damit das Hubvermögen zu verbessern.

3.3.3 Kolbenkontur im Versuch ermitteln

Um eine Kolbenkontur im Versuch zu bestimmen, verwendet man einen Kolben, der aus Scheiben von nicht mehr als 3 mm Dicke zusammengebaut ist. Man sollte sich einen Vorrat solcher Scheiben aus Aluminiumblech beschaffen, die in ihrem Durchmesser um ~ 3 mm steigend gestaffelt sind.
Das Zusatzvolumen, welches evtl. im Kolben untergebracht wird, befindet sich in einem Tank. Dieser trägt auf seiner Oberseite einen Dichtkonus für den Luftfederbalg. Die Luftfeder wird dann, wie im Bild dargestellt, über Kopf in eine Federprüfmaschine eingebaut. Der Tank wird soweit mit Wasser gefüllt, daß das zu realisierende oder vorgesehene Zusatzvolumen übrig bleibt.
Jetzt kann man die Kolbenkontur variieren, indem man Scheiben austauscht, und zwar so lange, bis die gewünschte Kennlinie gefunden ist. Ähnlich verfährt man mit dem Zusatzvolumen. Hier erreicht man die beabsichtigte Kennlinie, indem man Wasser hinzufügt oder ablässt.

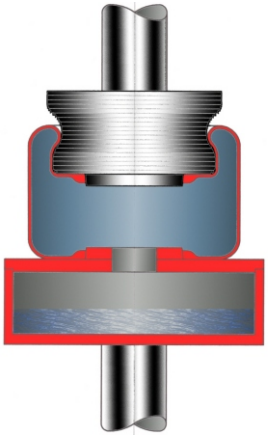


Bild 22: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Kolbenkontur

3.4 Nachrechnung der Festigkeit

3.4.1 Der Aufbau des Luftfederbalges

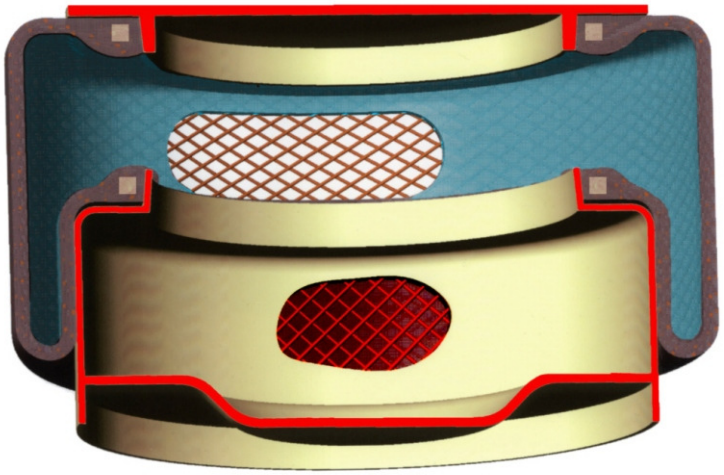


Bild 23: Aufbau einer Luftfeder

Wie bereits unter „2.3.2 Vergleich: Luftfeder - Gasfeder“ beschrieben, besteht eine Luftfeder aus mindestens drei Einzelteilen: dem Luftfederbalg, der oberen Platte und dem Abrollkolben. Platte und Abrollkolben werden meistens aus Blech gezogen oder gegossen. Die Dimensionierung solcher Bauteile nach Erfahrungswerten birgt normalerweise kaum Risiken.

Beim Luftfederbalg selbst wird man bei der Auslegung des Rohlings häufig auf fertigungstechnische und logistische Gegebenheiten Rücksicht nehmen müssen.
Die Haltbarkeit eines Luftfederbalges wird durch die beiden Materialien Gummimischung und Gewebe (Festigkeitsträger) bestimmt. Meistens wird eine Standardmischung und ein Standardgewebe verwand. Als Variationsmöglichkeit bietet sich dann meistens nur noch der Wickeltrommeldurchmesser.
Bild 23 zeigt den Schnitt durch eine Luftfeder. Die Balgwand und die einzelnen Fäden des Festigkeitsträgers sind stark vergrößert dargestellt, die Fadendichte stark verringert. In der Realität entspricht der Abstand von Fadenmitte zu Fadenmitte im Rohlingsgewebe etwa dem 1,15 fachen des Fadendurchmessers.

Ein Luftfederbalg wird durch den Innendruck beansprucht, der in der Balgwand Zugkräfte erzeugt, die bei Überlastung zum Bersten des Luftfederbalges führen können.
Wie aus Bild 23 ersichtlich, ist der Fadenwinkel und damit auch der Fadenabstand in der auf dem Kolben liegenden Balgwand ein anderer als der in der Balgwand auf dem Außendurchmesser.

Dieses bedeutet, dass eine Fadenraute, die sich im Rollbereich des Luftfederbalges befindet, bei Federungsvorgängen mal auf dem Kolben, und mal auf dem Außendurchmesser liegt. Hierbei verändern sich jedes mal der Abstand und der Winkel zwischen den Fäden. Diese Veränderung der Fadenraute vergrößert sich

verständlicherweise mit dem Durchmesserunterschied zwischen Kolben- und Außendurchmesser. Bei Luftfedern im Durchmesserbereich von 300 mm sollte der Abstand zwischen Außen- und Kolbendurchmesser (Faltenbreite) den Wert von 35 mm nicht unterschreiten. Andernfalls würde der Biegeradius am unteren Ende der Rollfalte zu klein. Dieses kann Stauchungen der Balgwand verursachen. Bei der dargestellten Luftfeder sind Außen- und Kolbendurchmesser verhältnismäßig groß, so dass die Faltenbreite vergleichsweise klein wirkt.
Solange die Faltenbreite den Wert von ~35 mm jedoch nicht unterschreitet, wirkt sich dieses eher positiv aus, da Winkel- und Abstandsänderungen in der Fadenraute vergleichsweise moderat ausfallen.

Die Auslegung eines Luftfederbalges verlangt also immer einen Kompromiss zwischen Sicherheit gegen Bersten und Dauerhaltbarkeit.

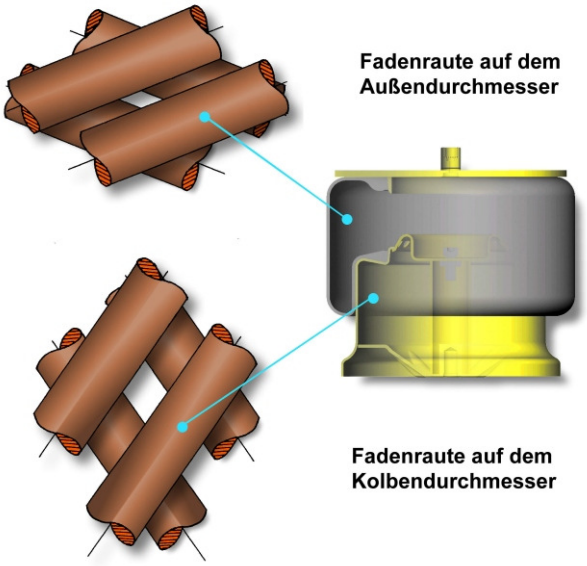


Bild 24: Änderung des Fadenwinkels und des Fadenabstands bei Federungsvorgängen

Eine **hohe Fadendichte** garantiert **hohe Berstsicherheit**. Nur so wird die Kraft, die durch den einzelnen Faden übertragen wird, klein gehalten.

Für **gute Dauerhaltbarkeit** benötigt man **große Fadenabstände**. So wird die Spannung im Gummi innerhalb der Fadenraute gering gehalten.

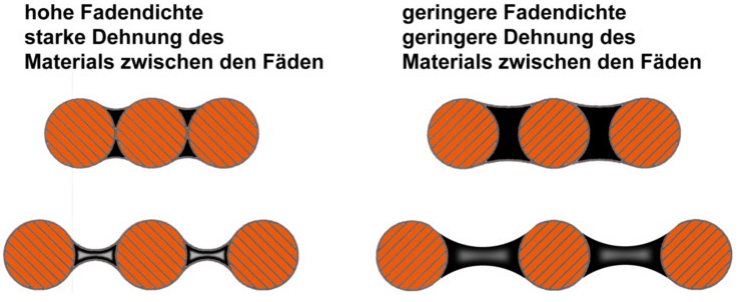


Bild 25: hohe und geringe Fadendichte

Bild 24 macht dies deutlich. Die Verhältnisse, wie sie in diesem Bild dargestellt sind, sind relativ günstig für gute Dauerhaltbarkeit. In der Fadenraute auf dem Außendurchmesser ist noch ausreichend Abstand zwischen den Fäden vorhanden.

3.4.2 Kenngrößen für Festigkeitsträger

Der Festigkeitsträger nimmt die Kräfte auf, die in der Balgwand aufgrund des Innendrucks in der Luftfeder entstehen. Er besteht aus zwei sich kreuzenden Cord Gewebelagen. Die einzelnen Fäden werden ausschließlich auf Zug beansprucht. Dabei richten sich diese in Kraftrichtung aus. Hierdurch nimmt der Luftfederbalg einen dem Innendruck und der Tragkraft entsprechenden Außendurchmesser an.
Dieser Außendurchmesser wird auslegungsseitig durch die Wahl des Wickelwinkels, und den Durchmesser der Wickeltrommel beeinflusst.
Da die Fäden sich unter Innendruck in nicht zu vernachlässigender. Weise dehnen, bedarf es einer vergleichsweise aufwendigen Rechnung um aus einem gegebenen Außendurchmesser den Wickelwinkel und den Wickeltrommeldurchmesser zu errechnen. Diese Rechnung wird zum Schluss diese Abschnitts beschrieben. Da es sich hierbei um eine Näherungsrechnung mit Iterationsschleifen handelt, sollte man sich unter www.hjpahl.com ein auf VBA Makros basierendes Auslegungsprogramm herunter laden.
Unter Festigkeitsträger wird in diesem Zusammenhang nicht der einzelne Faden, sondern das aus Kett- und Schussfäden bestehende Gewebe verstanden. Die Kettfäden haben die Aufgabe, die oben beschriebenen Kräfte zu übertragen. Den Schussfäden fällt lediglich die Aufgabe zu ,das Gewebe bis zur Gummierung zusammenzuhalten. Nach der Gummierung haben Sie ihre Aufgabe erfüllt. Die Schussfäden sollten daher aus einem Material mit geringer Reißfestigkeit bestehen.
Deshalb sind in den folgenden Beschreibungen mit den angegebenen Materialeigenschaften immer nur die Kettfäden gemeint.

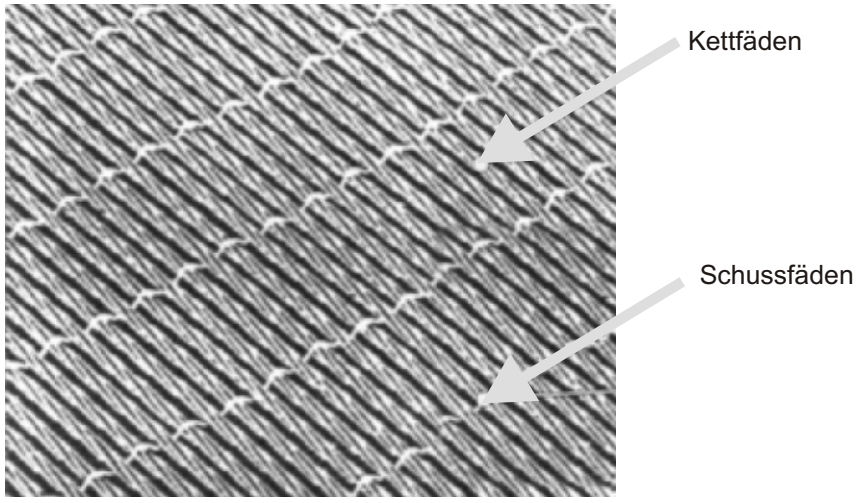


Bild 26: Aufbau des Festigkeitsträgers

Für den Festigkeitsträger von Luftfedern sind zwei Materialien gebräuchlich:

Polyamid PA

Eigenschaften:

hohe Dehnung

Thermoschrumpf

gute Temperaturbeständigkeit

gute Laugenbeständigkeit

Polyester PES

Eigenschaften

geringere Haftfähigkeit

Amino- u. Hydrolysegefahr

gute Säurebeständigkeit

geringe Dehnung

mäßiger Thermoschrumpf

Will man eine Festigkeitsrechnung für einen Luftfederbalg mit vorausgesetzten Auslegungsdaten durchführen, so sind folgende Angaben des Festigkeitsträgers nötig.

Reißkraft eines Fadens

Durchmesser eines Fadens

Fadendichte pro Längeneinheit

Kraft / Dehnungskurve eines Fadens

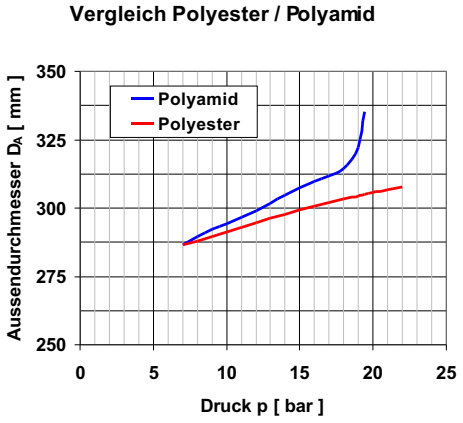
Im unteren Bild sind die Kraft / Dehnungskurven von Polyester und Polyamid im Vergleich dargestellt

Die beiden Kurven enden bei der Reißkraft des Fadens. Die Durchmesser der beiden hier dargestellten Fäden unterscheiden sich nicht wesentlich. Der Unterschied liegt hauptsächlich in der extrem ungleichen Dehnung, die sich beim Erreichen der Reißkraft einstellt. Polyamid erreicht etwa die doppelte Dehnung wie Polyester. Dieses resultiert in einem größerem Durchmesserzuwachs mit steigendem Druck beim Polyamid, was einen geringeren Berstdruck zur Folge hat.
Eine Luftfeder darf nicht bis zu ihrem Berstdruck belastet werden, da bereits vor Erreichen dieses Druckes eine irreversible Verformung des Fadens eintritt. Im Diagramm 16 ist dieses durch die grüne und rote Einfärbung der Kurven deutlich gemacht.
Es nutzt daher nicht sehr viel, den Berstdruck als Zahlenwert zu ermitteln. Bei diesem Druck wird der Luftfederbalg sicher zerstört.
Wesentlich mehr Information liefern hier die Kurven:

Fadenkraft als Funktion des Druckes

Fadendichte als Funktion des Druck

In diesen Kurven lässt sich, ähnlich wie bei den Kraft / Dehnungskurven, ein Bereich erkennen, in dem es zu einer Schädigung des Festigkeitsträgers kommt.



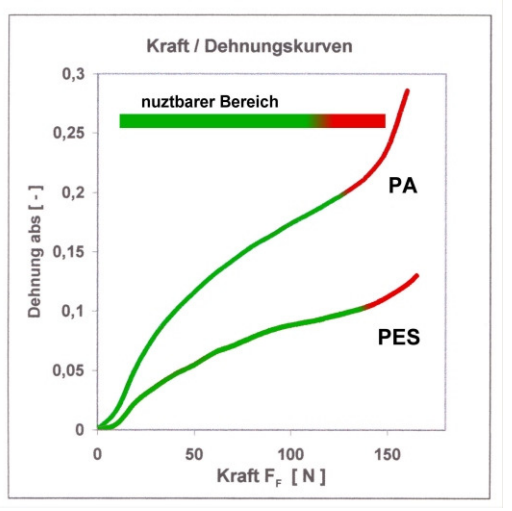


Diagramm 16, 16a Aussendurchmesser als Funktion des Innendrucks, Gewebedehnung als Funktion der Fadenkraft

Die folgenden beiden Diagramme 17 und 18 zeigen Fadenkräfte und Fadendichte für Polyester und Polyamid im Vergleich:

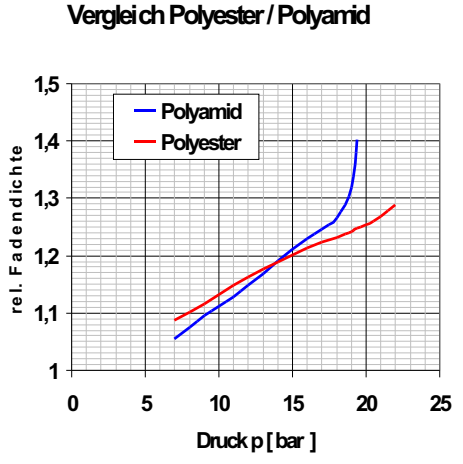


Diagramm 17: relative Fadendichte als Funktion des Innendruckes

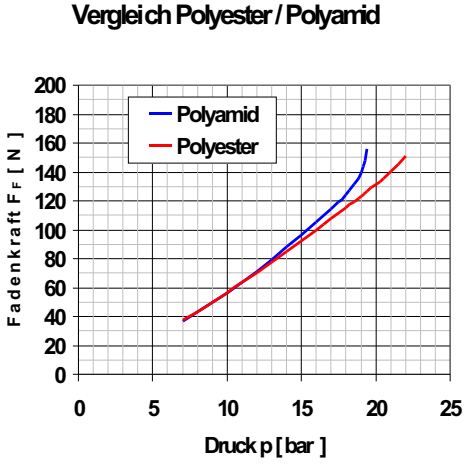


Diagramm 18: Fadenkraft als Funktion des Innendruckes

Für die Vergleichsrechnung wurde für beide Festigkeitsträger als Abbruchbedingung für die Rechnung eine Reißkraft von 150 N angesetzt. Beim Polyesterfaden ist diese in der Realität geringfügig höher, beim Polyamidfaden geringfügig niedriger.
Die Fadendichte beträgt beim Festigkeitsträger aus Polyamid 14,5 Fäden pro cm, beim Polyester 13 Fäden pro cm. Gleiche Reißfestigkeit (für die Rechnung) und höhere Fadendichte lassen vermuten, dass Polyamid einen höheren Berstdruck ergibt. Der Einfluss

der Dehnung ist jedoch größer als der der höheren Fadendichte.
Die größere Dehnung von Polyamid zeigt sich deutlich in der exponentiellen Durchmesserzunahme. Mit größer werdendem Durchmesser vergrößert sich auch die Fläche, auf die der Druck wirken kann. Dieses resultiert dann wieder in einer zunehmenden Dehnung des Fadens, was wiederum zu einem größer werdenden Durchmesser führt.

Diagramm 17:„ relative Fadendichte “

Sowohl beim Polyamid als auch beim Polyester ist die relative Fadendichte größer als >eins<. Dieses bedeutet für die Praxis, dass das Material zwischen den Fäden beim Wechsel der Lage einer Fadenraute vom Außendurchmesser auf den Kolben nicht überbeansprucht wird. Berechnet man die Fadendichte anhand von Messwerten einer ausgeführten Luftfeder, so kann es durchaus vorkommen, dass man Fadenabstände errechnet, die kleiner als der Fadendurchmesser sind. Hieraus ergibt sich dann eine relative Fadendichte, die kleiner als eins ist. Die Fäden sind in allen Richtungen flexibel, sie können sich also auch oval verformen. Einige Luftfederbälge sind so ausgelegt, dass eine ovale Verformung der Fäden in Kauf genommen wird. Dieses kann notwendig sein, wenn anders keine ausreichende Sicherheit gegen Bersten erreicht werden kann, oder wenn fertigungstechnische Belange dazu zwingen. Man sollte hierbei jedoch auf jeden Fall berücksichtigen, dass die Dauerhaltbarkeit hierunter leidet. Die Berechnung liefert auch den Wickelwinkel, wobei man davon ausgeht, dass die Fäden sich frei nach der Kraftrichtung ausrichten können. Bei einer ovalen Verformung der Fäden ist dieses sicher nicht mehr der Fall, so dass man bezüglich des errechneten Wickelwinkels keine zuverlässigen Ergebnisse erwarten darf.

Diagramm 18: „ Fadenkraft “

Aus diesem Diagramm ließt man als erstes den Berstdruck ab, das ist dort, wie auch in den anderen beiden Diagrammen, wo die Kurven enden. Im vorliegenden Beispiel wurde mit gleicher Reißkraft für die beiden verglichenen Materialien Polyester und Polyamid gerechnet. Das bedeutet, dass die Berstdrücke in der Realität weiter auseinander liegen. Wie bereits erwähnt, ist für die Praxis weniger der Druck interessant, bei dem der Luftfederbalg birst, sondern der Druck, bei dem noch keine bleibende Verformung des Fadens auftritt. Das Diagramm gibt hierfür einen Anhalt. Beim Polyester ist die Luftfeder für dynamische Spitzendrücke bis etwa 20 bar geeignet, beim Polyamid bis etwa 17 bar. Hierbei muss man jedoch beachten, dass die Verformung von Kunststoffen zeitabhängig ist. Die für den Festigkeitsträger vorliegende Kraft / Dehnungskurve wurde mit einer bestimmten Verformungsgeschwindigkeit aufgenommen. Diese stimmt aber nicht unbedingt mit der Verformungsgeschwindigkeit des Fadens beim dynamischen Druckanstieg überein. Als Faustregel gilt: Alle Vorgänge, die dem Faden Zeit zur Verformung und damit zum Fließen geben, wirken sich ungünstiger aus als solche, die eine hohe kurzzeitige Kraft verursachen. Eine kurze Druckspitze beim Überfahren eines Fahrbahnhindernisses, die nur wenige Millisekunden dauert, wirkt sich daher weniger schädlich aus, als wenn ein Fahrzeug über längere Zeit überladen fährt oder abgestellt wird.

Dieses wird auch aus Diagramm 19 deutlich. Zwischen einer Verformungsgeschwindigkeit von 10 und 1000 m/ min liegt eine Kraftdifferenz von ca. 20 Newton. Die Fadenkraft in einem bestimmten Betriebszustand ist immer das Produkt aus Druck und Fläche. Dynamische Druckspitzen währen im allgemeinen nicht lange genug, um die Fäden zum Fließen zu bringen.

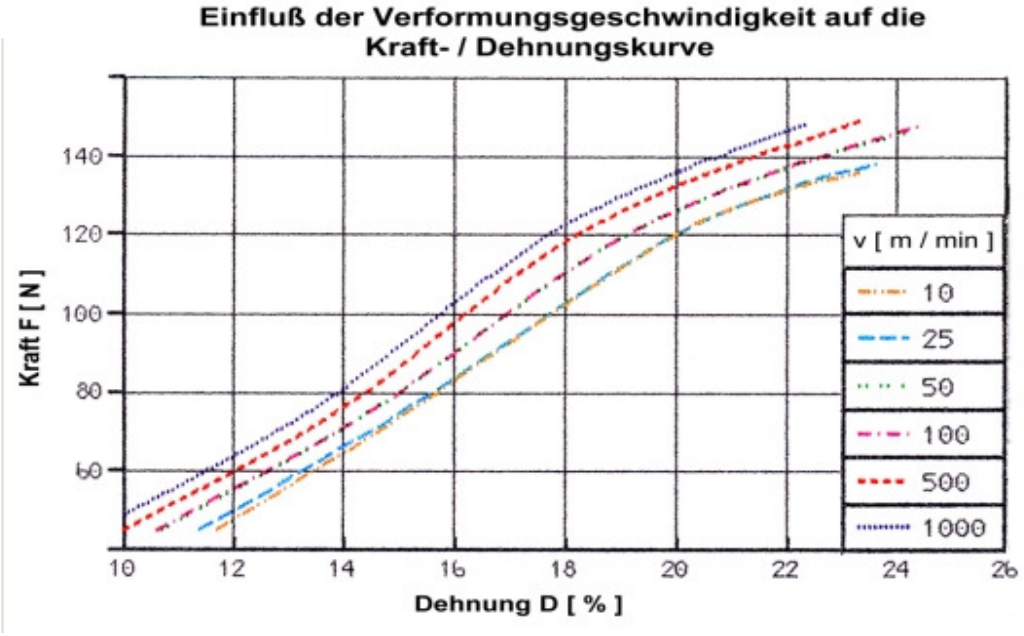


Diagramm 20: Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf die Reißkraft des Fadens

3.4.3 Berechnung

Für die Berechnung muss die Kraft / Dehnungskurve mit einem geeigneten Verfahren in ein Polynom umgewandelt werden: (siehe Seite 54)

Zur weiteren Berechnung ist die Fadendichte, der Fadendurchmesser und die Reißkraft des Festigkeitsträgers notwendig.
Von der Luftfeder benötigt man den Außendurchmesser, die Tragkraft und den Druck, bei dem die beiden vorgenannten Werte gemessen wurden oder die bei diesem Druck erreicht werden sollen, wenn es sich um eine Auslegung handelt.
Als Fertigungsparameter geht der Durchmesser der Wickeltrommel ein.

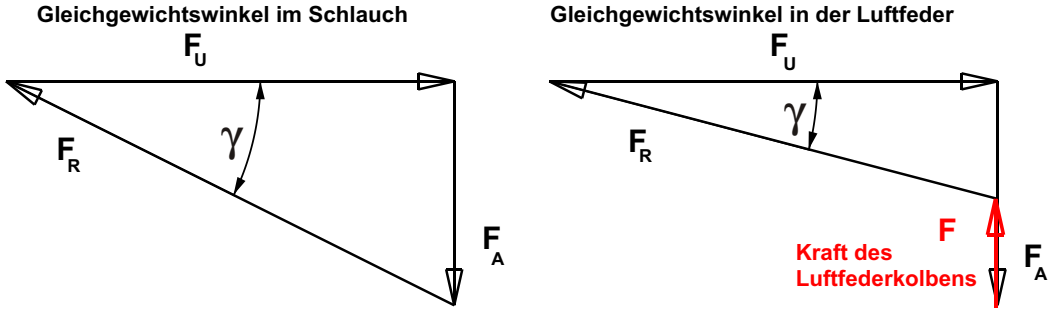
folgende Formelzeichen werden verwandt:

α	Wickelwinkel
γ	Gleichgewichtswinkel
D_A	Außendurchmesser
D_T	Wickeltrommeldurchmesser
d	Fadendehnung
n_B	Fadendichte im Betrieb
n_R	Fadendichte im Rohlingsgewebe
F_F	Fadenkraft
p	Druck

Der Gleichgewichtswinkel

Der Gleichgewichtswinkel ist der Winkel, den die Fäden im druckbeaufschlagten Zustand des Luftfederbalges gegenüber der Waagerechten einnehmen. Er lässt sich leicht aus einem Krafteck bestimmen. Geht man von einem Schlauch aus, so gilt für die Spannungen in der Wand die Kesselformel. Diese besagt, dass die Spannung in Umfangsrichtung genau doppelt so groß ist wie in Längsrichtung. Das Krafteck hierfür besteht aus einem waagrechten und einem senkrechten Kraftvektor sowie aus einem resultierenden Vektor. Der waagrechte Kraftvektor ist doppelt so groß wie der senkrechte.
Im Unterschied zum Schlauch benötigt eine Luftfeder eine äußere Kraft. Diese wird über den Luftfederkolben übertragen. Es kommt also ein weiterer Kraftvektor hinzu.

Die Berechnung verläuft wie folgt:



Gleichgewichtswinkel berechnen

$$\gamma = \sqrt{\frac{1 - \frac{D_w}{D_A}}{2}}$$

Formel 8

Der wirksame Durchmesser wird aus Tragkraft und Druck berechnet

Wickelwinkel berechnen

$$\alpha = \arccos \frac{D_T (1+ D) \cos \gamma}{D_A}$$

Formel 9

Die Dehnung des Fadens D ist an dieser Stelle noch nicht bekannt und muss geschätzt werden

Fadendichte im Betrieb berechnen

$$n_B = n_R \frac{D_T \sin \alpha}{D_A (1+ D) \sin \gamma}$$

Formel 10

Mit dem unter 2. errechneten Wickelwinkel kann man jetzt die Fadendichte im druckbeaufschlagten Zustand errechnen. (immer noch mit dem geschätzten Wert von D)

Fadenkraft berechnen

$$F_F = \frac{p D_A}{2 n_B \cos^2 \gamma}$$

Formel 11

Jetzt errechnet man die Fadenkraft bei dem Druck, für den man die Dehnung geschätzt hat.

Dehnung als Funktion der Fadenkraft berechnen

$$Dehnung_{abs} = a F_F + b F_F^2 + c F_F^3 + d F_F^4 + e F_F^5 + f F_F^6 + g F_F^7$$

Formel 13

Diese Kraft setzt man in das Polynom für die Kraft / Dehnungskurve ein. Sind die geschätzte und die aus dem Polynom errechnete Dehnung nicht gleich, was zu erwarten ist, so ändert man den Schätzwert solange, bis geschätzter und gerechneter Dehnungswert um nicht mehr als 3 % voneinander abweichen

Die Koeffizienten des Polynoms müssen aus einem Messschrieb mit einem geeigneten Verfahren wie z.B. dem Solver in Excel bestimmt werden..

Unter www.hjpahl.com kann man sich ein Luftfederauslegungsprogramm herunter laden, in dem die oben beschriebene Rechnung mit Iterationsschleifen durchgeführt wird. Der Druck wird hierbei schrittweise erhöht, bis die Reißkraft des Fadens erreicht ist. Die Ergebnisse werden automatisch in Diagrammen dargestellt.

4. Bauarten von Luftfedern

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Luftfederbalg als „Luftfeder“ bezeichnet. In Wahrheit trifft dies aber nicht den Punkt, denn dieser alleine ist noch nicht funktionsfähig. Erst das Zubehör, wie Abrollkolben, Konusplatte und Puffer machen ihn zu einem betriebsbereiten Ganzen.
Dieses rührt daher, dass die Luftfederhersteller mit Ausnahme der Fa. Aktas Group nur den Luftfederbalg selbst herstellen.
In der Vergangenheit bezogen die Nutzfahrzeughersteller die Zubehörteile (Abrollkolben, Konusplatte und Puffer) von blechverarbeitenden Betrieben und bauten die Luftfedern in eigener Regie zusammen.
In Europa bestanden die Luftfedern bis Mitte der 80er Jahre vorherrschend aus einem Rollbalg mit beidseitigen, meist gleichgroßen Dichtkonen, einem Abrollkolben aus Tiefziehblech und einer Konusplatte, ebenfalls aus Blech. Von dieser funktionalen Einheit wurde von den Luftfederherstellern, hervorgegangen als Tochterfirmen von Reifenherstellern, nur der Luftfederbalg gefertigt.
Luftfedern wurden zuerst in Bussen, also in Fahrzeugen zur Personenbeförderung eingesetzt. Man erreichte so einen besseren Fahrkomfort. Später erkannte man die Vorteile der Luftfeder auch für Schwerlastfahrzeuge und baute sie dort in ein. Sie erleichtert die Handhabung von Wechselpritschen und das Anpassen unterschiedlicher Rampenhöhen. Außerdem gewährleistet sie eine erhebliche Schonung des Ladegutes.
Zeitgleich mit dem Einsatz im schweren Lkw begannen auch die Hersteller von Anhängerachsen luftgefederte Achsaggregate anzubieten.
Hier hat sich ein gänzlich anderes Konstruktionsprinzip durchgesetzt: Luftfederbälge mit untrennbar angebördelter Platte und einem mittels Spannteller angeschraubtem Kolben.

4.1 Luftfederbälge

Man unterscheidet grundsätzlich zwei Arten von Luftfederbälgen:
Rollbälge und Faltenbälge. Bei den Faltenbälgen liegt der Unterschied in der Anzahl der Falten: Die Hersteller bieten Ein- Zwei- und Dreifaltenbälge an. Der Unterschied bei Rollbälgen besteht in konischem und in zylindrischem Herstellzustand. Als Herstellzustand wird der Zustand bezeichnet, in dem der Luftfederbalg aus der Form kommt.

Bild 27: Luftfederbalgrohling auf angedeuteter Wickeltrommel

Die Federcharakteristik einer Luftfeder ist von diesem Zustand weitestgehend unbeeinflusst. Diese Eigenschaften werden durch den Fadenwinkel im Rohling, den Wickeldurchmesser, die Kontur des Abrollkolbens und das Federvolumen bestimmt. Im Kapitel 3 sind diese Zusammenhänge näher beschrieben.
Bild 27 zeigt einen Luftfederbalgrohling. Dieser besteht aus einer inneren Gummilage, zwei sich kreuzenden Gewebelagen, zwei gleichgroßen Kernen und einer äußeren Gewebelage. Ob daraus ein Faltenbalg, oder ein konischer bzw. zylindrischer Rollbalg wird, hängt von der Vulkanisationsform ab. Lediglich für einen Balg mit oberem Bördelwulst und unten verspannbarem Dichtwulst sind zwei unterschiedlich große Kerne notwendig.

4.1.1 Faltenbälge

Luftfedern haben sich in Nutzfahrzeugen etwa ab Mitte der fünfziger Jahre durchgesetzt. Grund hierfür waren die bekannten Vorteile, wie eine sich mit dem Beladungszustand ändernde Federrate, Anpassung an verschiedene Rampenhöhen usw.
Ein großer Nachteil der Luftfedern war die oft geringere Haltbarkeit gegenüber konventionellen Stahlfedern.
Ein Luftfederbalg konnte allerdings leicht und mit geringem Aufwand am Straßenrand ausgewechselt werden. Was blieb, waren die nicht unerheblichen Kosten für Ersatz.
Faltenbälge haben zwar eine für den Fahrzeugeinsatz ungünstige Federcharakteristik: Beim Einfedern nimmt ihr Durchmesser zu, beim Ausfedern nimmt er ab. Man kann sie also nicht auf eine weite Federspur setzen, damit ein günstiges Wankverhalten erreicht wird.
Faltenbälge haben bei gleicher Tragfähigkeit immer eine größere Federrate, und sie sind somit härter als Rollbälge. Bei ihnen vergrößert sich beim Einfedern der Durchmesser und auch die wirksame Fläche, während sie beim Rollbalg auf zylindrischem Kolben konstant bleibt. Diese Zusammenhänge sind im Kapitel 3 näher beschrieben.
All diese Nachteile wurden jedoch in der Anfangszeit durch den Vorteil größerer Haltbarkeit wettgemacht. Dieses wird deutlich, wenn man sich die Vorgänge in der Balgwand vor Augen führt.
Die Balgwand besteht aus einzelnen Fäden, die als Rautenverbund in Gummi eingebettet sind. Der Fadenwinkel einer Raute ändert sich bei einem Rollbalg etwa von 22 bis 24° im Außenbereich zu etwa 40° bei dem Bereich der Balgwand, der auf dem Kolben liegt. Damit ändert sich gleichzeitig der Abstand zwischen den Fäden. Dieses stellt hohe Anforderungen an die Haftung zwischen Gummi und Faden.
Beim Faltenbalg ist aufgrund seiner Geometrie, sowohl unter Druck als auch im Herstellzustand die Änderung des Fadenwinkels weitaus geringer.
Üblicherweise wird ein Faltenbalg in einer Form vulkanisiert, die in ihrer Kontur dem Betriebszustand entspricht.
Bei Ein- und Ausfedervorgängen pendelt der Fadenwinkel also nur um den Zustand, in dem er vulkanisiert wurde.

4.1.2 zylindrische und konische Luftfederbälge

Materialien und Herstellverfahren wurden weiterentwickelt und verbessert. So wurde mit der Zeit auch bei Rollbälgen, die von ihrer Federcharakteristik her weitaus besser geeignet sind, eine akzeptable Haltbarkeit erzielt.
Während bei Faltenbälgen die Herstellkontur und die Betriebskontur weitgehend gleich sind, nehmen Rollbälge im Betrieb eine vollkommen andere Gestalt an als die, in der sie vulkanisiert wurden.
Ein typischer Rollbalg wie er auf der Hinterachse von Lkw eingesetzt wird, hat im Betrieb bei einem Innendruck von 5 bar einen Außendurchmesser von etwa 290 mm. Die Tragkraft auf einem Kolbendurchmesser von 200 mm beträgt etwa 20 kN. Die Vulkanisationsform für

solch ein Luftfederbalg hat üblicherweise 240 mm Durchmesser. Dieses bedeutet, dass der Balg, wenn er in den Betriebszustand übergeht, in dem Bereich, der die Rollfalte bildet, von 240 mm auf 290 mm aufgeweitet wird. Der Bereich des Balges, der dann auf dem Kolben liegt, wird dagegen vom 240 mm auf 200mm im Durchmesser reduziert.
Ideal wäre es, wenn man im Herstellzustand einen Fadenwinkel von 45° hat. Bei diesem Winkel wird der Abstand zwischen den Fäden immer kleiner, egal ob der Winkel sich vergrößert oder verkleinert. Das bedeutet, dass die Verbindung Gummi zu Faden immer auf Druck beansprucht wird. Löst sich der Gummi vom Faden, so dehnt sich dieser Riss weiter aus. Dies führt langfristig zum Ausfall der Luftfeder durch mehr oder weniger großflächige Lösung des Gummis vom Gewebe.
Im angeführten Beispiel müsste der Durchmesser der Vulkanisationsform etwa 210 mm betragen um diese Forderung zu erfüllen. Auf der anderen Seite bedeutet dieses aber, dass bei sehr niedrigen Betriebsdrücken von 0,5 bar oder weniger der Außendurchmesser des Balges nicht nennenswert über seinem Herstelldurchmesser liegt. Bei einer Balgwandstärke von 3,5 mm, einem Außendurchmesser von ~ 225 mm und einem Kolbendurchmesser von 200 mm macht dieses einen Abstand zwischen den Balgwänden von ~ 5,5 mm aus. Bei einem konstruktiv bedingten Mittenversatz von Kolben und Platte, käme es bei den meisten Achsaufhängungen hier sicherlich zum Aneinanderscheuern der Balgwände aneinander. Dieses kann zum Beispiel auf einer längeren Überführungsfahrt eines neuen Fahrzeugs, die meist ohne Ladung durchgeführt wird, geschehen. Bei Luftfedern, die für den Einsatz in Lkw vorgesehen sind, wählt man daher meist größere Durchmesser der Vulkanisationsform als bei solchen, die für Busse bestimmt sind. Bei Bussen ist das Leergewicht im Verhältnis zum Gesamtgewicht größer. Sehr niedrige Drücke kommen daher kaum vor.

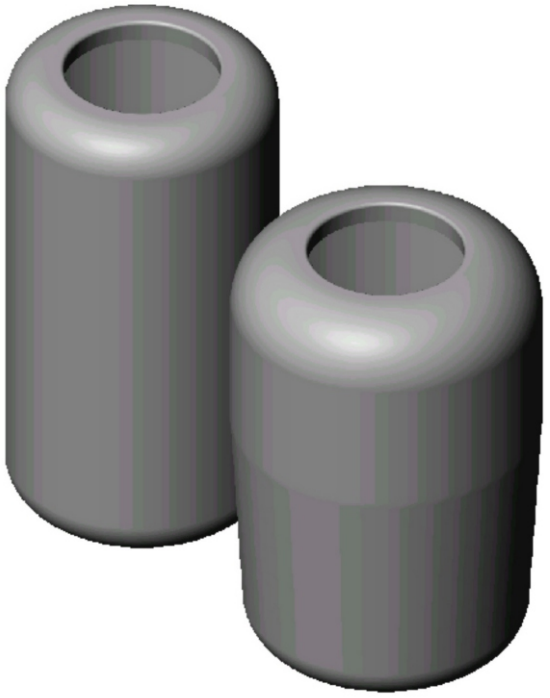


Bild28:
zylindricher und konischer Rollbalg mit Dichtkonen

Dieser Effekt tritt nur bei neuen Bälgen auf. Ist der Balg bereits einige Zeit mit mittleren oder hohen Betriebsdrücken gelaufen, hat sich seine Kontur durch Fließen des Werkstoffs Gummi, mehr und mehr der Betriebskontur angepasst. Wird ein Luftfederbalg nach Jahren wegen Verschleiß ausgebaut, so sieht man es ihm nicht mehr an, ob er in einer konischen oder zylindrischen Form vulkanisiert wurde.
Sinn der konischen Balgkontur ist es also, die Herstellkontur des Luftfederbalges, soweit dieses fertigungstechnisch machbar ist, an die Betriebskontur anzunähern. Im oberen Bereich wird der Formdurchmesser, soweit es möglich ist, an den Außendurchmesser unter Druck angenähert und im unteren Bereich soweit als möglich an den Kolbendurchmesser.
Luftfederbälge, die für Busse entwickelt wurden, haben daher meist eine zylindrische Herstellkontur, während solche für Lkw eine konische haben.

Insbesondere bei niedrigen Betriebsdrücken, wie sie bei leerem oder teilbeladenem Fahrzeug vorkommen, neigt der Balg dazu, auf dem Kolben nicht mehr sauber abzurollen. Es kommt zu einer Zipfel- und Faltenbildung in der Balgwand, die zur Beschädigung des betreffenden Bereichs führen kann.

4.1.3 Abrollverhalten im drucklosen Zustand

Insbesondere bei Luftfedern für Anhänger kommt neben der Forderung nach einer für den Einsatzzweck geeigneten Federcharakteristik und guter Haltbarkeit eine weitere hinzu. Anhänger werden häufig per Kran auf Eisenbahnwaggons verladen oder mit Terminalschleppern auf Roll-on-Roll-off Schiffe gezogen. In beiden Fällen werden eine oder mehrere Achsen des Fahrzeugs vom Boden abgehoben, und das Gewicht der Achse hängt dann entweder an Fangseilen oder an den Luftfedern. In diesem Zustand öffnet sich das Niveauregelventil, wodurch jeglicher Überdruck entweicht. Wird das Fahrzeug wieder auf den Boden abgesetzt, muss der Luftfederbalg ohne Innendruck in der Lage sein, wieder sauber über den Kolben abzurollen.
Gelingt dieses nicht, faltet sich die Balgwand ein und kann zwischen Kolben und Platte eingeklemmt werden. Hierbei kommt es dann häufig zu Beschädigungen.
Um dieses zu verhindern, muss der Balg im herstell- bzw. drucklosen Zustand einen Durchmesser haben, der deutlich größer ist als der Kolbendurchmesser. Weiterhin sollte die Balglänge so bemessen sein, dass auch in völlig ausgefederter Stellung ein Rest Rollfalte stehen bleibt. Wie man sieht, sind hier Kompromisse gegenüber dem oben Beschriebenen notwendig.
Auch die Fadendichte, die über den gewählten Gewebetyp und den Wickeltrommeldurchmesser beeinflussbar ist, wirkt sich auf das drucklose Abrollen aus.
Eine zu harte Balgwand ist hier ebenso ungünstig wie eine zu weiche. Im ersten Fall knickt die Balgwand in der Mitte ein, weil zuviel Kraft notwendig ist um den Balg über den Kolben zu rollen, im zweiten Fall ist der mittlere Teil des Balges zu instabil.
Es gibt keine allgemeingültige Richtlinie wie die ideale Kontur zum drucklosen Abrollen aussieht. Hierzu ist die Erfahrung des Luftfederherstellers, und ein Herantasten im Versuch gefragt.

4.1 Luftfedern

Alles, was bisher über Rollbälge gesagt wurde, gilt allgemein für diese Art von Luftfedern, egal ob es nun solche mit beidseitigen Dichtkonen, mit Bördelplatten, mit einvulkanisierten Platten oder Mischbauarten sind. Für verschiedene Einsatzzwecke sind darauf abgestimmte Bauarten entstanden.

4.2.1 Faltenbälge

Faltenbälge werden in Fahrzeugen zur Federung des Aufbaus heute kaum noch eingesetzt. Sie besitzen für den Fahrzeugbetrieb eine ungünstige Charakteristik. Lediglich als sogenannte Liftbälge zum Anheben von Liftachsen bei Leerfahrt und anstelle von Pneumatikzylindern finden Faltenbälge zunehmend Verwendung. Sie werden heute beispielsweise als Keilriemenspanner oder Türöffner in Bussen gebraucht. Wegen Ihres unkomplizierten Aufbaus, und ihrer durch die Einbauhöhe leicht veränderbaren Federcharakteristik ersetzen sie jedoch im stationären Bereich mehr und mehr die klassischen Pneumatikzylinder. Faltenbälge werden hier als Maschinenlagerungen zur Schwingungsisolierung eingesetzt. Hier wird die Eigenschaft, ihre Federrate mit der Einbauhöhe zu Ändern, zum Vorteil. Auf diese Weise lässt sich ein Bauteil ohne konstruktive

Veränderung leicht an den jeweiligen Einsatzzweck anpassen.
Zur oberen und unteren Befestigung können Faltenbälge mit wiederverwendbaren meist aus Aluminium gedrehten Wulstringen oder mit Bördelplatten, wie sie auch bei Rollbälgen Verwendung finden, versehen sein.
Bördelplatten erlauben eine einfache Montage. Sie sind jedoch untrennbar mit dem Faltenbalg verbunden und müssen bei Ausfall des Gummiteils mitersetzt werden.
Wulstringe können vom defekten Luftfederbalg getrennt und wiederverwandt werden. Sie benötigen jedoch anschlussseitig eine glatte und dichte Oberfläche. Auch können sie ohne geeignetes Werkzeug nicht montiert werden.

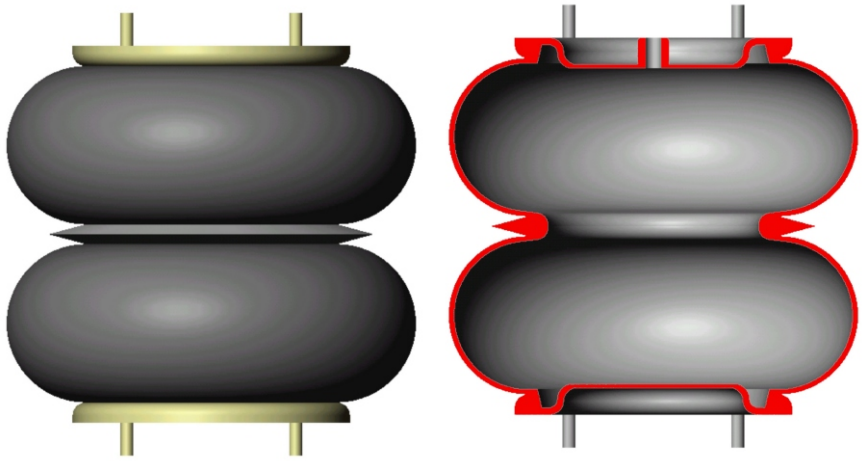


Bild 29: Zweifaltenbalg

4.2.2 Luftfedern mit beidseitigen Dichtkonen

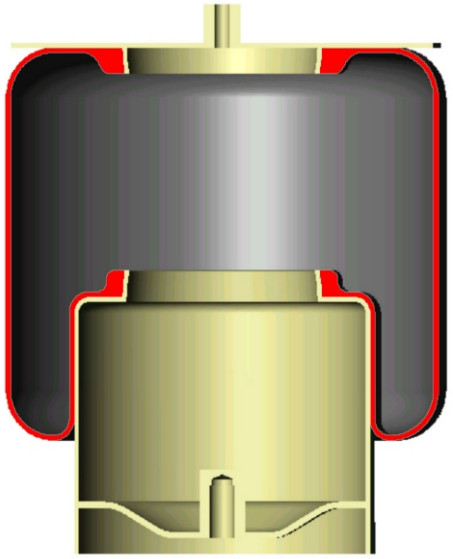


Bild 30:
Rollbalg mit beidseitigen Dichtkonen

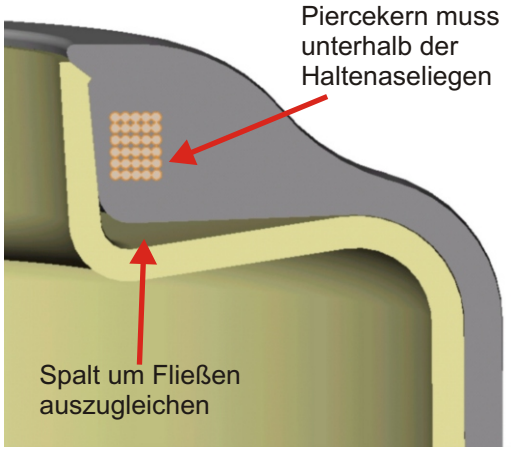


Bild 31:
korrekt montierter Dichtkonus

Bild 30 zeigt eine Luftfeder mit beidseitigen gleichgrossen Dichtkonen. Sie stellen in Europa sozusagen die klassische Art der Luftfedern dar. Ihre Hauptvorteile sind ihre leichte Montierbarkeit ohne Werkzeug bei einem Ausfall am Straßenrand und ihre universelle Kombinierbarkeit mit unterschiedlichen Abrollkolben und Platten. Die unkomplizierte Montage hat aber auch einen nicht ganz unerheblichen Nachteil. Da der Balg, ähnlich einem Reifen auf einer Felge, nicht formschlüssig mit Kolben und Platte verbunden ist, kann er bei extremen Ausfederbewegungen leicht vom kolben- oder plattenseitigen Dichtkonus abrutschen. Die Luftfeder- sowie die Fahrzeughersteller haben hier Methoden entwickelt, die einen sicheren Halt des Balgkonus auf Kolben oder Platte gewährleisten sollen. Am meisten durchgesetzt hat sich hier eine sogenannte Haltenase wie in Bild 31 gezeigt. Hierbei ist es wichtig, dass zwischen der Stirnfläche des Kolbens und dem Balgkonus ein gewisser Spalt offen bleibt. Gummi hat wie jeder künstliche Werkstoff die Eigenschaft zu fließen. Der Spalt stellt sicher, dass wenn sich der Balgkonus mit der Zeit durch Fließen vergrößert, trotzdem eine sichere und luftdichte Pressung zwischen Gummi- und Metallkonus erhalten bleibt. Um die Wirksamkeit der Haltenase zu gewährleisten, muss der Balgkonus wie im Bild 31 dargestellt soweit auf den Metallkonus aufsitzen, das sich der Kern unterhalb der Haltenase befindet.

Wie bereits erwähnt, gehen fast alle Luftfederhersteller aus Reifenherstellern hervor, und vom Luftfederhersteller wurde nur der aus Gummi bestehende Luftfederbalg angeboten. Die übrigen Teile wie Platte, Abrollkolben und einen eventueller innenliegenden Puffer beschafften und montierten die Fahrzeughersteller selbst. Aufgabe des Luftfederherstellers war es hier lediglich eine für die gewünschte Federcharakteristik geeignete Kolbenkontur zu ermitteln.

Bis in die frühen neunziger Jahre hinein wurden Lkw als blattgefederte Fahrzeuge konstruiert. Luftgefederte Achsen boten die Fahrzeughersteller nur als Sonderausstattung an.

Hierdurch entwickelte sich eine große Variantenvielfalt aus einer begrenzten Anzahl von Luftfederbälgen und einer Vielfalt von Kolben- und Plattenvarianten, in der keine Systematik erkennbar wurde.

Jeder Fahrzeughersteller entwickelte seine für ihn typischen Kolben, Platten und Puffer.

In den achtziger Jahren wurde bei den Fahrzeugherstellern die Fertigungstiefe verringert. Man versuchte, wo möglich Module oder Baugruppen einzukaufen. Bei einer Luftfeder als funktionaler Einheit, bestehend aus Gummi und metallischen Komponenten, bietet sich dieses geradezu an. Während man beispielsweise bei Volvo noch Wert darauf legte, Luftfederbälge zu verwenden, die wie Reifen als Katalogware über den Fahrzeugteilehandel erhältlich waren, hatte DAF in Holland schon ein eigenständiges Design und wurde mit kompletten Einheiten, bestehend aus Platte, Balg, Puffer und Kolben beliefert. Begonnen hatte diese Entwicklung Anfang der achtziger bei RVI (damals Renault).

Bis in die frühen neunziger Jahre zogen dann alle großen europäischen Nutzfahrzeughersteller schrittweise nach, und es entwickelten sich auch Mischbauarten mit einer oberen Bördelplatte und einem unteren Dichtkonus bei DAF und Volvo. Es bildete sich bei jedem Fahrzeughersteller ein mehr oder weniger eigenständiges Design heraus. Dieses ging zum Beispiel bei Volvo soweit, dass auf den Luftfederbälgen kein Logo oder Bezeichnung des Herstellers mehr zugelassen wurde.

Durch den Trend zu kompletten Luftfedern kamen auf die Luftfederhersteller, die bisher reine Kautschukverarbeiter waren, neue Aufgaben zu. Etwa 60 % der Wertschöpfung einer Luftfeder bestehen aus nicht im eigenen Hause gefertigten Zukaufteilen. Hierfür mussten Lieferanten gefunden, ein Logistiksystem, Montageeinrichtungen und nicht zuletzt ein Qualitätssystem aufgebaut werden. Bild 32 zeigt einen Rollbalg, kolben- sowie plattenseitig, mit gleichem Konusdurchmesser. Platte und Kolben sind als Blechteile ausgeführt. Neben Gummi und Festigkeitsträger aus Polyamid oder Polyester ist dies in Europa der vorherrschende Werkstoff für Luftfederteile. Der Metallkonus kann mit einer Haltenase

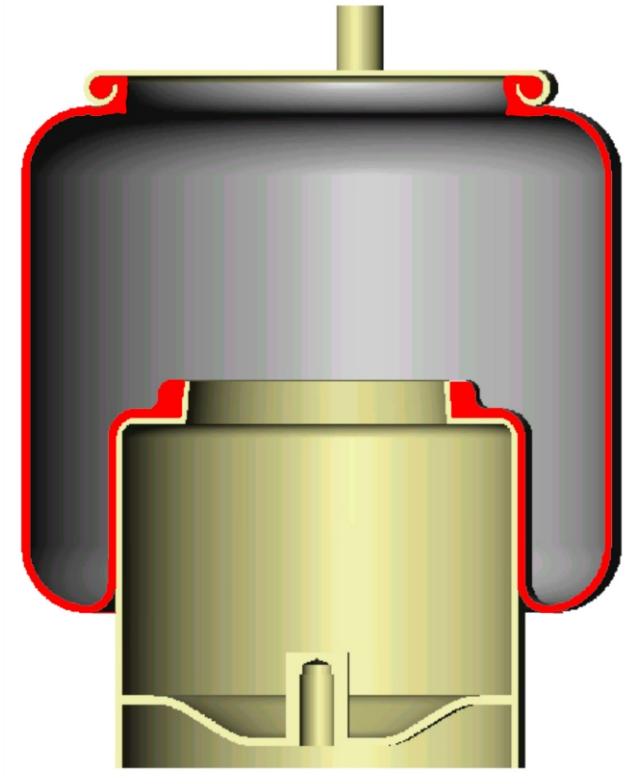


Bild 32:
Luftfeder mit Bördelplatte oben und kolbenseitigem Dichtkonus

versehen sein. Sie gibt dem Balgkonus einen festeren Sitz auf Kolben- und Plattenkonus. Dies ist in der Ausschnittvergrößerung gesondert dargestellt. Oft wird fälschlicherweise angenommen, dass der Balgkonus vollständig unterhalb der Haltenase liegen müsse. Da Gummi, wie andere Kunststoffe auch ein gewisses Fließverhalten zeigt, muss zwischen dem Balg und der Stirnfläche des Kolbens ein Spalt bleiben. Dieser erlaubt es dem Balgkonus, weiter auf den Kolbenkonus zu rutschen, wenn er sich durch Fliessen im Durchmesser vergrößert.

4.2.3 Luftfedern mit Bördelplatten und Spanntellern

Diese Bauart kommt aus Amerika hauptsächlich von dem mit Abstand größerem der beiden dortigen Luftfederhersteller, der Fa. Firestone. Sie hat sich insbesondere bei Anhängerachsen durchgesetzt. In Europa sind am häufigsten die Baureihen 1-T15 und 1-T19 von dieser Firma vertreten. Die obere Bördelplatte und der kolbenseitig mittels Spannplatte fest verbundene Kolben ist bei beiden Baureihen identisch. Diese Luftfedern können gewisse Zugkräfte übernehmen.
In Europa wurden diese Luftfedern mit wenigen Ausnahmen zuerst von den Anhängerachsfabriken eingesetzt. Hier handelt es sich um zumeist mittelständische Unternehmen mit geringer Fertigungstiefe. Luftfedern wurden komplett als Katalogware von den amerikanischen Herstellern eingekauft. Mit Ausnahme von BPW hat hier kaum eine eigenständige Entwicklung in großem Umfang für die Serie stattgefunden. Als Werkstoff für die Kolben herrschte ursprünglich das wegen der geringeren Energiekosten in den USA preisgünstige Aluminium vor.
Erst als in den frühen achtziger Jahren der Dollarkurs stark anstieg und amerikanische Luftfedern für europäische Achsenhersteller zu teuer wurden, trat man an die europäischen Luftfederhersteller heran. Da sich sowieso auch bei den LKW und Bus Herstellern ein Trend zu kompletten Luftfedern abzeichnete und der hohe Dollarkurs ein gutes Geschäft versprach, ging man auf die Achshersteller ein.
Insbesondere die Firestone Luftfedern 1-T15 M6 und 1-T19 M1 und M2 wurden nahezu kopiert. Da Aluminium in Europa wesentlich teurer war als Stahl, und man den Korrosionseigenschaften von Aluminium nicht traute, wurden die Kolben aus Tiefziehblech hergestellt und nachträglich galvanisch verzinkt.
Die Stahlkolben waren natürlich bedeutend schwerer als Aluminiumkolben. Seitens der

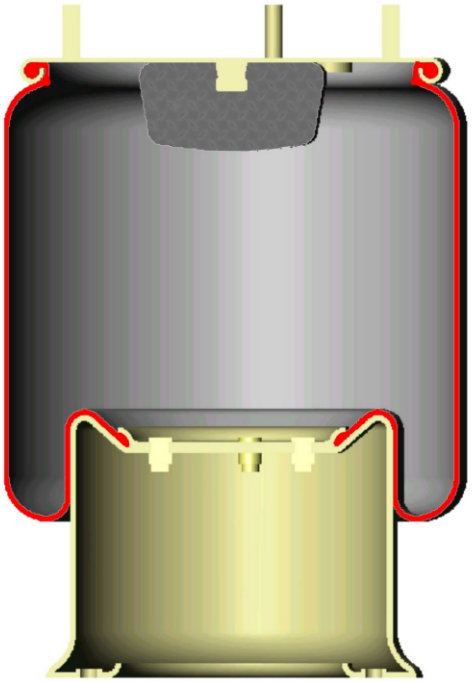


Bild 34:
Luftfeder mit Bördelplatte und Spannteller

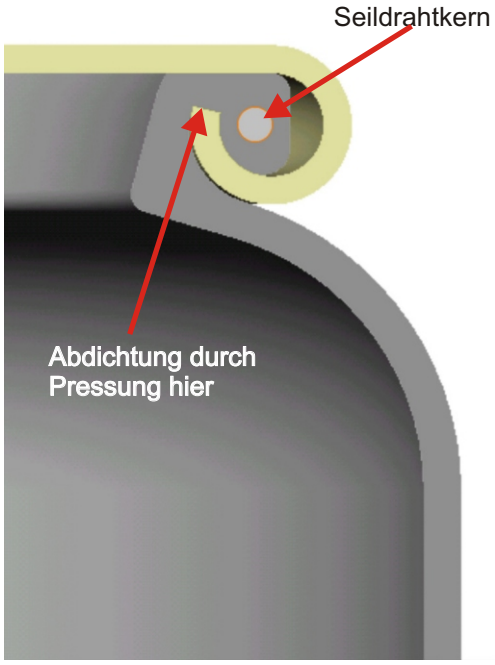


Bild 35:
Verbindung der Bördelplatte mit dem Balg

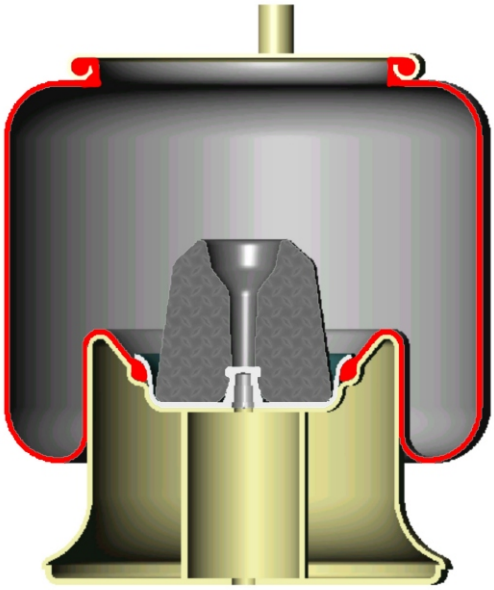


Bild 36:
Luftfeder mit Bördelplatte und
anvulkanisiertem Spannteller

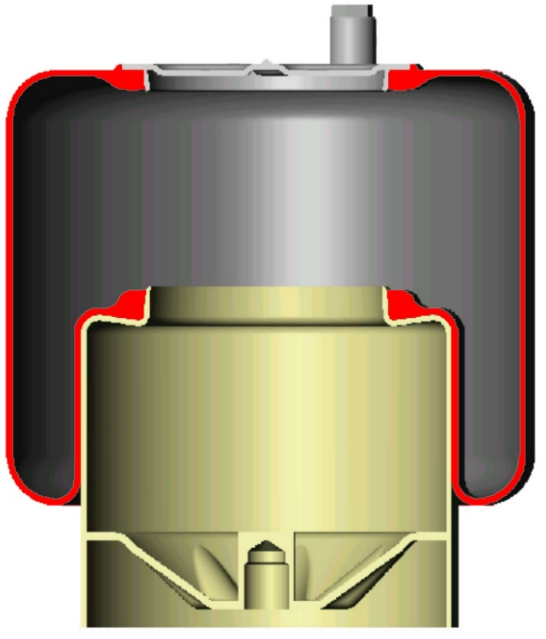
Achshersteller und einiger Luftfederhersteller begann man daher Abrollkolben aus thermoplastischen und duroplastischen Kunststoffen zu entwickeln.
Die europäischen Luftfederhersteller versäumten es jedoch, speziell auf den europäischen Anhängerachsenmarkt mit seinen riesigen Stückzahlen zugeschnittene Luftfedern zu entwickeln. Als der Dollarkurs wieder sank, war man in Europa immer noch mit den Produkten der amerikanischen Hersteller austauschbar.
Während ein Anhänger sicherlich auch technologisch dem ziehenden Fahrzeug hinterherläuft, werden an die Luftfedern von Anhängerachsen höhere Ansprüche gestellt als an solche von Bussen oder Lkw. Um Fangseile zu vermeiden, sollen die Luftfedern auch Zugkräfte übernehmen können. Nachdem die Achse an den Luftfedern gehangen hat, muss der Balg wieder sauber über den Kolben abrollen. Das Gewichts- und damit auch das Druckverhältnis in den Luftfedern ist beim Anhänger größer als beim ziehenden Fahrzeug. Das bedeutet, dass der

Luftfederbalg auch bei sehr niedrigen Drücken noch in der Lage sein muss auf dem Kolben abzurollen. Die Achsen werden bei Anhängern meist an Längslenkern geführt. Der Kolben bewegt sich dabei nicht - mehr oder weniger - senkrecht auf und ab, wie bei den typischen Achsaufhängungen an Lkws und Bussen. Er folgt eher einer Kreisbahn, woraus starke Verwinklungen zwischen Platte und Kolben resultieren. Bild 34 zeigt einen typischen Vertreter der 1- T19 Baureihe von Firestone, wie er bei uns hauptsächlich auf Anhängerachsen, in den USA auch auf Lkw Hinterachsen eingesetzt wird. Die Bördelplatte hat einen Durchmesser von 284 m und nimmt neben dem Luftfanschluss noch 4 Befestigungsbolzen auf.
Der Balg ist auf dem Kolben mit einem Spannteller und vier Bolzen befestigt. An seiner Unterseite trägt der Kolben vier Muttergewinde auf einem Lochkreis vom Durchmesser 200 mm zur achseitigen Befestigung. Die Kolbenstirnseite ist etwas eingezogen, sodass der etwa 60 mm hohe, als Anschlag ausgeführte Puffer über den Kolbenrand hinaussteht.
Die im nächsten Bild 36 dargestellte Luftfeder ist ein typischer Vertreter der 1-T15 Baureihe. Diese Luftfedern liegen vom Durchmesser und von der Tragkraft unter der 1-T 19 Baureihe. Im Gegensatz zu 1-T 19 Baureihe hat der Balg unten einen anvulkanisierten Blechtopf, der mittels eines zentralen Muttergewindes, welches sich in einem Pufferknopf befindet, auf der Kolbenstirnseite verschraubt ist. Die Kolbenstirnseite ist weit eingezogen und bietet so einem sehr hohen Puffer Platz. Solch ein hoher Puffer ist eine weiche Feder, wie man sie für einen guten Fahrkomfort in Bussen benötigt. Trotzdem wird diese Luftfederbauart in Europa hauptsächlich auf Anhängerachsen mit eingeschränkten Raumverhältnissen wie z.B. bei Silofahrzeugen eingesetzt. Für den Anhängerbetrieb mit Wechselpritschen ist diese Bauart weniger geeignet, da der hohe weiche Puffer den Absenkweg bei leerem Fahrzeug begrenzt.

4.2.4 Luftfedern mit einvulkanisierten Konusplatten

Hinter der einvulkanisierten Platte steckt folgende Idee:
Der Metallkonus der Platte muss mit engen Toleranzen und hoher Oberflächengüte gefertigt werden. Gleiches gilt für den balgseitigen Konus. Auch treten in diesem Bereich des Balges oft Fertigungsfehler auf, die nachgearbeitet werden müssen oder die den Balg sogar unbrauchbar machen.
Was liegt also näher, als einen entsprechend mit Haftvermittler vorbereiteten Metallkonus, der auf einer im Durchmesser geringfügig größeren Metallplatte verschweißt ist, mit dem Balgrohling in die Vulkanisationsform einzulegen.
Die Platte mit Metallkonus ist ohne teure mechanische Nacharbeit preisgünstig herstellbar. Als Ersatzteil lässt sich der Luftfederbalg einfacher montieren, weil der Luftanschluss bereits vorher angeschlossen werden kann. Es braucht dann nur noch der kolbenseitige Konus

Bild 37: Luftfeder mit einvulkanisierter Konusplatte



aufgesetzt zu werden.
Ist die Bördelplatte mit dem Balg untrennbar verbunden, so muss diese bei ausgedientem Balg jedes Mal mit ersetzt werden. Dies wäre auch dann der Fall, wenn die Bördelplatte noch völlig intakt ist.
Eine einvulkanisierte Platte ist weitaus weniger aufwändig als eine Bördelplatte. Hier ist der Ersatz zusammen mit dem defekten Balg wirtschaftlich vertretbar.
Diese Bauart wurde erstmals in den Actros Lkw von DaimlerChrysler eingesetzt und hat sich dort bewährt.

5. Luftfedern im Fahrzeug

5.1 Die Regelung der Luftfedern

Bisher war hier immer nur von der Luftfeder selbst, wie sie vom Luftfederhersteller geliefert wird, die Rede. Luftfedern benötigen jedoch einiges an fahrzeugseitiger Zusatzausrüstung um zu funktionieren.
Zuerst hat sich die Luftfederung bei Omnibussen, danach bei Lkw und heute in zunehmendem Maße auch bei Kleinbussen und Transportern durchgesetzt.
Ein Grund hierfür ist neben dem Komfortbedarf der Buss - Passagiere, dass bei Fahrzeugen in der Gewichtsklasse, in der Reise- und Linienbusse sowie schwere Lkw anzutreffen sind, eine wichtige Voraussetzung für eine Luftfederung schon vorhanden ist.
Die für die Luftfederung notwendige Druckluft kann aus der Druckluftbremsanlage abgezweigt werden. Im Allgemeinen ist für die Luftfederung ein Kompressor mit höherer Leistung notwendig. Durch ein sog. Mehrkreisschutzventil muß der „Nebenverbraucher" Luftfederung so von der Bremsanlage getrennt sein, daß im Falle einer Leckage in der Luftfederanlage die Wirkung der Bremsen gewährleistet bleibt. Je nach vorgesehenem Verwendungszweck des Fahrzeugs benötigt die Luftfederung dann ein mehr oder weniger großes Vorratsvolumen und ein sog. Niveauregelventil.
Mit dieser Mindestausrüstung kann ein luftgefedertes Fahrzeug auskommen. An dieser Stelle sollte jedoch noch erwähnt werden, dass Luftfedern wie Spiral- oder Torsionsfedern keine achsführenden Eigenschaften, wie z.B. Blattfedern besitzen.
Die meisten Luftfederregelungsanlagen sind aufwändiger ausgeführt, um Zusatzanwendungen zu ermöglichen. Auch hat sich die Elektronik gegenüber mechanisch pneumatischen Bauteilen hier weitgehend durchgesetzt.

5.1.1 Die Höhenregelung

Luftfederregelungsanlagen werden fast ausschließlich als offenes System ausgeführt. Druckluft wird von der Bremsanlage zur Verfügung gestellt und bei erhöhtem Druckbedarf wie z.B. beim Erhöhen der Last den Luftfedern zugeführt. Wird das Fahrzeug entladen, bzw. steigen bei einem Bus Passagiere aus, muss der Druck in den Luftfedern dieser neuen Lastsituation durch Ablassen von Luft ins Freie angepasst werden. Anderenfalls würde die Feder, wie jede andere, unter zusätzlicher Last einsinken bzw. ausfedern. Da Luftfedern im Allgemeinen als weiche Federn ausgelegt sind, bedeutete dieses unakzeptabel große Federwege. Einer der Hauptvorteile der Luftfederung ist ja die konstante Fahrhöhe.

Während früher vorwiegend pneumatische Schieberventile als Niveauregelventile verwandt wurden, setzt man heute induktiv wirkende Geber ein. Diese steuern Magnetventile an, mit denen die Luftzufuhr zu den Luftfedern geregelt wird. Die induktiven Geber sind an der gleichen Stelle eingebaut wie die pneumatischen Schieberventile. Sie sind genauso wie diese über einen Hebel mit der Achse verbunden.
Da sich beim Ein- und Ausfedern der mit der Achse verbundene Hebel ständig auf- und ab bewegt, strömt auch fortwährend bei dessen Aufwärtsbewegung Luft in die Luftfedern und bei der Abwärtsbewegung ins Freie. Diese bedeutet einen dauernden Luftverbrauch solange das Fahrzeug fährt.

Aus diesem Grund haben Niveauregelventile meistens eine Kennlinie gemäß Bild 38. Bei kleinen Auslenkungen des Hebels (entspricht dem Federweg) wird nur ein kleiner Querschnitt geöffnet. Mit größerem Hebelweg wird der Querschnitt progressiv größer.
Dieses bedeutet ein geringerer Luftverbrauch bei ungestörter Geradeausfahrt des

Fahrzeugs. Auf der anderen Seite bedarf es jedoch längere Regelzeiten bei Änderungen der Beladung. Dies wirkt sich insbesondere bei Omnibussen mit schnell ein- und aussteigenden Fahrgästen negativ aus.

Bei elektronisch arbeitenden Regelungsanlagen umgeht man diesen Nachteil, indem der Öffnungsquerschnitt des Ventils zeitlich verzögert gesteuert wird. Bei Federbewegungen in der Achseigenfrequenz des Aufbaus (~ 1 Hz) öffnet das Ventil nicht.

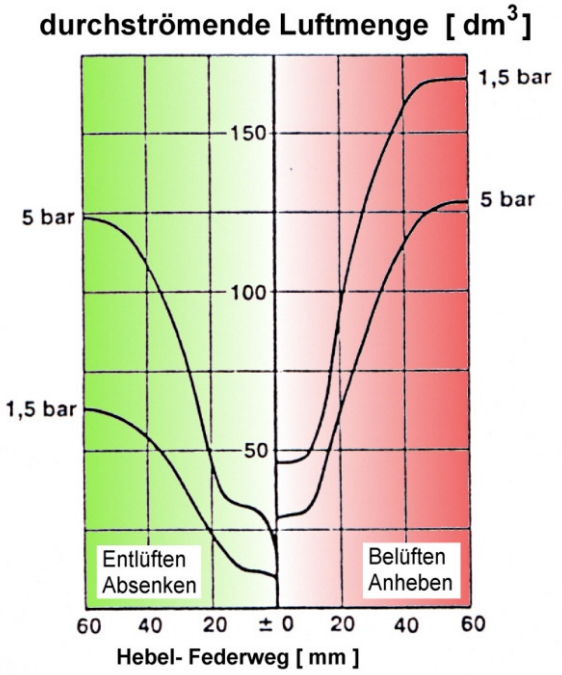


Bild 38: Kennlinie eines Niveauregelventils

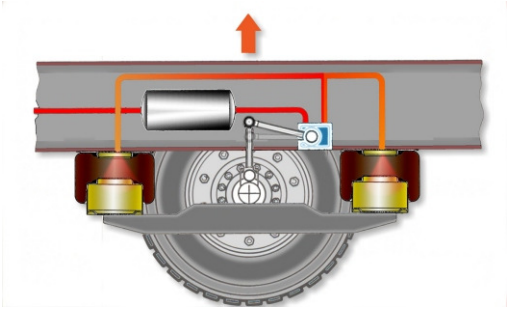


Bild 39: Heben
Durch zusätzliche Last sinken die Federn ein, der Hebel des Niveauregelventils bewegt sich nach oben.
Hierdurch kann die Luft aus dem Vorratstank in die Luftfedern strömen und der Aufbau hebt sich, bis der Hebel am Niveauregelventil waagrecht steht.

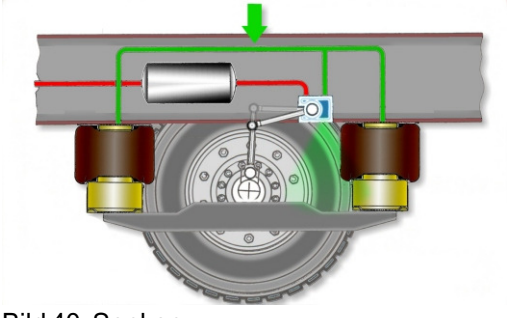


Bild 40: Senken
Durch weniger Last federn die Federn aus, der Hebel des Niveauregelventils bewegt sich nach unten.
Hierdurch kann die Luft aus den Luftfedern ins Freie strömen und der Aufbau senkt sich, bis der Hebel am Niveauregelventil waagrecht steht.

5.1.2 Heben und Senken

Luftfederungen werden bei Nutzfahrzeugen nicht nur zur Abfederung des Aufbaus eingesetzt, sondern auch für weitere Funktionen.

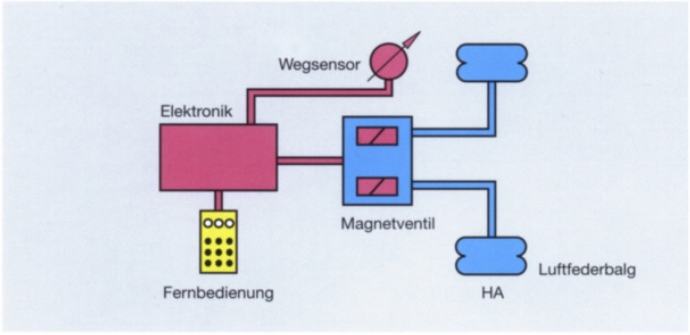
Heb- Senkeinrichtungen bei Lkw

Bei Lkw, insbesondere Wechselpritschenfahrzeugen wird mit Hilfe der Luftfederung der Aufbau zum Aufnehmen einer Wechselpritsche angehoben bzw. abgesenkt. Auch beim Be- und Entladen von Gütern ist diese Technik unverzichtbar geworden, da sie sich unterschiedlichen Laderampenhöhen anpasst.

Bei geringer Beladung kann mittels einer zusätzlichen Luftfeder die Nachlaufachse (sog. Liftachse) angehoben werden. Die Antriebsachse trägt jetzt die Last allein. Somit wird bei Leer- oder Teillast der Reifenverschleiß an der Nachlaufachse erheblich reduziert. An der Antriebs- und Nachlaufachse eines Lkw werden dann insgesamt sieben Luftfedern gebraucht.

Diese Lifteinrichtung läßt sich bei winterlichen Straßenverhältnissen bei beladenem Fahrzeug als Anfahrhilfe verwenden, indem die Liftachse kurzzeitig angehoben wird. Die Last der Liftachse muß dann von der Antriebsachse mit übernommen werden. Verständlicherweise ist dieses nur sehr kurzzeitig möglich, da die Reifen der Antriebsachse sonst überlastet wären und die zulässige Achslast deutlich überschritten würde. Dies führte dann wiederum zu einem vermehrten Verschleiß der Straßen und wird daher vom Gesetzgeber nicht toleriert. Bild 41 zeigt den schematischen Aufbau einer elektronischen Niveauregelung für Nutzkraftwagen.

ECAS für Nutzkraftwagen mit luftgefederter Hinterachse



ECAS für Nutzkraftwagen mit luftgefederter Vorder-, Hinter- und Schlepp- bzw. Liftachse

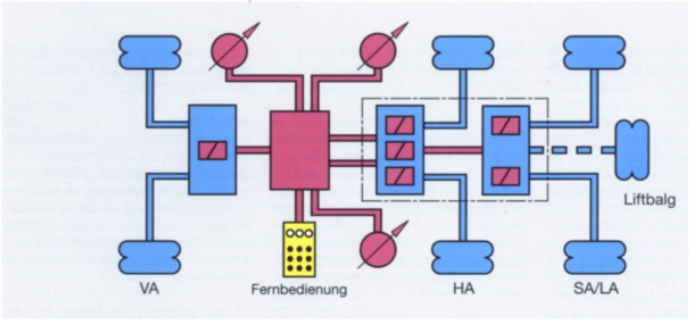


Bild 41: ECAS - elektronische Niveauregelung für Nutzkraftwagen

Kneeling Einrichtungen bei Bussen

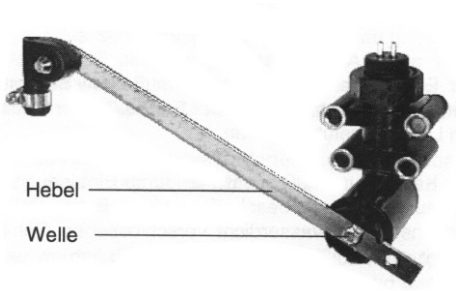


Bild 42: Höhensensor (WABCO)

Bei Omnibussen wird die Heb-Senkeinrichtung dazu verwandt, an Haltestellen den Fahrgästen das Ein- und Aussteigen zu erleichtern. Hierzu werden die dem Fahrbahnrand zugewandten Luftfedern entlüftet und das Fahrzeug damit auf dieser Seite abgesenkt. Auf der gegenüberliegenden Seite werden die Luftfedern belüftet und diese Fahrzeugseite wird damit angehoben.
Auf diese Weise wird das Einstiegsniveau auf Bordsteinhöhe abgesenkt. Reifen von Nutzfahrzeugen drücken sich unter Last um etwa 30 bis 40 mm ein. Um diesen Betrag variiert die Einstiegshöhe, zwischen leerem und beladenem Fahrzeug. Abhängig vom Luftdruck in den Luftfedern, der ein Maß für den Beladungszustand ist, läßt sich dieser Höhenunterschied ausgleichen. In diesem Fall können jedoch keine Luftfedern mit hinterschnittenem Kolben mehr eingesetzt werden, um die Kennlinie über die Änderung der wirksamen Fläche zu beeinflussen. Eine Änderung der wirksamen Fläche mit der Einbauhöhe würde zu unterschiedlichen Drücken trotz gleicher Last führen, was wiederum die Bremskraftaufteilung zwischen Vorder- und Hinterachse stört.

5.1.3 Lastaufteilung zwischen Antriebs und Nachlaufachse
Die Lastaufteilung zwischen Antriebs- und Nachlauf bzw. Vorlaufachse wird meistens durch die Dimensionierung der Luftfedern eingestellt. Es gibt auch die Möglichkeit, dieses über eine elektronische Regelung wie ECAS von Wabco zu bewirken, was sich jedoch aus Kostengründen nicht überall durchgesetzt hat. Das Niveauregelventil, das äusserlich ähnlich aussieht wie der in Bild 42 gezeigte Höhensensor, erhält als Eingangsgröße den Abstand zwischen Aufbau und Achse. Damit wird die Fahrhöhe an der Antriebsachse geregelt. Die Luftzuführung zu den Luftfedern der Nach- bzw. Vorlaufachse zweigt von der Antriebsachse ab. Auf diese Weise erhalten die Luftfedern beider Achsen den gleichen Luftdruck.

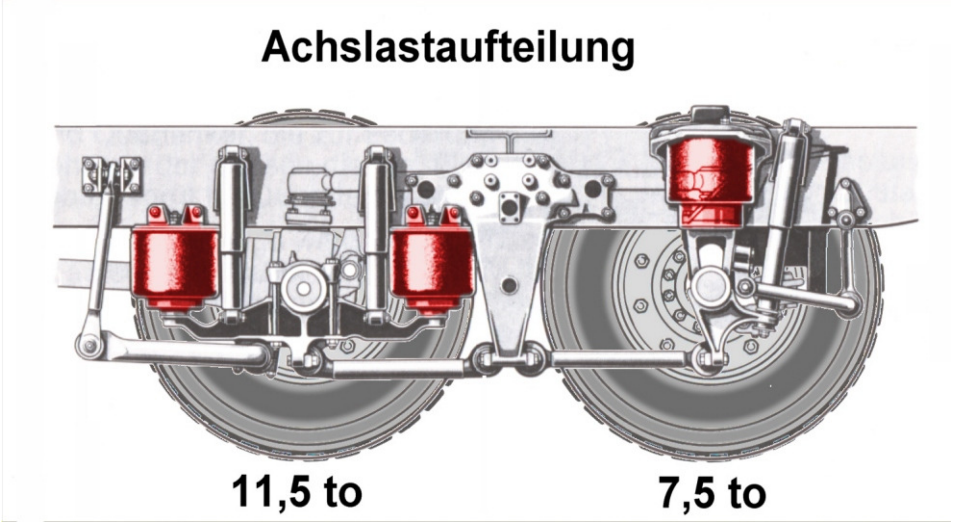


Bild 43: Lastaufteilung zwischen Antriebs- und Nachlaufachse

Da die Beanspruchung der Straße in der 4ten Potenz von der Achslast abhängt, gesteht der Gesetzgeber nur sehr geringe Toleranzen (z.Z. 2 %) auf die Überschreitung der zulässigen Achslasten zu. Weicht das tatsächliche Achslastverhältnis vom konstruktiv vorgesehenem durch zu große Fertigungstoleranzen der Luftfedern ab, so kann nur soviel geladen werden, bis eine der beiden Achsen ihre zulässige Achslast erreicht. Hat die andere Achse jetzt noch nicht ihre zulässige Achslast erreicht, so geht diese Differenz an Nutzlast verloren.

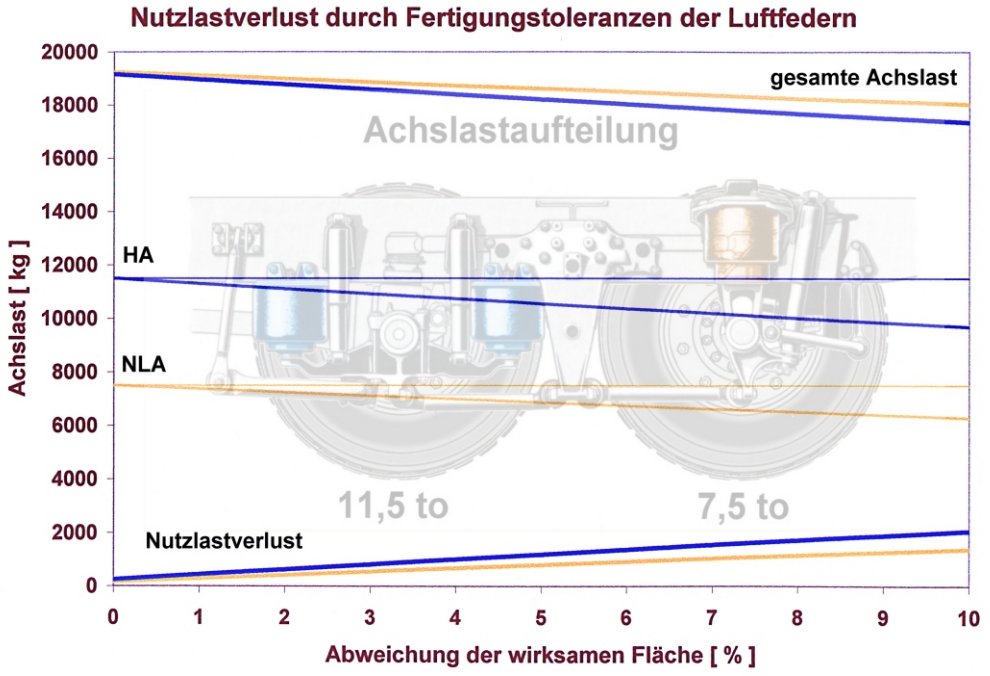


Bild 44:Nutzlastverlust durch Fertigungstoleranzen der Luftfedern

5.1.4 Regelung der Bremskraftaufteilung

An den Hinterachsen von Nutzfahrzeugen ist das Last / Leer Verhältnis besonders groß. Die Hinterachse eines Lkw mit einer zulässigen Achslast von 11,5 to hat bei leerem Fahrzeug eine tatsächliche Achslast von ca. 1,5 to. Die Bremskraft an der Hinterachse muss daher bei leerem Fahrzeug heruntergeregelt werden, um ein Blockieren dieser Achse beim Bremsen zu verhindern. Bei blattgefederten Achsen wird der sich mit der Beladung ändernde Abstand zwischen Achse und Aufbau als Maß für die Belastung genommen.

Als Eingangsgröße für den Druckregler wird der statische Betriebsdruck der Luftfedern verwandt. Hierzu wird ein automatischer Bremskraftregler wie in Bild 45 gezeigt am Aufbau angebaut. Der Hebel ist mit der Achse

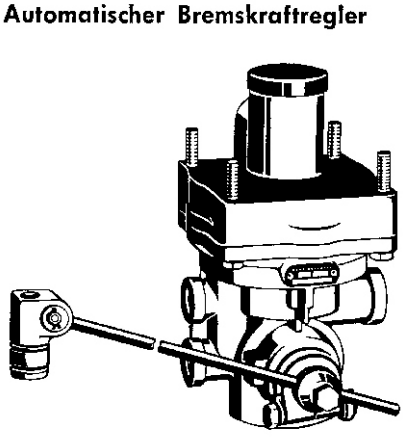


Bild 45: automatischer Bremskraftregler für blattgefederte Achsen

verbunden. Je nach Stellung des Hebel wird der zur Hinterachsbremse durchgelassene Druck begrenzt.

Einer der Hauptvorteile der Luftfederung ist die konstante Fahrhöhe. Damit ändert sich der Abstand zwischen Aufbau und Achse nicht mehr mit der Beladung und man benötigt ein anderes Kriterium um die Bremskraft zu regeln.

Der Druck in den Luftfedern ist, wie in Abschnitt 2 Diagramm 3 gezeigt, der Beladung weitgehend proportional. Deshalb wird bei luftgefederten Achsen der Innendruck der Luftfeder zur Regelung der Bremskraft benutzt.

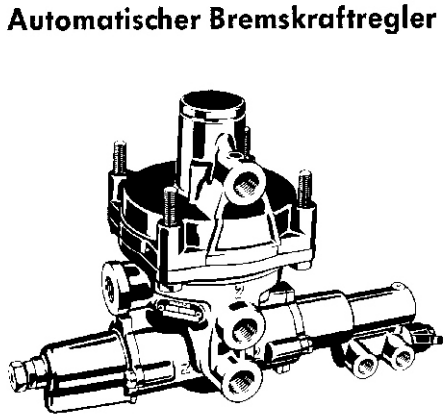


Bild 46: automatischer Bremskraftregler für luftgefederte Achsen

5.2 Übersetzung zwischen Rad und Feder

Luftfedern werden oft nicht direkt auf der Achse eingebaut, sondern auf einem Hebelarm vor oder hinter der Achse. Bei durch Querlenker geführten Achsen ist die Luftfeder auf einem kürzerem Hebelarm angeordnet.

Bei durch Längslenker geführten Achsen, wie sie bei Nutzfahrzeuganhängern üblich sind, ist die Luftfeder auf einem längeren Hebelarm als die Achse selbst angeordnet. Der von der Luftfeder zu durchlaufende Federweg ist größer als der Weg der Achse, dafür ist die Kraft kleiner.

Diese Übersetzung wirkt sich natürlich auch auf die Federungseigenschaften aus. Eine auf eine Eigenfrequenz von einem Hertz ausgelegte Luftfeder bewirkt, wenn sie hinter der Achse auf einem längeren Hebelarm eingebaut ist, eine höhere Achseigenfrequenz als 1Hz. Um wie viel die Eigenfrequenz bzw. die Federrate der Luftfeder niedriger sein muss um an der Achse die gewünschte Federcharakteristik zu erhalten, hängt von den Hebellängen ab.

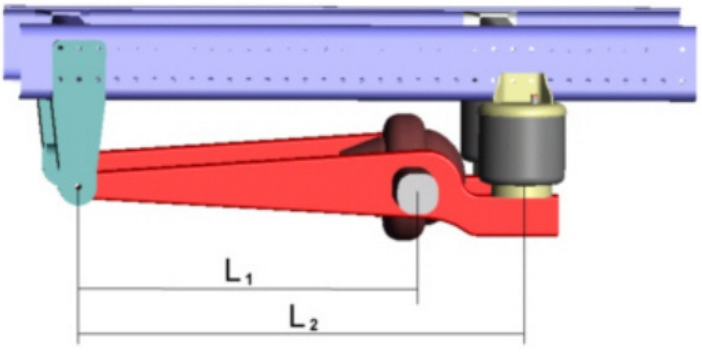


Bild 47: Luftfeder auf längerem Hebelarm hinter der Achse

Die an der Achse wirksame Federrate lässt sich mit den geometrischen Beziehungen aus Bild 47 für eine Feder bzw. eine Achsseite wie folgt berechnen:

allgemein gilt:

$$c_{Achse} = \frac{F_{Achse}}{s_{Achse}} \qquad c_{Feder} = \frac{F_{Feder}}{s_{Feder}}$$

$$F_{Achse} = F_{Feder} \frac{L_2}{L_1} \qquad s_{Achse} = s_{Feder} \frac{L_1}{L_2}$$

eingesetzt

$$c_{Achse} = \frac{F_{Feder} L_2 L_2}{s_{Feder} L_1 L_1} \qquad c_{Achse} = c_{Feder} \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^2$$

Formel 20

Mit Formel 5 aus der Formelsammlung kann man dann mit der auf die Achse bezogenen Federrate c_{Achse} und der (halben) Achslast die Eigenfrequenz bestimmen. Die Formeln lassen sich zur Berechnung der auf die Achse bzw. das Rad bezogenen Federrate anwenden, wenn die Luftfeder auf einem längeren oder kürzeren Hebelarm montiert sind. L_1 ist immer der Abstand vom Drehpunkt zur Achse und L_2 vom Drehpunkt zur Luftfeder.
Die quadratische Abhängigkeit vom Übersetzungsverhältnis lässt erkennen, dass man eine sehr weiche Feder benötigt, um den Komfortansprüchen von Fahrzeugen zur Personenbeförderung zu genügen, wenn die Luftfeder auf einem längeren Hebelarm angeordnet ist als die Achse.
Daher hat sich dieses Konstruktionsprinzip auch hauptsächlich bei Anhängerachsen und weniger bei LKW (Ausnahme: Scania, amerikanische LKW) und Bussen durchgesetzt.

5.3 Dynamischer Ausfederweg

Die konstruktiv vorgesehenen Federwege einer Luftfeder richten sich nach dem Einsatzzweck des Fahrzeugs und nach den Platzverhältnissen am Einbauort. Je mehr Raum für die Einbauhöhe zur Verfügung steht, desto größere Federwege lassen sich verwirklichen. Ein Einfederweg von etwa 100 mm hat sich sowohl bei LKW als auch bei Bussen als ausreichend erwiesen. Bei beiden Fahrzeugarten versucht man jedoch den Einfederweg so klein wie möglich zu halten. Bei Bussen soll der Einstieg so niedrig wie möglich sein, bei LKW die Rahmenhöhe.
Insbesondere bei Linienbussen versucht man, die Einbauhöhe niedrig zu halten. Über den in den Radkästen der Vorderachse eingebauten Luftfedern befindet sich oft eine Sitzreihe, die nicht wesentlich höher angeordnet sein sollte als die übrigen Sitze. Begrenzter Raum für die Einbauhöhe sollte jedoch nicht dazu verleiten, den Ausfederweg konstruktiv zu gering zu bemessen. Wegen ihrer nichtlinearen Kennlinie federt eine Luftfeder weiter aus als sie infolge einer Fahrbahnunebenheit eingefedert ist. Kennlinienblätter zeigen die dynamische oder Adiabate Kennlinie einer Luftfeder meist als eine symmetrisch zur Kraftachse (Y) angeordnete Hystereseschleife. Dieses kommt daher, dass Luftfederkennlinien meistens mit einer Maschine aufgenommen werden, die den Luftfederkolben mit einer

Sinusschwingung auf und ab bewegt. Die Amplitude der Schwingung entspricht dabei dem geometrisch möglichen Einfederweg. D.h. dem kleinsten Abstand zwischen Kolben und Platte.
Damit die Stoßdämpferendanschläge und -Aufnahmen nicht überlastet werden, sollte man den sich bei einer freien Schwingung einstellenden Ausfederweg zumindestens kennen.

Rechnerisch lässt sich dieser annähernd wie folgt ermitteln:

mit Formel 2

$$F = p_0 \; A_w \left(\frac{V_0}{V_0 - v\,s} \right)^{\chi}$$

lässt sich die Federkraft als Funktion des Federweges beschreiben. Die in einer Feder mit linearer Kennlinie gespeicherte Energie ist das Produkt aus Federweg und Federkraft dividiert durch zwei. Dieses entspricht dem Flächeninhalt der Dreiecksfläche unter der linearen Kennlinie.
Bei einer Luftfeder mit lässt sich die in der Feder gespeicherte Energie E_{Feder} mit folgender Beziehung ausdrücken:

$$E_{Feder} = E_{pot}$$

$$E_{feder} = p_0 \int_0^e A_w(s) \left(\frac{V_0}{V_0 - v\,s} \right)^{\chi} ds$$

Formel 21

$$a = \frac{E_{pot}}{m\,g}$$

Formel 22

Bei einem zylindrischem Kolben ist $A_w(s)$ konstant und kann vor das Integral gezogen werden. Trotzdem ist das Integral analytisch schwer zu lösen und eine numerische Rechnung, bei der man die Kurve aufträgt und die Fläche unter ihr ausplanimetriert führt wahrscheinlich schneller zum Ziel. Bei einem hinterschnittenem Kolben benötigt man dazu einen Messschrieb. Die Hysterese kann man dabei vernachlässigen, indem man von einer zwischen oberem und unterem Ast der Hysterese liegenden Linie ausgeht.
Die so ermittelte in der Feder gespeicherte Energie wird beim Ausfedern in Potentielle Energie umgewandelt. Da $E_{Feder} = E_{pot}$ ist, lässt sich der Ausfederweg a mit Formel 22 errechnen.

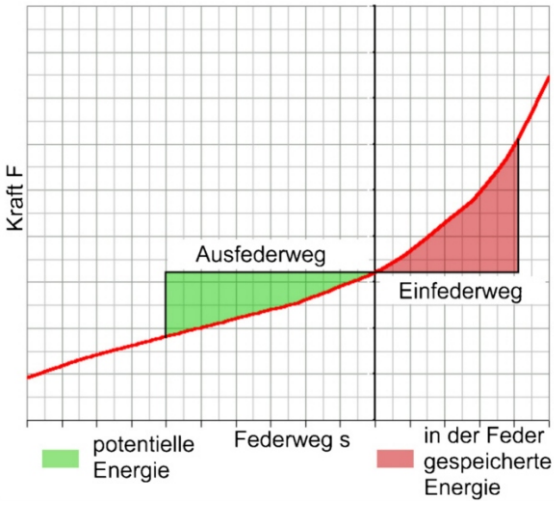


Bild 48: dynamischer Ausfederweg

5.4 Wankverhalten

Unter Wanken versteht man Bewegungen um die Längsachse des Fahrzeugs, die durch Kurvenfahrt oder Seitenwind verursacht werden. Während bei Geradeausfahrt meist beide Federn einer Achse gleichsinnig beansprucht werden, wird bei Kurvenfahrt die auf der Kurvenaußenseite liegende Feder einer Achse zusätzlich belastet, während die andere entlastet wird. Das Fahrzeug lehnt sich sozusagen aus der Kurve heraus. Der Wankwinkel, das ist der Winkel, um den der Fahrzeugaufbau von der Vertikalen abweicht. Er sollte so klein wie möglich bleiben.

Ein großer Wankwinkel wird von Passagieren als unangenehm empfunden. Die Grenze, die von Fahrgästen eines Reise- oder Linienbusses als akzeptabel empfunden wird liegt bei etwa 2 Winkelgraden.

Der Schwerpunkt des Fahrzeugs verlagert sich durch den Wankwinkel zur Kurvenaußenseite. Zu der zusätzlichen Radlast auf dieser Seite infolge der Fliehkraft kommt noch eine weiter Komponente aufgrund der Schwerpunktverlagerung hinzu. Auch aus diesem Grunde sollte der Wankwinkel klein gehalten werden.

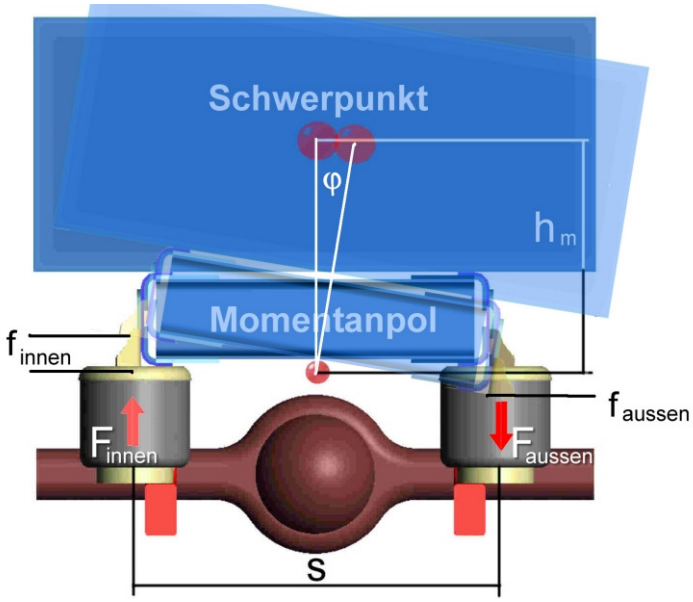


Bild 49: Wanken bei Kurvenfahrt

Bei der Auslegung der Feder muss also ein Kompromiss gefunden werden zwischen der Forderung nach einer komfortablen bzw. straßenschonenden eher weichen Feder bei Geradeausfahrt und einer eher harten Feder bei Kurvenfahrt.

Das Wankverhalten ist natürlich nicht nur von der Charakteristik der Luftfeder selbst abhängig, sondern auch noch von der Federspur bei einer Starrachse und dem Abstand des Aufbauschwerpunktes vom Momentanpol. Bei einer Einzelradaufhängung muss wie in Abschnitt 5.2 beschrieben die Federrate der Luftfeder auf die Federrate am Rad umgerechnet werden.

Um die Wirkung verschiedener Federauslegungen vergleichen zu können, rechnet man die Federrate c der Luftfeder in der Konstruktionslage auf eine Drehfederrate c_D in die die Federspur mit eingeht um.

Das Vorgehen ist am Beispiel einer typischen LKW Hinterachse, geführt an einem oberen

Dreieckslenker und zwei unteren parallelen Längslenkern beschrieben. Der Momentanpol liegt hier mittig über der Achse im Gelenk des Dreiecklenkers.
Vereinfachend wird vorerst davon ausgegangen, dass die durch die Fliehkraft verursachten Kräfte F an den Luftfedern und auch die Federwege gleich groß sind.

$M = 2 \quad F \quad s/2$ | Moment um den Momentanpol

$M = 2 \quad c\ s/2\varphi \quad s/2$ | $F = c\ s/2\varphi$

$M = \varphi\ c\ s^2/2$ | $c_D = M/\varphi$

$c_D = c\ s^2/2$

Formel 23

Die Drehfederrate ist in der zweiten Potenz von der Federspur abhängig. Aus diesem Grunde sollten die Federn immer in möglichst großem Abstand voneinander angeordnet werden. Ein Grund für die Tendenz zu so genannten Hochdruckluftluftfedern, die ja im Durchmesser kleiner bauen.
Mit Hilfe von Formel 23 kann man jetzt die Wirkung verschiedener Luftfedern miteinander vergleichen. Anschaulich wird die Drehfederrate jedoch erst, wenn man mit ihr den Wankwinkel für eine fahrzeugtypische Geschwindigkeit auf einem Landstrassenradius von z.B. 200 m errechnen. Für die im Bild 49 dargestellte LKW Achse benötigen wir jetzt noch den Abstand des Aufbauschwerpunktes vom Momentanpol. Will man den tatsächlichen Wankwinkel errechnen, muss man natürlich noch die Drehfederraten der anderen Achsen und eventuell vorhandener Stabilisatoren berücksichtigen. Hier wird davon ausgegangen, dass die Rechnung zu Vergleichszwecken durchgeführt wird und nur eine Achse betrachtet.

mit $F_F = v^2/r$ | r = Kurvenradius; v = Fahrgeschwindigkeit

ergibt sich der Wankwinkel φ zu:

$$\varphi = \frac{m\ v^2\ h_m}{r\ (\ c_D - h_m\ m\ g\ )}$$

Auf die bisher beschriebene Weise kann man eine Vorabauslegung machen. Man vernachlässigt hierbei allerdings die Tatsache, dass Luftfedern eine progressive Kennlinie haben und die Federwege und Kräfte auf der kurveninneren und kurvenäusseren Seite nicht gleich groß sind. Da sich die Luftfederkennlinie wie in Abschnitt 3.3 beschrieben manipulieren lässt, kann man über eine geeignete Luftfederkennlinie mit Sekundärfeder das Wankverhalten positiv beeinflussen. Bei Fahrzeugen mit geringem Stabilisierungsbedarf d.h. solchen mit niedrigem Schwerpunkt, kann bei geeigneter Auslegung der Luftfeder u.U. auf einen zusätzlichen Bügelstabilisator verzichtet werden. Für die Auslegung benötigt man ein Kennlinienblatt mit möglichst durch eine Messung ermittelten Kennlinien. In den Datenblättern, die die Luftfederhersteller zur Verfügung stellen, sind üblicherweise dynamische oder auch Adiabate Kennlinien für ganzzahlige Druckwerte in Schritten von ein oder zwei bar eingetragen. Man muss sich daher meistens durch Interpolation eine

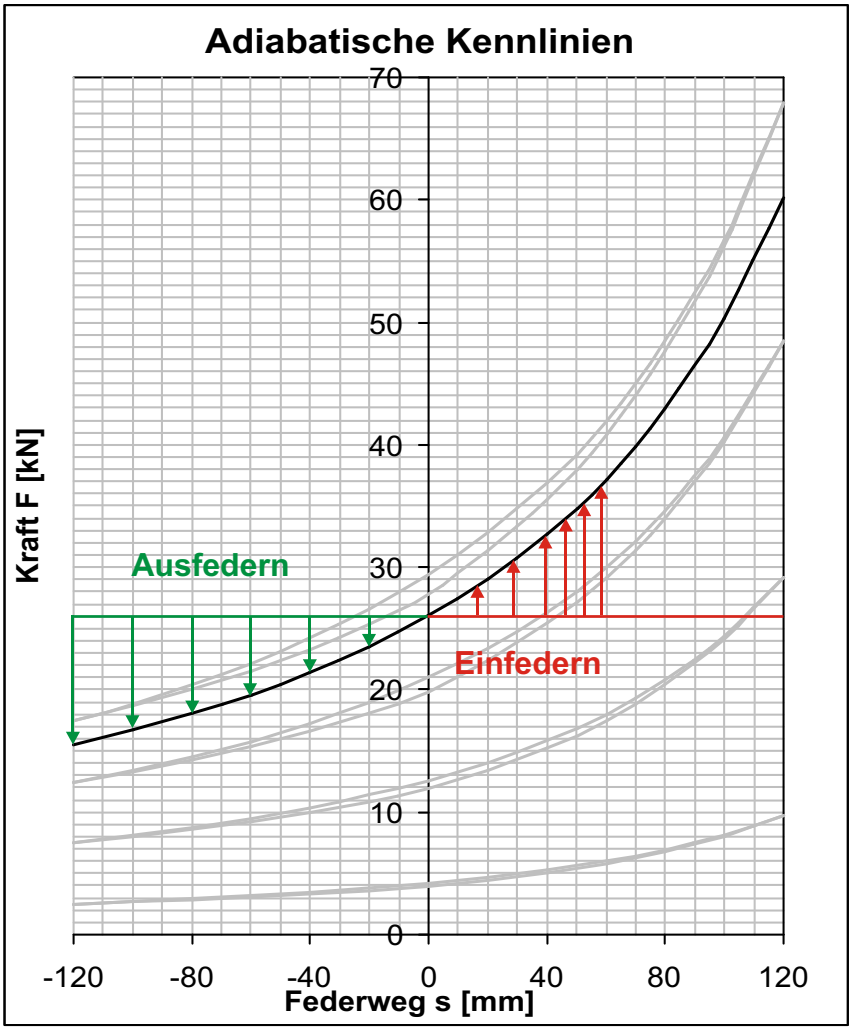


Diagramm 21: unterschiedliche Kräfte und Wege auf kurveninnerer und kurvenäusserer Seite

Wegen der progressiven Luftfederkennlinie ergeben sich keine symmetrischen Ein- und Ausfederwege. Wie in Diagramm 21 gezeigt trägt man in das Diagramm dann auf dem Ausfederweg die dynamischen Kräfte (grüne Pfeile) in konstanten Abständen ein. Da die Summe der Kräfte in vertikaler Richtung bei Wankbewegungen konstant bleibt, trägt man die dem Betrag nach gleichen Kräfte (rote Pfeile) auf dem Ausfederweg in das Diagramm ein. Hierbei ergeben sich natürlich andere Federwege. In den folgenden Beispieldiagrammen wurde mit einer Federspur von 1200 mm und einem Abstand Momentanpol zu Schwerpunkt von 1500 mm gerechnet. Im Beispiel sind die Ausfederwege willkürlich in das Diagramm eingetragen worden. Die Fliehkraft, die solche Federwege auslöst, ergibt sich aus dem Momentengleichgewicht um den Momentanpol. Im folgenden Diagramm 22 sind die Ein-

und Ausfederwege über der sie verursachenden Fliehkraft eingetragen. Diese Art Diagramm erlaubt es, das Wankverhalten eines Fahrzeugs für Luftfedern verschiedener Charakteristik zu vergleichen. Vergleichen deswegen, weil wir nur eine Achse betrachten. Hat die andere oder die anderen Achsen des Fahrzeugs eine unterschiedliche

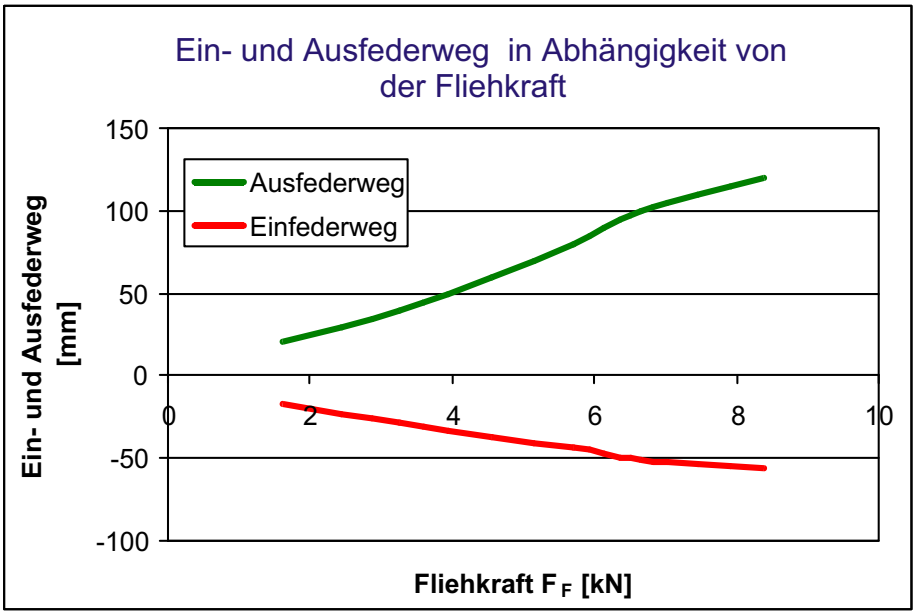
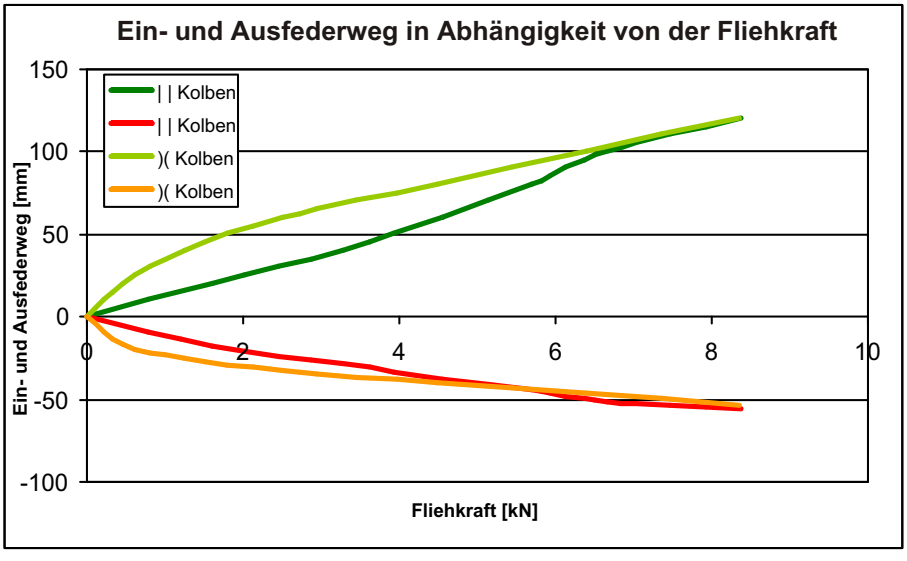


Diagramm 22: Ein- und Ausfederweg als Funktion der Fliehkraft bei Kurvenfahrt. Luftfeder mit zylindrischem Kolben

Drehfederrate, so wird der Aufbau hierdurch auf Torsion beansprucht. Mit einer alternativen, in diesem Fall weicheren Luftfeder, verfährt man wie beschrieben. Im folgenden Diagramm 23 sind die Ein- und Ausfederwege einer im Arbeitspunkt d.h. der Fahrhöhe erheblich



weicheren Luftfeder zusätzlich eingetragen. Bei kleineren Fliehkräften ergeben sich mit der weicheren Feder mit hinterschnittenem Kolben natürlich grössere Federwege als bei der mit zylindrischem Kolben. Mit zunehmender Fliehkraft nähern sich die Kurven jedoch an und

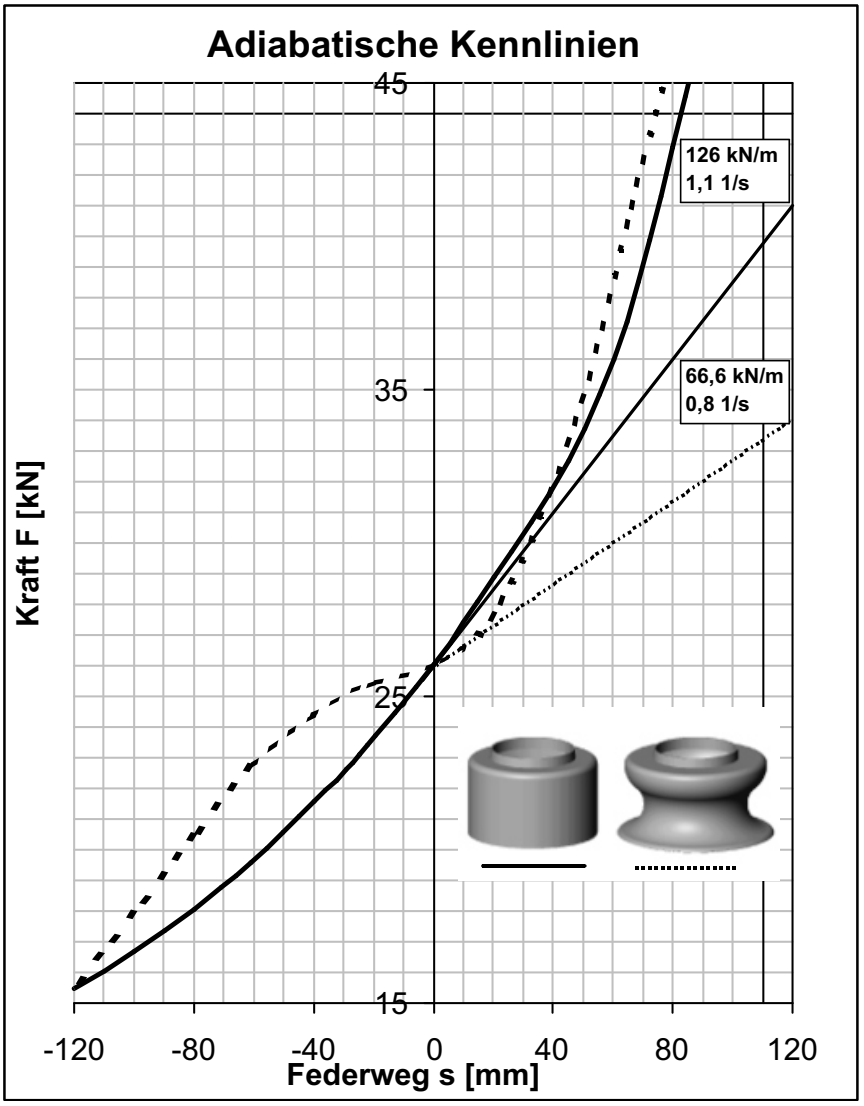


Diagramm 24: Kennlinien der im Beispiel verwandten Luftfedern

können sich je nach Auslegung sogar schneiden. Abhängig von Art und Einsatzzweck des Fahrzeugs kann noch ein zusätzlicher Stabilisator notwendig sein. Solch ein Stabilisator ist meistens als Bügelstabilisator, wie in Bild 50 gezeigt, ausgeführt.

Bei Fahrzeugen mit geringerem Stabilisierungsbedarf wird auch die Sekundärfeder zur Wankstabilisierung genutzt. Ein Teil der von der Luftfeder zu tragenden Last ruht dann ständig auf der Zusatzfeder. Die Luftfeder kann um diesen Betrag kleiner dimensioniert

werden. Da die Zusatzfeder meist in der Luftfeder angeordnet ist, ist sie nicht dem Fahrtwind ausgesetzt. Damit durch die Federarbeit keine übermäßige Wärme entsteht, bestehen solche Zusatzfedern meistens aus einem dämpfungsarmen Material wie z.B. Celasto von der Firma Elastogran.

Bild 50: Bügelstabilisator

Obwohl eine entsprechend ausgelegte Kolbenkontur sicherlich die kostengünstigste Möglichkeit ist, um die Luftfederkennlinie zu beeinflussen, wird hiervon bei Linienbussen nicht immer Gebrauch gemacht.

Bei Linienbussen soll der Einstieg so niedrig wie möglich sein um den Fahrgästen das Ein- und Aussteigen zu erleichtern. Um Reifeneinfederung, die bei den für Busse üblichen Reifendimensionen, um rund 30 mm zwischen leeren und beladenen Fahrzeug variiert, auszugleichen, wird die Höhe der Luftfeder entsprechend geregelt.

Eine Luftfeder mit hinterschnittenem Kolben verändert mit der Höhe ihre wirksame Fläche. Dieses bedeutet, daß bei gleicher Last sich abhängig von der Fahrhöhe unterschiedliche Drücke einstellen.
Da der Innendruck, der zur Regelung der Bremskraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse verwandt wird, der Achslast proportional sein muss, können an den Hinterachsen von Bussen, die eine Einrichtung zum Ausregeln der Reifeneinfederung haben, nur zylindrische Luftfederkolben verwandt werden. Je nach Stabilisierungsbedarf des Fahrzeugs wird man die Progressivität der Kennlinie dann durch die Zusatzfeder erzeugen oder zusätzlich noch einen Bügelstabilisator verwenden.

Bild 51: Celasto Zusatzfedern der Firma Elastogran

5.5 Komfortverbesserung und Strassenschonung durch Luftfedern

Luftfedern wurden in den fünfziger Jahren zuerst in den USA in Pkw und Busse eingebaut um den Fahrkomfort zu erhöhen. Damals wurden noch vielfach Faltenbälge eingesetzt, später dann die wegen ihrer Charakteristik besser für den Fahrzeugeinsatz geeigneten Rollbälge. Bei Pkw hat sich die Luftfederung wegen des höheren Aufwandes und der geringen Komfortverbesserung bei Fahrzeugen der gehobene Mittelklasse nicht durchsetzen können. In Deutschland bot damals Mercedes Benz die Spitzenmodelle mit Luftfedern an. Erst in den späten achtziger Jahren wurden wieder für Pkw als Sonderausstattung Luftfedern angeboten. Beim VW Passat wurde diese Variante jedoch nach kurzer Zeit wieder aus dem Lieferprogramm genommen.
Bei Bussen haben sich Luftfederungen jedoch in großem Umfang durchsetzen können. In Westeuropa werden heute abgesehen von Kleinbussen auf Transporterbasis keine stahlgefederten Busse mehr gebaut.
Mit der Einführung des Actros Lkw von DaimlerChrysler im Jahre 1995 gab es die erste von Anfang als luftgefederte Fahrzeuge konzipierte Lkw Baureihe. Stahlfedern sind hier als Sonderaustattung erhältlich. Bei allen vorherigen Fahrzeugtypen auch anderer Hersteller war es umgekehrt gewesen. Konstruiert wurden sie als stahlgefederte Fahrzeuge. Entwickelte sich ein Markt für eine luftgefederte Variante wurde diese als Sonderaustattung gegen Aufpreis angeboten.
Gefördert wurde diese Entwicklung zugunsten der Luftfederungen dadurch, dass der Gesetzgeber für luftgefederte Achsen eine höhere Achslast zuließ.

5.5.1 Komfortverbesserung durch Luftfedern

Bei Fahrzeugen zur Personenbeförderung wie Pkw, Reise- und Linienbussen soll der Fahrkomfort für die Passagiere so groß wie möglich sein. Deshalb hat man auch bei diesen Fahrzeugarten schon sehr früh den technischen Mehraufwand in Kauf genommen und herstellerseits luftgefederte Varianten oder ausschließlich Fahrzeuge mit Luftfederung angeboten.
Die Federung eines Fahrzeugs ist charakterisiert durch die möglichen Ein- und Ausfederwege, die Federrate und die Dämpfung. Je größer die Federwege sind, desto seltener schlägt die Federung bis auf die Endanschläge durch. Eine kleine Federrate d.h. eine weiche Federung wird im Allgemeinen von Fahrer und Passagieren als angenehm empfunden. Was der Fahrzeuginsasse spürt ist jedoch nicht die Federrate direkt, sondern ihre Auswirkung, die Aufbaueigenfrequenz. Diese hängt jedoch nicht nur von der Federrate der Achsfedern ab sondern auch vom Beladungszustand.
Bei nicht veränderlicher Federrate wie z. B. bei Stahlfedern, wird eine Auslegung, die bei teilbeladenem Fahrzeug als akzeptabel empfunden wird, bei nur mit dem Fahrer besetztem Fahrzeug von diesem als zu hart empfunden. Auf der anderen Seite wird eine solche Federauslegung bei voll beladenem Fahrzeug als eher schwammig empfunden. Die Federung schlägt oft gegen die Endanschläge durch und der Fahrzeugaufbau lehnt sich bei Kurvenfahrt weit aus der Kurve heraus.
Am günstigsten wäre es, wenn sich der Aufbau gar nicht unter den Einflüssen der Fahrbahnoberfläche und der Fliehkraft bei Kurvenfahrt bewegte. So etwas war jedoch bisher technisch nicht möglich und es ist es auch heute nur mit großem Aufwand mit Hilfe aktiver Federerungssysteme. Der zusätzliche Aufwand ist jedoch so groß, daß Kosten und zusätzliches Gewicht nicht akzeptabel sind.
Mit einer Federung, die ihre Charakteristik bei wechselnden Beladungszuständen weitgehend beibehält, ist man dem Komfortziel ein gutes Stück näher. Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, bleibt bei einer Luftfeder die Eigenfrequenz unabhängig von der zu tragenden Last nahezu konstant. Da die Verwendung von Luftfedern

an einem Fahrzeug jedoch einen nicht unerheblichen technischen Mehraufwand bedeutet. haben sich Luftfederungen hauptsächlich bei großen Fahrzeugen mit meist großem Last/ Leer Verhältnis am ehesten durchgesetzt. Es sind vor allem zwei Gründe, die dazu geführt haben, daß Luftfedern sich vor Allem in Bussen und und Lkw durchgesetzt haben.

5.5.1.1 Abhängigkeit vom Last- Leerverhältnis des Fahrzeugs
Das Eigengewicht eines Fahrzeugs nimmt nicht in gleichem Maße zu wie die mögliche Zuladung. Während bei Pkw die Zuladung meist deutlich geringer ist als das Eigengewicht, ist es bei Bussen und Fahrzeugen zur Güterbeförderung meist umgekehrt und kann bei Anhängern ein Vielfaches des Leergewichts betragen. Verdeutlicht wird dieses durch das folgende Diagramm 25.

Verhaeltnis beladen / leer fuer verschiedene Fahrzeugarten

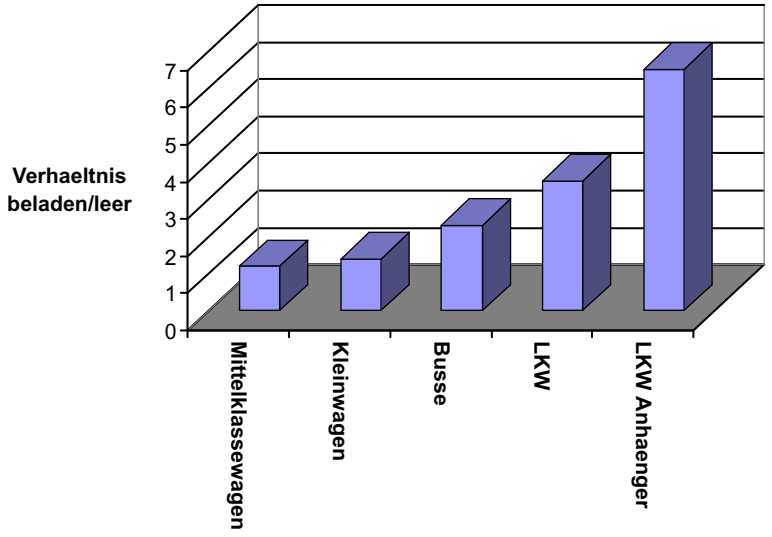


Diagramm 25 Last / Leerverhältnis verschiedener Fahrzeugarten

Während bei Mittelklassewagen das zulässige Gesamtgewicht nur 20 % über dem Gewicht in fahrfertigem, d.h. mit Fahrer besetztem Fahrzeug liegt, sind dieses beim Kleinwagen bereits 40 %. Beim Mittelklassewagen und Fahrzeugen der Oberklasse ist daher die Verwendung von Luftfedern allein um den Fahrkomfort zu erhöhen kaum lohnend. Da sich die Achslasten kaum ändern, bringt eine variable Federrate keinen Komfortgewinn. Die Motivation bei solchen Fahrzeugen Luftfedern einzusetzen liegt eher auf anderem Gebiet. So lässt sich bei Fahrzeugen, die für wechselnden Einsatz auf der Straße und im Gelände konzipiert sind, die Fahrhöhe dem entsprechenden Einsatz anpassen. Bei schneller Straßenfahrt lässt sich auf diese Weise durch Absenken der Luftwiderstand verringern, da Luftverwirbelungen unter dem Fahrzeugboden weitgehend vermieden werden. Bei Fahrt auf unebener Fahrbahn kann der Aufbau angehoben werden um den Einfederweg zu vergrößern und damit ein Durchschlagen der Federung zu vermeiden. Im Gelände gewinnt man mehr Bauchfreiheit.
Bei Bussen mit einem Last / Leerverhältnis von etwa 2,3 kann mit einer nicht variablen Federrate nicht mehr für alle Beladungszustände ein akzeptabler Komfort erreicht werden.

Erwachsene Menschen finden es als am wenigsten unangenehm wenn der Fahrzeugaufbau mit einer Eigenfrequenz von 1 Hz schwingt.

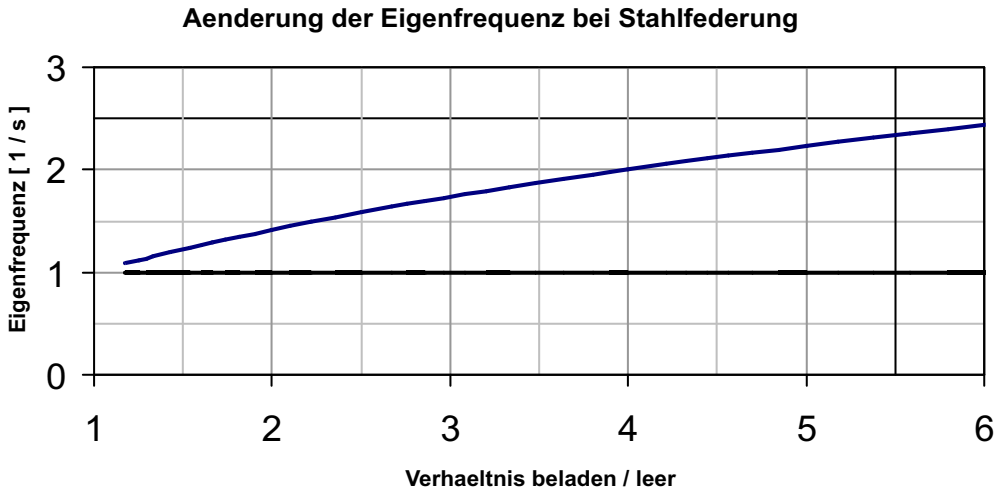


Diagramm 26 Änderung der Eigenfrequenz in Abhängigkeit von Last- Leerverhältnis

Im obigen Diagramm 26 ist die Eigenfrequenz in Abhängigkeit vom Last / Leerverhältnis aufgetragen. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass die Federung des Fahrzeugs auf 1 Hz in beladenem Zustand ausgelegt ist. Bei einem Bus mit einem Verhältnis von 2,3 würde sich bei Stahlfederung die Eigenfrequnz von einem Hz Auf 1,5 Hz erhöhen, wenn das Fahrzeug nur mit wenigen Fahrgästen besetzt ist. 1,5 Hz werden von den Fahrgästen als sehr unangenehm empfunden. Luftfedern haben sich daher bei Bussen allgemein durchgesetzt. In Westeuropa werden keine stahlgefederten Busse mehr in Serie gebaut.
Je größer das Last / Leerverhältnis, desto höher wird die Eigenfrequenz bei unbeladenem Fahrzeug. Dieses wirkt sich natürlich bei Fahrzeugen zur Güterbeförderung mit ihren zum Gesamtgewicht vergleichsweise geringem Leergewicht noch mehr aus.
Hier kommt es allerdings weniger auf Komfort sondern auf die Schonung des Ladeguts. Die Fahrerhäuser von schweren Lkw sind meist aufwändig gefedert. Manche Verlader empfindlicher Güter schreiben den Transport auf luftgefederten Fahrzeugen vor. Auf jeden Fall hat ein Transportunternehmen einen Wettbewerbsvorteil, wenn es einem Kunden garantieren kann, dass seine Ware auf luftgefederten Fahrzeugen transportiert wird.
Ein nicht unerheblicher Vorteil ist auch die von der Beladung unabhängige, konstante Fahr- und damit Ladehöhe von Nutzfahrzeugen. Der gesetzliche Rahmen, der eine Gesamthöhe von vier Metern zulässt kann damit voll ausgeschöpft werden. Bei Stahlfedern ist das unbeladene Fahrzeug vier Meter hoch, das beladene um den Einfederweg niedriger. Wo das Ladegut geschont wird, wird natürlich auch die Straße weniger beansprucht und verschleißt weniger. Mehr hierzu im Abschnitt 5.5.2.
Bei Luftfedern für Pkw ergibt sich noch eine weitere Problematik. Eine Pkw Luftfeder ist nicht einfach eine verkleinerte Lkw Luftfeder.

5.5.1.2 Harshness bei kleinen Baugrössen

Als Harshness bezeichnet man einen Effekt bei einer Luftfederung, der sich Ähnlich äussert wie die Losbrechkraft bei Stahlfedern. Durch die Reibung zwischen den Blättern einer Blattfeder, die erst überwunden werden muss, “reagiert” eine Blattfeder erst ab einer gewissen Mindestkraft mit einer Durchbiegung.
Luftfeder setzen einer auf sie wirkenden Kraft zwei Arten von Kräften entgegen:

- Kräfte, die aus dem Produkt von Druck und wirksamer Fläche entstehen,
- Kräfte, die durch die Verformung der Balgwand entstehen.

Die Kräfte, die zur Verformung der Balgwand, d.h. zum Abrollen über den Kolben notwendig sind, wurden bei Luftfedern mit Dimensionen, wie sie bei Bussen eingesetzt werden, vernachlässig.
Bei den weitaus kleineren Pkw Luftfedern ist dieses nicht mehr möglich.
Wird der wirksame Durchmesser größer, so vergrößert sich die wirksame Fläche mit der zweiten Potenz. Der den Kräften, die aus der Verformung des Balgmaterials herrühren proportionale Umfang, vergrößert sich jedoch nur linear.

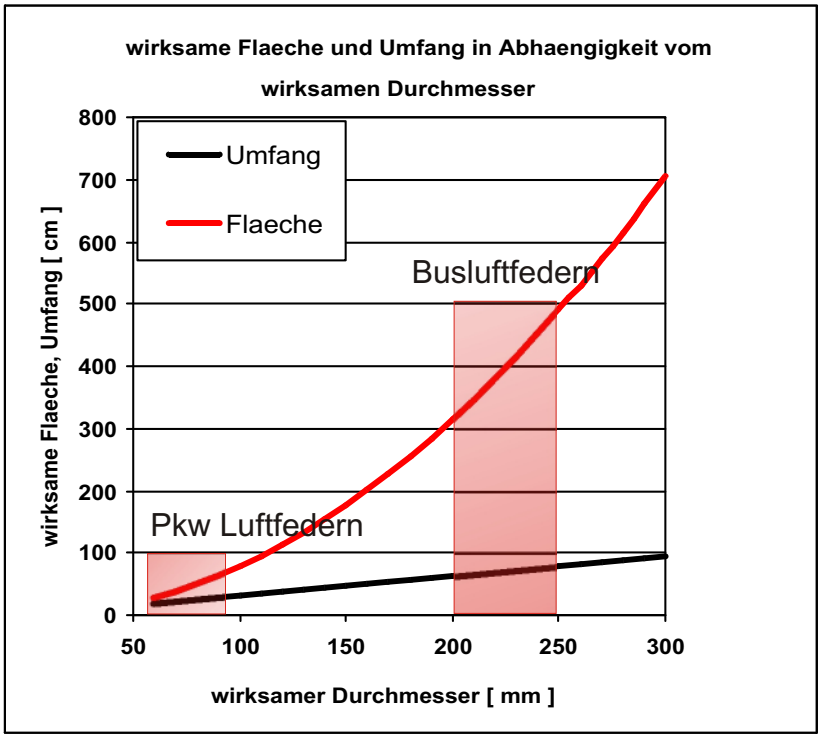


Diagramm 27: Umfang und wirksame Fläche in Abhängigkeit vom wirksamen Durchmesser

Das Diagramm 27 verdeutlicht dieses. Pkw Luftfedern liegen mit ihren Abmessungen in einem Bereich, in dem die Balgwand einen vergleichweise großen Anteil an den Federkräften hat.
Neben den Anforderungen an den Gummi- Gewebeverbund nach einer guten dynamischen Tüchtigkeit muss an das Material von Pkw Luftfedern die Forderung nach einer guten

Flexibilität und einer geringen Eigendämpfung gestellt werden. Man verwendet hierzu dämpfungsarme Mischungen und trägt den kleineren Abmessungen durch ein dichter eingestelltes Gewebe mit dünneren Fäden Rechnung.
Solange Pkw nicht in großen Umfang mit Luftfederungen ausgerüstet werden, und es hierdurch zu nennenswerten Stückzahlen kommt, ist die Fertigung aus logistischen Gründen schwierig. Man benötigt andere Materialen als die in großen Mengen eingekauften für Nutzfahrzeugluftfedern und gänzlich andere Fertigungseinrichtungen.

5.5.2 Straßenschonung durch Luftfedern

Unsere Straßen werden hauptsächlich durch die schweren Nutzfahrzeuge beansprucht. Man erkennt dieses an den Spurrillen auf der rechten Fahrspur der Autobahnen und an den Querrillen vor Verkehrsampeln. Untersuchungen zufolge nimmt die Staßenbeanspruchung mit der vierten Potenz der Achslast zu. Die Achs- und Radlasten setzen sich aus einem statischen und einem dynamischen Anteil zusammen. Der statische Anteil, d.h. der Anteil, den die Achse auf die Waage bringt, ist per Gesetz limitiert. Der dynamische Anteil, der durch Radlastschwankungen beim Ein- und Ausfedern entsteht, und dessen Lastspitzen den Straßenaufbau belasten, wurde bis vor ungefähr zehn Jahren vom Gesetzgeber nicht berücksichtigt. Können solche Lastspitzen durch eine geeignet aus gelegte Federung gemildert werden, kann für solche Achsen eine höhere Achslast zugelassen werden ohne die Straße dadurch mehr zu beanspruchen. Der Gesetzgeber hat diesem in den letzten Jahren Rechnung getragen.

5.5.2.1 gesetzliche Grundlagen

Die zulässigen Achslasten und Gewichte für Kraftfahrzeuge, Anhänger und Züge sind in §34 der Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) geregelt.

Doppelachslast von Kraftfahrzeugen unter Beachtung der Vorschriften für die Einzelachslast

a)	*Achsabstand weniger als 1,0 m*	*11,50*	*t*
b)	*Achsabstand 1,0 m bis weniger als 1,3 m*	*16,00*	*t*
c)	*Achsabstand 1,3 m bis weniger als 1,8 m*	*18,00*	*t*
d)	*Achsabstand 1,3 m bis weniger als 1,8 m, wenn die Antriebsachse mit Doppelbereifung und Luftfederung oder einer als gleichwertig anerkannten Federung nach Anlage XII ausgerüstet ist oder jede Antriebsachse mit Doppelbereifung ausgerüstet ist und dabei die höchstzulässige Achslast von 9,50 t je Achse nicht überschritten wird,*	*19,00*	*t*

Für ein mit Luftfederung ausgerüstetes Kraftfahrzeug wird eine um eine Tonne höhere Achslast zugestanden. Dieses ist reiner Nutzlastgewinn, da sich das Eigengewicht des Fahrzeugs dadurch nicht erhöht. Für Anhänger und Züge wird analog verfahren. Es ist leicht vorstellbar dass dieses für Nutzfahrzeugbetreiber ein großer Anreiz ist luftgefederte

Fahrzeuge zu kaufen.
Bis vor etwa 10 Jahren enthielt der §34 der StVZO lediglich die Forderung nach straßenschonender Bauweise. Eine Definition in Form einer Ausführungsrichtlinie existierte nicht.
Die erste Änderung gestand luftgefederten Achsen eine erhöhte Achslast zu. Kurz darauf kam die nächste Änderung, in der es hieß " Luftfederung oder ähnlich". Wieder ohne weitere Definition.

Inzwischen hat man, da sehr viele Lkw Betreiber von den Vergünstigungen für Luftfedern gebrauch machen, eine Richtlinie geschaffen, aus der hervorgeht, wann eine Federung als gleichwertig mit einer Luftfederung anzusehen ist. Es handelt sich hierbei um eine reine Wirkvorschrift. Um eine höhere Achslast zu realisieren, sind Luftfedern nicht mehr zwingend vorgeschrieben. Auch eine Prüfvorschrift, die es erlaubt, mit verhältnismäßig einfachen Mitteln die Vorgaben zu überprüfen, ist in der Richtlinie enthalten.
Im Folgenden ist die Richtlinie im Wortlaut wiedergegeben.

StVZO - Anlage XII (§ 34 Abs. 4 Nr. 2 Buchstabe d, Abs. 5 Nr. 2 Buchstabe b und Nr. 3 Buchstabe b, Abs. 6 Nr. 3 Abs. 4 Nr. 2 Buchstabe d, Abs. 5 Nr. 2 Buchstabe b und Nr. 3 Buchstabe b, Abs. 6 Nr. 3 Buchstabe b)

Bedingungen für die Gleichwertigkeit von Luftfederungen und bestimmten anderen Federungssystemen an der (den) Antriebsachse(n) des Fahrzeugs

1 Definition der Luftfederung

Ein Federungssystem gilt als luftgefedert, wenn die Federwirkung zu mindestens 75% durch pneumatische Vorrichtungen erzeugt wird.

2 Gleichwertigkeit mit der Luftfederung

Ein Federungssystem wird als der Luftfederung gleichwertig anerkannt, wenn es folgende Voraussetzungen erfüllt:

2.1 Während des kurzzeitigen freien niederfrequenten vertikalen Schwingungsvorgangs der gefederten Masse senkrecht über der Antriebsachse oder einer Achsgruppe dürfen die gemessene Frequenz und Dämpfung der Federung unter Höchstlast die unter den Nummern 2.2 bis 2.5 festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten.

2.2 Jede Achse muß mit hydraulischen Dämpfern ausgerüstet sein. Bei Doppelachsen müssen die hydraulischen Dämpfer so angebracht sein, daß die Schwingung der Achsgruppe auf ein Mindestmaß reduziert wird.

2.3 Das mittlere Dämpfungsverhältnis D muß über 20% der kritischen Dämpfung der Federung im Normalzustand, d.h. mit funktionstüchtigen hydraulischen Dämpfern, betragen.

2.4 Wenn alle hydraulischen Dämpfer entfernt oder außer Funktion gesetzt sind, darf das Dämpfungsverhältnis der Federung nicht mehr als 50% des mittleren Dämpfungsverhältnisses D betragen.

2.5 Die Frequenz der gefederten Masse über der Antriebsachse oder der Achsgruppe während eines kurzzeitigen freien vertikalen Schwingungsvorgangs darf 2,0 Hz nicht überschreiten.

2.6 Unter Nummer 3 werden die Frequenz und die Dämpfung der Federung definiert. Unter Nummer 4 werden die Prüfverfahren zur Ermittlung der Frequenz- und der Dämpfungswerte beschrieben.

3 Definition von Frequenz und Dämpfung

In dieser Definition wird von einer gefederten Masse M (kg) über einer Antriebsachse oder einer Achsgruppe ausgegangen. Die Achse oder die Achsgruppe hat einen vertikalen Gesamtdruck zwischen Straßenoberfläche und gefederter Masse von K Newton/Meter (N/m) und einen Gesamtdämpfungskoeffizienten von C Newton pro Meter und Sekunde (N/ms). Z ist der Weg der gefederten Masse in vertikaler Richtung. Die Bewegungsgleichung für die freie Schwingung der gefederten Masse lautet:

$$M\frac{d^2Z}{dt^2}+C\frac{dZ}{dt}+KZ=0$$

Die Frequenz der Schwingung der gefederten Masse F rad/s ist:

$$F=\sqrt{\frac{K}{M}-\frac{C^2}{4M^2}}$$

Die Dämpfung ist kritisch, wenn C = Co ist, wobei

$$Co=2\sqrt{KM} \quad (1)$$

$$Co=2\sqrt{KM}$$

ist.

Das Dämpfungsverhältnis als Bruchteil des kritischen Wertes ist C/Co.

Die kurzzeitige freie vertikale Schwingung der gefederten Masse ergibt die in Abbildung 2 dargestellte gedämpfte Sinuskurve. Die Frequenz läßt sich durch Messung der für sämtliche zu beobachtenden Schwingungszyklen benötigten Zeit ermitteln. Die Dämpfung wird durch Messung der aufeinanderfolgenden Schwingungspeaks, die in derselben Richtung auftreten, ermittelt. Wenn die Amplitudenpeaks des ersten und des zweiten Schwingungszyklus A_1 und A_2 sind, beträgt das Dämpfungsverhältnis D

$$D=\frac{C}{Co}=\frac{1}{2\pi}\,In\frac{A_1}{A_2}$$

Dabei ist In der natürliche Logarithmus des Amplitudenverhältnisses.

4 Prüfverfahren

Um im Test das Dämpfungsverhältnis D, das Dämpfungsverhältnis bei entfernten hydraulischen Dämpfern sowie die Frequenz F der Federung bestimmen zu können, muß das beladene Fahrzeug entweder

a) mit geringer Geschwindigkeit (5 km/h ± 1 km/h) über eine Schwelle von 80 mm Höhe mit dem in Abbildung 1 gezeigten Profil gefahren werden; auf Frequenz und Dämpfung ist die kurzzeitige Schwingung zu untersuchen, die sich ergibt, nachdem die Räder an der Antriebsachse die Schwelle wieder verlassen haben; oder

b) am Fahrgestell heruntergezogen werden, so daß die Antriebsachslast das Anderthalbfache des höchsten statischen Wertes beträgt. Danach wird die auf das Fahrzeug wirkende Zugkraft plötzlich aufgehoben und die daraus resultierende Schwingung untersucht; oder

c) am Fahrgestell hochgezogen werden, so daß die gefederte Masse um 80 mm über die Antriebsachse angehoben wird. Danach wird die auf das Fahrzeug wirkende Zugkraft plötzlich aufgehoben und die daraus resultierende Schwingung untersucht; oder

d) anderen Verfahren unterzogen werden, sofern ihre Gleichwertigkeit vom Hersteller gegenüber der zuständigen technischen Behörde zufriedenstellend nachgewiesen wurde.

Das Fahrzeug sollte zwischen Antriebsachse und Fahrgestell senkrecht über der Achse mit einem Schwingungsschreiber versehen werden. Anhand der Zeitspanne zwischen der ersten und der zweiten Kompressionsspitze lassen sich einerseits die Frequenz F und andererseits das Amplitudenverhältnis und damit dann die Dämpfung ermitteln. Bei Doppelantriebsachsen sollten Schwingungsschreiber zwischen jeder Antriebsachse und dem Fahrgestell senkrecht über diesen Achsen angebracht werden.

Abbildung 1Schwelle für Federungsprüfungen

6. Hochdruckluftfedern

6.1 Besonderheiten

Das Thema “Hochdruckluftfedern” ist ein sehr Altes. Es wurde immer wieder aufgegriffen und aus unterschiedlichen Gründen wieder fallengelassen. Die Abwägung der Vor- und Nachteile hat immer wieder dazu geführt, sich bei Neuentwicklungen gegen sogenannte Hochdruckluftfedern zu entscheiden. Bevor wir diese Gründe näher betrachten, müssen wir uns mit der Definition befassen.

Luftfedern wurden an angetriebenen Fahrzeugen für einen statischen Betriebsdruck von etwa 6 bis 7 bar ausgelegt. Die Luftfederbälge sind dann als zweilagige Bälge mit einem Durchmesser im druckbeaufschlagtem Zustand von rund 300 mm mit zwei sich kreuzenden Gewebelagen ausgeführt. Bei Anhängern ist der Durchmesser meistens etwas größer um den Betriebsdruck auf maximal 5 bar zu begrenzen. Anhänger haben keine eigene Druckluftversorgung. Sie werden durch das ziehende Fahrzeug versorgt. Damit jeder Anhänger mit jedem Zugfahrzeug kombiniert werden kann, sind die Drücke an den Kupplungshahnen des Zugfahrzeugs vom Gesetzgeber festgelegt. Der Vorratsdruck für den Anhänger beträgt 8 bar.

Um den Aufbau mittels der Luftfederung anheben zu können, muss der statische Betriebsdruck deutlich unter dem Vorratsdruck liegen.

Bei Zugfahrzeugen ist der Vorratsdruck meistens auf 12 bar ausgelegt. Hier können die Luftfedern zum Tragen des Aufbaus für einen höheren Druck ausgelegt werden. Est bleibt trotzdem eine ausreichende Druckreserve zum Heben erhalten.

Die MAN setzt seit über 10 Jahren sogenannte Gürtelbälge bei Lkws und Bussen ein. Ihr statischer Betriebsdruck liegt mit acht bis neun bar deutlich über dem von zweilagigen Luftfedern. Der Durchmessergewinn liegt bei etwa 30 mm. Solche Produkte unterscheiden sich von den üblichen Zweilagenbälgen durch zusätzliche 2 Gewebelagen. Diese beiden Lagen befinden zwischen den beiden herkömmlichen Lagen, die beide Kerne umschlingen. Die zusätzlichen Lagen gehen nur vom oberen Kern bis zum tiefsten Punkt der Rollfalte. Sie sind somit auf dem äußeren Durchmesser, auf dem die größte Fadenspannung herrscht, wirksam.

Der Berstdruck eines solchen Luftfederbalges nimmt natürlich zu. Allerdings nicht auf den doppelten Wert, da nicht alle Lagen gleichmäßig tragen.

Erkauft wird der höhere Berstdruck mit zwei nicht unerheblichen Nachteilen:

Da die zusätzlichen Gewebelagen bis zum tiefsten Punkt der Rollfalte gehen müssen, ist solch ein Balg nur noch mit einer Betriebshöhe einsetzbar. Die Balgwand ist sehr steif. Beim Ausfall des Luftfederbalges ist ein Austausch am Straßenrand mit Bordmitteln nur schwer möglich. Dieses ist einer der Gründe, warum man sich bei der Entwicklung des Actros bei DaimlerChrysler wieder für moderate Drücke unter 7 bar entschieden hat.

Mit Hochdruckluftfedern sind solche Federn gemeint, die außerhalb der derzeitigen Anwendungsgrenzen liegen. D.h. für statische Betriebsdrücke oberhalb von 10 bar ausgelegt sind. Bevor wir uns mit den durch den höheren Druck erkauften Nachteilen auseinander setzen, sollten wir die Beweggründe, den Druck anzuheben, uns vor Augen führen.

Es gibt nur einen, aber einen sehr gewichtigen Grund, den Betriebsdruck einer Luftfeder über den jetzigen Standard anzuheben.

Die Federkraft ist das Produkt aus Druck und Fläche. Je höher der Betriebsdruck, desto kleiner kann die Fläche werden, auf die der Druck wirkt. Dieses ist bei Luftfedern die wirksame Fläche. Mit ihr wird auch der Außendurchmesser kleiner. Bei gleicher Bauhöhe - diese ist von den geforderten Federwegen abhängig - wächst natürlich die Gefahr, dass die Luftfeder ausknickt. Ein Produkt, welches bei sonst gleichem Verhalten und gleicher

Leistung einen kleineren Bauraum benötigt, ist natürlich immer von Vorteil. Wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, lassen sich Luftfedern mit kleinerem Durchmesser auf einer breiteren Federspur montieren und damit das Wankverhalten verbessern. Auch in Fahrzeuglängsrichtung steht mehr Bauraum für z.B. Tank und Batteriekästen zur Verfügung. Bevor man sich jedoch daranmacht eine luftgefederte Achsaufhängung mit Luftfedern für

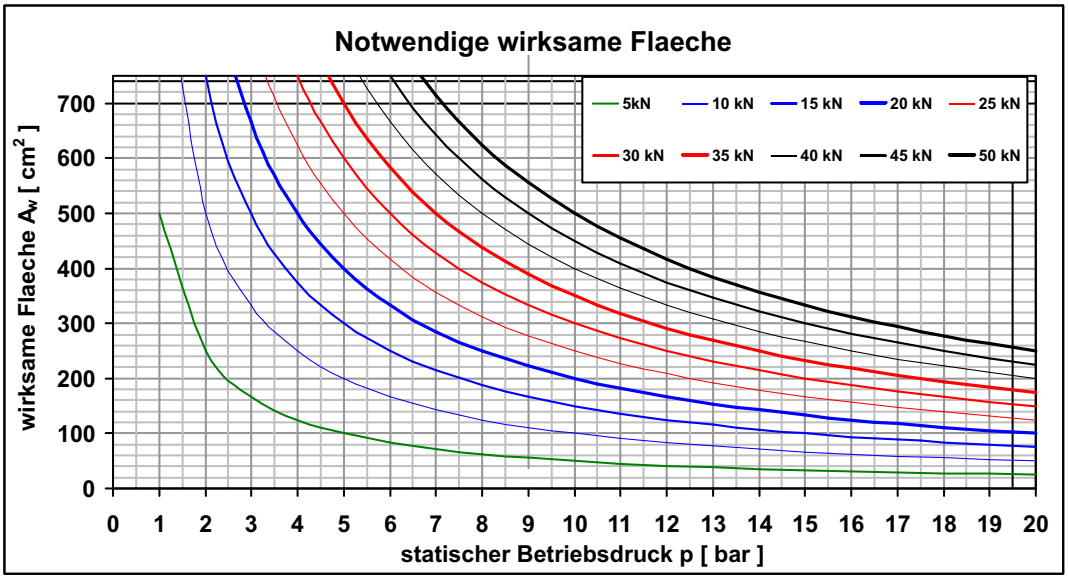


Diagramm 28: wirksame Fläche als Funktion des Betriebsdrucks mit der Federkraft als Parameter

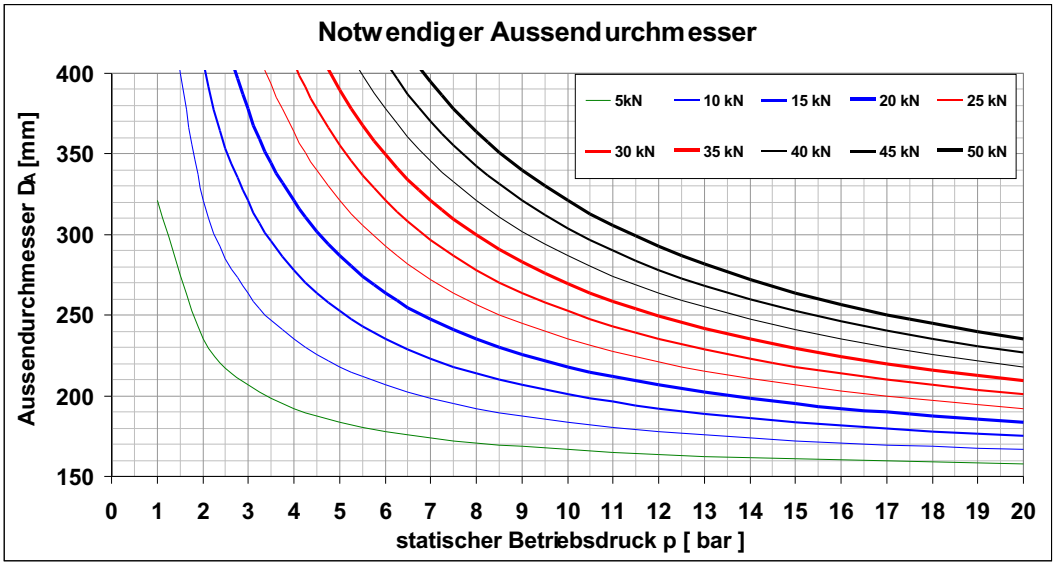


Diagramm 29: Aussendurchmesser als Funktion des Betriebsdrucks mit der Federkraft als Parameter

höheren als den bisher üblichen Betriebsdruck zu konstruieren, und sich damit nicht unerheblichen Problemen aussetzt, sollte man sich im Klaren sein bis wieweit eine Druckerhöhung überhaupt lohnend ist.

Es geht darum, wie bereits erwähnt, auf kleinerem Raum eine höhere Feder- oder Hubkraft zu realisieren.

Kraft ist das Produkt aus Druck und Fläche.
In einem Diagramm, in dem man auf der Y Achse die wirksame Fläche und auf der X Achse den statischen Betriebsdruck aufträgt, sind Linien gleicher Kraft Hyperbeln, die asymptotisch auf die Diagrammachsen zulaufen.
In Diagramm 28 ist dieser Zusammenhang dargestellt. Es wird deutlich, dass ab einem Druck von etwa 13 bis 15 bar keine nennenswerte Verkleinerung der wirksamen Fläche mehr zu erreichen ist. Um das Ganze anschaulicher zu machen, ist in Diagramm 29 die wirksame Fläche durch den Außendurchmesser ersetzt. Der Zusammenhang zwischen Außendurchmesser und wirksamer Fläche ist dem auf empirisch ermittelten Werten basierenden Diagramm 12 in Abschnitt 3.1.1 entnommen.

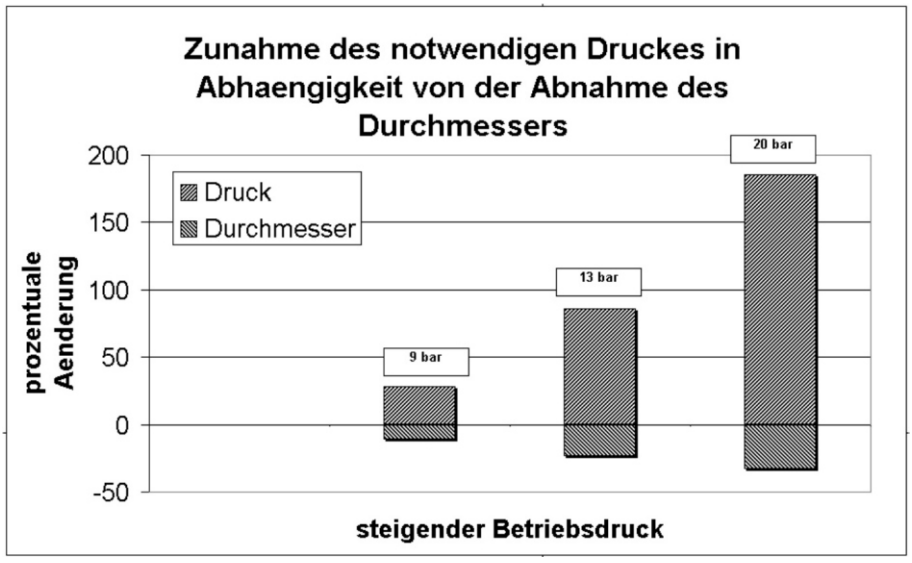


Diagramm 30: Druckzunahme und Durchmesserabnahme

Diagramm 30 macht dieses am Beispiel einer typischen Lkw-Hinterachsluftfeder mit einer Tragfähigkeit von 30 kN bei 7 bar, wie sie durch die mittlere rote Linie in den Diagrammen 28 und 29 dargestellt ist, besonders deutlich.
Erhöht man den Betriebsdruck von 7 bar um 29% auf 9 bar - man befindet sich damit immer noch innerhalb der heutigen Anwendungsgrenzen - so verringert sich der Durchmesser nur um 11 % von 296 auf 264 mm.
Eine weitere Druckerhöhung auf 13 bar (zusätzliche 86 %) verringert den Durchmesser nur noch auf 229 mm. Das sind nur 23 % weniger als der ursprüngliche Wert bei 7 bar.
Treibt man die Sache noch weiter und erhöht den Druck sogar um 186 % auf 20 bar, so verringert sich der Durchmesser durch diese Maßnahme nur noch um 32 % auf rund 200 mm.
Erwähnt sei an dieser Stelle, dass es sich hier um ein Rechenbeispiel handelt. Der

Zusammenhang zwischen wirksamer Fläche und Aussendurchmesser wurde dem bereits erwähnten Diagramm 12 entnommen. In diesem Diagramm sind die Werte für Außendurchmesser, wirksamen- und Kolbendurchmesser von ausgeführten Luftfedern in Abhängigkeit von der wirksamen Fläche dargestellt.
Vergrößert oder verkleinert man z.B. den Kolbendurchmesser, so ergeben sich vom Beispiel abweichende Werte. Diese werden jedoch in der Realität eher noch ungünstiger werden, da je kleiner der Durchmesser einer Luftfeder wird, desto kleiner muss auch der Kolbendurchmesser im Verhältnis zum Außendurchmesser werden. Das Material in der Rollfalte wird in zwei Richtungen verformt. Um den Kolben herum und vom Außen- auf den Kolbendurchmesser.

7.2 Vor und Nachteile

Hochdruckluftfedern haben hauptsächlich **einen** Vorteil, der jedoch eine Reihe von Nachteilen, die im Folgenden näher beschrieben werden, ausgleichen kann.

Der Vorteile ist der geringere Raumbedarf.
Im Abschnitt 2.4.3 wurde gesagt, dass eine Luftfeder so ausgelegt sein soll, dass sie überwiegend im oberen Druckbereich des Kennfeldes betrieben wird. Hochdruckluftfedern arbeiten in einem Druckbereich in dem die Verhärtung bei niedrigen Drücken nicht zum tragen kommt. Dieses mag ein weitere Vorteil sein.

Die Entwicklung von Hochdruckluftfedern wurde lange Zeit nur halbherzig und nicht auf aktuelle Projekte bezogen, betrieben.
Ein Fahrzeughersteller, der aus Platzgründen eine kleiner bauende Luftfedern mit höherem Druck verwenden möchte, muß hier entwicklungsseitig mit zwei Zulieferern zusammenarbeiten.
Auf der einen Seite ist der Bremsgerätehersteller, der eine Druckluftversorgungsanlage mit höherer Kapazität zur Verfügung stellen muss. Diese fängt an beim Kompressor selbst, der einen höheren Druck erzeugen muss und hört bei den Leitungen, die diesem Druck einschließlich der dynamischen Druckspitzen standhalten müssen, nicht auf.

Der Luftfederhersteller muss sich für die Luftfederbälge nach Materialien und Fertigungsverfahren , die für hochbeanspruchte Produkte mit kleineren Abmessungen geeignet sind, umsehen.

Aus diesen Gründen war immer ungewiss, ob eine solche Entwicklung Zukunft haben würde. Der Luftfederhersteller konnte sich immer darauf berufen,dass die Bremsgerätehersteller keine geeignete Druckluftversorgung im Programm hätten.
Beim Bremsgerätehersteller war die Situation ähnlich. Die Luftfederhersteller hatten keine Nutzfahrzeugluftfedern für Drücke über 10 bar im Fertigungsprogramm.

6.2.2 Spannung in der Balgwand

Geht man davon aus, dass man bei bestehenden Konstruktionsprinzipien - z. B. einer Lkw- oder Busluftfederung mit vier Luftfedern an der Antriebsachse - die bestehenden Federn gegen solche mit kleinerem Durchmesser ersetzen will, so ändert dieses die von der einzelnen Feder zu tragende Kraft nicht solange die Achslast nicht erhöht wird. Mit einer Erhöhung der zulässigen Achslasten im Bereich der Straßenverkehrszulassungsordnung ist jedoch vorerst nicht zu rechnen.
Man kann daher davon ausgehen, dass das Produkt aus Druck und Fläche konstant bleibt. Nehmen wir vereinfachen die Balgwand als homogenes aus einem Material bestehendes Gebilde an, so kann man in erster Näherung die Änderung der Spannung in der Balgwand

mittels der Kesselformel abschätzen.

für die Spannung in Längsrichtung gilt:

$$\sigma = p (D_i + s) / 2s$$

Geht man weiterhin davon aus, dass die Balgwand klein gegenüber dem Durchmesser ist, und ersetzt den Durchmesser durch die Fläche, so ergibt sich:

$$\sigma \sim p (4 A / \pi)^{0,5}$$

Da die Balgwand natürlich ein homogenes Gefüge hat sondern aus in elastomerem Material eingebetteten Fäden besteht macht es keinen Sinn hier den Zahlenwert einer Materialspannung zu errechnen. Um die Materialbeanspruchung abschätzen zu können, muss man die Fadenkräfte wie in Abschnitt 3.4 beschrieben berechnen.
Die Kräfte in der in der Balgwand ändern sich nicht linear mit dem Druck, da das Produkt aus Druck und Fläche konstant bleibt und die Fläche sich mit der zweiten Potenz des Durchmessers ändert.

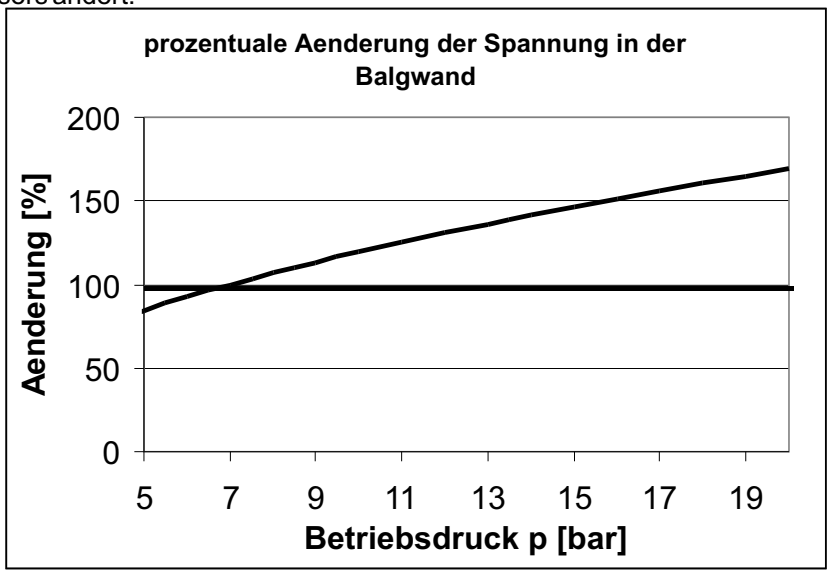


Diagramm 31: prozentuale Aenderung der Spannung in der Balgwand

In Diagramm 31 ist die Spannung in der Balgwand einer Luftfeder, die 30 kN bei 7 bar trägt, wie im vorherigen Beispiel verwendet, zu 100 % gesetzt worden. Bleibt die Federkraft konstant, nimmt die Materialbeanspruchung degressiv mit dem Druck zu.
In dem Druckbereich, in dem eine Druckerhöhung sinnvoll ist, nimmt die Spannung in einem Maße zu, welches auch mit den bisher eingesetzten Werkstoffen und Fertigungsverfahren unter Umständen noch beherrschbar ist, wenn ein ausreichend großes Zusatzvolumen angeschlossen ist um die dynamischen Druckspitzen nicht zu groß werden zu lassen. Verdoppelt man den Druck von 7 auf 14 bar, so nimmt die Spannung nur um den Faktor Wurzel aus zwei oder 41 % zu. Der Durchmesser einer solchen Luftfeder wird bei etwa 220 mm liegen. Mit solchen Werten kommt man natürlich an die Grenzen der derzeit

verwendeten Materialien.
Das Beispiel zeigt allerdings, dass eine moderate Steigerung des Betriebsdrucks über die derzeitigen Anwendungsgrenzen hinweg, die derzeit bei etwa neun bis zehn bar liegen, noch nicht in jedem Fall höherfeste Materialien notwendig macht. Man muss hierbei allerdings beachten, dass die durch den statischen Betriebsdruck erzeugte Fadenkraft näher an die Fadenkraft herankommt, die eine bleibende Verformung des Fadens verursacht. Inwieweit hier Langzeiteffekte zu erwarten sind, hängt nicht zuletzt von der Art des Einsatzes des betreffenden Fahrzeugs ab. Langes Stehen in beladenem Zustand wirkt sich hier sicherlich schädlicher aus als wechselnde Beladungszustände und Abstellen im unbeladenen Zustand.

Bisher sind wir davon ausgegangen, dass die von der Luftfeder zu tragende Kraft konstant bleibt.
An der Hinterachse des Atego-Leicht Lkw verwendet DaimlerChrysler eine Variante der Vorderachsluftfeder des Actros Lkw. Die Achsführung gleicht vom Prinzip her der des Actros mit Dreiecklenker und Stabilenker. (vgl. Abschnitt 6.2) Zwischen Achse und Feder gibt es keine Übersetzung. Die Federn tragen die Achslast abzüglich des Eigengewichts der Achse. Dieses Konstruktionsprinzip wird beim Atego allerdings nur bei Achslasten angewandt, die in der Größenordnung der Vorderachslast des Actros liegen. Daher werden die Luftfedern hier auch nicht höher beansprucht als an der Actros Vorderachse.

Würde man dieses Prinzip- zwei statt vier Luftfedern- allerdings auf eine 11,5 to Achse übertragen, so ergibt sich eine völlig neue Situation. Diese Luftfedern müssen dann das Doppelte der bisherigen Last tragen.

Man kann sich zwei extreme Lösungsmöglichkeiten vorstellen, die Realisierung wird sicherlich irgendwo in der Mitte liegen.

a. Der Druck soll bleiben wie bisher, also maximal 7 bar.

b. Der Durchmesser soll nicht größer werden, also maximal 296 mm

Gehen wir davon aus, dass solch eine Luftfeder mit Überlastreserve auf 55 kN ausgelegt wird.
Soll Forderung a. erfüllt werden, so ergibt sich ein Außendurchmesser von ungefähr 420 mm.
Ein Durchmesser von 296 mm gemäß Forderung b. würde einen Druck von rund 13 bar erfordern.

Gehen wir davon aus, dass wir für alle im Beispiel verwandten Luftfedern die heute gängigen Festigkeitsträger verwenden wollen.
Eine geeignete Methode, die Realisierbarkeit zu überprüfen, ist das Diagramm “ Fadenkraft” und “Fadendichte”. Zusätzlich sollte man in das Fadenkraftdiagramm den höchsten dynamisch erreichten Druck eintragen.

Im Folgenden werden 3 Luftfeder miteinander verglichen.

1. Derzeitiger Stand der Technik 30 kN bei 7 bar
2. Hochdruckluftfeder 30 kN bei 13 bar
3. Hochdruckluftfeder 55 kN bei 13 bar

In der folgenden Tabelle sind die für die Rechnung benötigten Daten zusammengestellt.

	1	2	3	
Betriebsdruck	7	13	13	bar
Tragfähigkeit	30	30	55	kN
Einbauhöhe	310	310	310	mm
Einfederweg	90	90	90	mm
Ausfederweg	200	200	200	mm
Aussendurchmesser	296	221	295	mm
Kolbendurchmesser	200	152	200	cm^3
Kolbenvolumen	5000	2800	5000	cm^3
erreichter Spitzendruck	10,6	20,0	19,7	bar

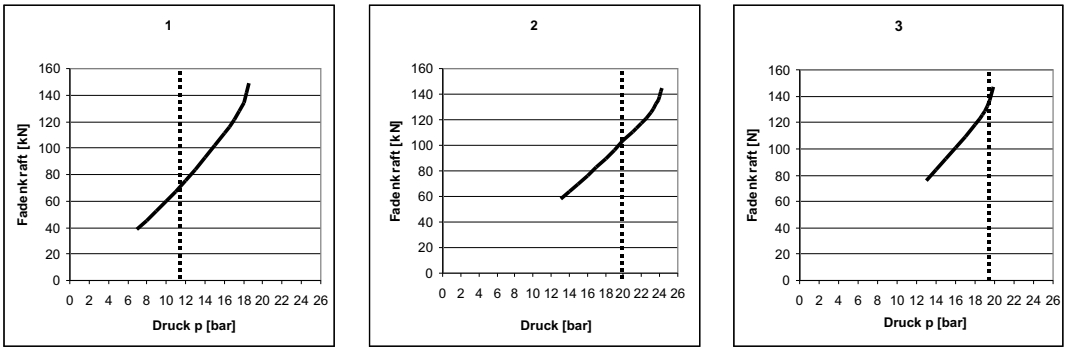


Diagramm 32: Fadenkräfte bei verschiedenen Auslegungen

In Diagramm 32 sind die drei Luftfedern aus den vorhergehenden Beispielen anhand der Fadenkraftdiagramme miteinander verglichen. Der Durchmesser der Wickeltrommel wurde so gewählt, dass bei allen drei Bälgen im Betrieb die Fadendichte annähernd gleich ist. Bei der konventionellen Auslegung, die im linken Diagramm 1 dargestellt ist, liegt der durch die gestrichelte Linie dargestellte dynamische Spitzendruck weit unterhalb des Bereichs, in dem eine bleibende Verformung des Fadens eintritt. (siehe auch Abschnitt 3. Nachrechnung der Festigkeit) Eine solche Auslegung ist was die Berstgefahr angeht, recht gutmütig gegenüber Fertigungsfehlern. Entsteht bei der Konfektion des Rohlings eine nicht homogene Fadendichte, so ist trotzdem eine ausreichende Reserve vorhanden. Das mittlere Diagramm stellt eine Hochdruckluftfeder dar, die von ihren Eigenschaften her die konventionelle substituieren soll. Sie ist genauso auf eine Nenntragfähigkeit von 30kN ausgelegt. Diese trägt sie allerdings nicht bei 7 sondern bei 13 bar. Bei einem Betriebsdruck von 13 bar liegt der bei Federungsvorgängen erreichte dynamische Spitzendruck natürlich auch höher nämlich bei 20 bar. Auch hier ist bei gleichbleibend hoher Fertigungsqualität, die eine homogene Fadendichte garantiert, nicht mit der Gefahr des Berstens zu rechnen. Der dynamische Spitzendruck liegt immer noch unterhalb des Bereichs, in dem eine bleibende Längung des Fadens eintritt. Auch bei Luftfedern konventioneller Auslegung werden beim Einfedern Fadenkräfte dieser Größenordnung erreicht, wenn im Kolben kein Zusatzvolumen angeschlossen vorhanden ist. Was sich über der konventionellen Auslegung jedoch unterscheidet, ist die Fadenkraft im Stillstand. Sie liegt mit 60 N um rund 50% über der Luftfeder mit einem Nenndruck von 7 bar. Es liegen noch keine ausreichenden Erfahrungen vor, ob auf solch niedrigem Kraftniveau bereits Langzeiteffekte durch Kriechen des Materials zu erwarten sind.
Die Luftfeder im dritten Beispiel ist ebenfalls für 13 bar, allerdings für eine Tragfähigkeit von

55 kN ausgelegt. Hier wirkt sich der größere Durchmesser jedoch soweit aus, das eine solche Luftfeder mit herkömmlichen Festigkeitsträgern nicht mehr zu realisieren ist.

Hochdruckluftfedern sind höher beansprucht als konventionelle auch wenn nicht unbedingt erheblich höhere Fadenkräfte im Festigkeitsträger die größte Gefahr darstellen. Hierzu muss man sich den Mechanismus, der zum Versagen des Materials in der Balgwand führt vor Augen führen.
Die Balgwand besteht aus in elastomeres Material (Gummi) eingebetteten Polyamid oder Polyesterfäden. Die Haftung zwischen Gummi und Faden wird beansprucht durch die unterschiedlichen Fadenkräfte in dem Teil der Balgwand, der auf dem Aussendurchmesser liegt und dem Teil, der auf dem Kolbendurchmesser liegt. Die Kraft in den Fäden auf dem größeren Durchmesser ist natürlich auch die größere Kraft. Man kann sich dieses so vorstellen, als wenn die Differenzkraft zwischen diesen Kräften den Faden aus der Balgwand herausziehen will. In der Berührungsfläche zwischen Fadenoberfläche und Gummi herrscht also ständig eine schwellende Spannung.
Das typische Ausfallbild, welches auf Lebensdauerprüfmaschinen erzeugt wird, ist eine Lösung der Gummilage vom Gewebe. Es kann hier zu etwa handtellergroßen Ablösungen kommen bevor der Luftfederbalg durch Undichtigkeit ausfällt und die Prüfmaschine automatisch abschaltet. Im Fahrbetrieb wird dieses Schadenbild relativ selten erzeugt. (vgl. hierzu auch Abschnitt 9. Typische Schäden an Luftfedern.) Grund zur Bildung solcher Lagenlösungen ist Luft, die durch die innere Gummilage hindurchdiffundiert und in einen oder mehrere Gewebefäden eindringt. Der Faden löst sich dann mehr und mehr vom Gewebe. Im praktischen Fahrbetrieb wechseln sich meist beladene Fahrzustände mit Leerfahrten bei niedrigem Betriebsdruck ab. Während dieser Zeiten kann unter höherem Druck eindiffundierte Luft zurückfließen. Der Grund warum die auf Lebensdauerprüfständen erzeugte Lagenlösung in der Realität selten vorkommt. Bei sog. Hochdruckluftfedern liegt jedoch das gesamte Druckniveau auch bei Leerfahrt erheblich höher. Bei Prüfstandsversuchen tritt das beschriebene Ausfallbild wesentlich eher und häufiger als bei mit moderatem Druck betriebenen Luftfedern auf. Es ist daher zu erwarten, dass Lagenlösung auch in der Praxis bei Hochdruckluftfedern häufigerer Ausfallgrund sein wird, wenn keine besonderen Vorkehrungen getroffen werden um Diffusion in das Gewebe zu verhindern.
Eine wirksame Gegenmaßnahme ist z.B. eine geeignete Vulkanisationskontur, die enge Radien und damit ein Durchschrumpfen von Fäden durch die innere Gummischicht vermeidet. In Fäden, die sehr wenig vom Gummi bedeckt sind, kann natürlich leichter Luft eindringen als in solche, die durch eine ausreichend Gummischicht bedeckt sind. Eine Innere Gummischicht aus luftdichterem Material wie Butylrubber ist auch denkbar.
Da die Dimensionen bei Hochdruckluftfedern kleiner sind als bei Luftfedern mit den heute üblichen Drücken um sieben bar sollte man die innere Gummilage nicht generell dicker machen. Die Balgwand sollte eher proportional mit den anderen Abmessungen dünner werden.

Ein zylindrischer Gürtel aus Blech oder gummiertem Gewebe, der in eingebautem Zustand den Außendurchmesser des Balges bedeckt, kann die oben beschriebe Lagenlösung recht wirksam verhindern. Der Gürtel übt auf die Balgwand einen Gegendruck aus, Blasenbildung und Lagenlösung verhindert. Wirksam sein kann der Gürtel natürlich nur in dem Bereich, in dem er die Balgwand berührt. In den den Abschluss der Rollfalte bildenden beiden Viertelkreisen kann sich weiterhin, wenn sich hier eine Schwachstelle befindet, eine Lagenlösung bilden. Mit solch einem Gürtel wurden auf einem Lebensdauerprüfsatand bis zu 9 Millionen Lastwechsel erreicht. Normal sind hier je nach Produkt 2 bis 5 Millionen Lastwechsel.
Ein weiterer Nachteil eines solchen Gürtels ist seine Länge. In Konstruktionslage der

Luftfeder muss er bis zum unteren Ende der Rollfalte reichen. Das bedeutet auf der anderen Seite, dass sich sein unterer Rand beim Einfedern bis unter die Kolbenaufstandsfläche bewegt. Es wird also mehr Bauhöhe erforderlich sein. Abgesehen davon lässt sich solch ein mehr oder weniger starrer Gürtel nur schwer auf dem Außendurchmesser des Luftfederbalges befestigen. In drucklosem Zustand nimmt der Luftfederbalg je nach Alter annähernd seinen Vulkanisationsdurchmesser an. Dieser liegt aber deutlich unter dem Durchmesser im druckbeaufschlagten Zustand, auf den der Durchmesser des Gürtels abgestimmt sein muss. Weiterhin muss man sich dessen bewusst sein, dass die Gefahr der Lagenlösung nicht eliminiert sondern nur verringert wird. Die den unteren Abschluß der Rollfalte bildenden beiden Viertelkreise sind weiterhin ungeschützt.

Der gleiche Druck, der innerhalb der Luftfeder herrscht, besteht auch zwischen Kolben und Balgwand. Mit der Zeit verrostet die Kolbenoberfläche, er kommt mit Öl vom Motor oder Getriebe oder Fett von der Gelenkwelle in Berührung. Alles dieses fördert eine mehr oder weniger dicke Schmutzschicht auf dem Kolben. In diesen Schmutz sind oft feste Körper in Form von Sandkörnern eingebettet. Diese Fremdkörper werden jetzt, wenn sie sich zwischen Balg und Kolben befinden, mit dem erhöhten Innendruck auf die äußere Balgwand gepresst. Abmessungen von ein bis zwei Millimetern können bei entsprechend scharfkantiger Gestalt des Fremdkörpers die obere Gummischicht durchdringen und einzelne Fäden verletzen. Die so geschwächten Fäden reißen dann bei niedrigeren Fadenkräften, was wiederum eine Ursache für ein Bersten des Balges sein kann.
Bei Luftfederbälgen, die auf einem Versuchsfahrzeug mit einem Betriebsdruck von rund zehn bar betrieben wurden, hat man an geborstenen Bälge solche eingedrungenen Fremdkörper gefunden. Der hier verwandte Kolben war nicht zylindrisch, sondern war in der Mitte eingeschnürt und unten weit ausgestellt um die Kennlinie entsprechend zu beeinflussen. Auf der unteren Ausstellung des Kolbens konnte sich wegen der stark geneigten Wand natürlich besonders leicht Schmutz ansammeln. Auf diesen Bereich des Kolbens trifft dann die Rollfalte beim Einfedern mit dem noch über dem Betriebsdruck liegenden dynamischen Druck auf.

Luftfedern im Lkw dienen meistens nicht nur zum Abfedern des Aufbaus sondern auch zum Aufnehmen und Absetzen von Wechselpritschen. Damit der Aufbau in akzeptabler Zeit gehoben werden kann, muss nicht nur das Vorratsvolumen groß genug sein, sondern auch das Druckgefälle gegenüber dem statischen Betriebsdruck der Luftfeder muss einen ausreichend schnellen Überstromvorgang ermöglichen. In heutigen Lkw ist ein Vorratsdruck von 12 bar üblich, an den Kupplungshahnen zum Anhänger stehen rund acht bar zur Verfügung. Lkw Luftfedern werden daher für einen Betriebsdruck von unter sieben bis maximal neun bar ausgelegt. Für eine Hochdruckluftfeder mit einem Betriebsdruck von 13 bar sollte der Vorratsdruck darum etwa 18 bis 24 bar betragen um wieder gleiche Verhältnisse zu schaffen.
Bei solchen Drücken lässt sich die zum Heben erforderliche Energie natürlich auf kleinem Raum unterbringen. Auf der anderen Seite nimmt der mit der Luft angesaugte Wasseranteil einen prozentual höheren Raum ein, da Wasser ja nicht kompressibel ist.

Wie man sieht, geht man ein gewisses Entwicklungsrisiko ein, wenn man plant Luftfedern mit oberhalb der derzeitigen Anwendungsgrenzen liegendem Betriebsdruck zu verwenden. Es wird jedoch sicherlich Einsatzfälle geben, die wegen des Vorteils des kleineren Einbaudurchmessers und der damit verbundenen möglichen breiteren Federspur diese Risiken aufwiegen.
Auch lässt sich mit zwei statt vier Luftfedern an einer Lkw Hinterachse, die dann wahrscheinlich sowohl vom Betriebsdruck als auch von den Abmessungen über dem heutigen Standard liegen, ein Kostenvorteil erzielen.

7 Anwendungsbeispiele

7.1 Luftfedern für Lkw und Sattelzugmaschinen

Luftfedern werden in Fahrzeugen zur Güterbeförderung nicht nur zum Tragen des Aufbaus verwandt. Um den Komfort von Fahrer und Beifahrer zu erhöhen, kann die gesamte Fahrerkabine auf Luftfedern gelagert sein. Auch Fahrer und Beifahrersitz können Luftgefedert sein. Die hierfür verwandten Luftfedern sind von ihren Dimensionen her sehr viel kleiner als jene, die die Achslast tragen. Meistens handelt es sich hierbei um sogenannte Schlauchrollbälge, die mittels Spannringen mit dem Abrollkolben und der oberen Befestigungsplatteverbunden sind. Es ist jedoch ungewöhnlich, dass ein Fahrzeug gleichzeitig mit einer luftgefederten Vorderachse, einer Fahrerhausluftfederung und einer Sitzluftfeder geordert wird. Eine solche Kombination würde kaum den Fahrkomfort erhöhen.
Im Rahmen dieses Buches soll jedoch nur von den Luftfedern an den Achsen die Rede sein.
Am häufigsten werden Luftfedern an den Antriebsachsen von Sattelzugmaschinen und Lastkraftwagen eingesetzt. Blatt und Parabelfedern sind hier weitgehend verdrängt worden. Während in der Vergangenheit Lkw Baureihen als blattgefederte Fahrzeuge konstruiert wurden und Luftfederungen gegen Aufpreis als Sonderausstattung angeboten wurden, sind moderne Lkw von vorne herein als luftgefederte Fahrzeuge konzipiert. Wie im Folgenden am Beispiel der Actros Baureihe von DaimlerChrysler gezeigt wird, sind moderne luftgefederte Achsaufhängungen auch nicht mehr schwerer als an Blatt- oder Parabelfedern geführte Achsen.
Luftfedern sind an allen Achsen eines Nutzfahrzeugs wie der Vorder-, Vorlauf-, Antriebs- und Nachlaufachse möglich. Am meisten durchgesetzt haben sie sich jedoch an der Antriebsachse. Grund hierfür ist in erster Linie, dass der Gesetzgeber gemäß § 34 “Achslasten und Gewichte” der Straßenverkehrszulassungsordnung bei mehr als dreiachsigen Fahrzeugen der hinteren Doppelachse 19 statt 18 to Achslast zugesteht, sofern die Antriebsachse luftgefedert ist. Das zulässige Gesamtgewicht des Fahrzeugs erhöht sich damit von 25 auf 26 to. (siehe hierzu auch Abschnitt 5.5.2) Begründet wird dieser Vorteil seitens des Gesetzgebers damit, dass luftgefederte Achsen die tragenden Schichten der Straßen weniger beanspruchen. Damit verlängern sich die Intervalle, nach denen an den Straßen die typischen durch schwere Nutzfahrzeugachsen verursachten Schäden, wie z.B. Spurrillen, repariert werden müssen.
Was den Straßenbelag schont, kommt natürlich auch der Ladung zugute. Spediteure, die Verladern garantieren, dass ihre Waren nur auf luftfgefederten Fahrzeugen transportiert werden, haben ihren Konkurrenten gegenüber einen Wettbewerbsvorteil. Manche Verlader schreiben dieses für empfindliche Güter sogar vor. Auch Fahrzeugaufbauten wie Aluminiumkipper und Tanks leiden bei Leerfahrt unter den durch unebene Fahrbahnen verursachten Stößen. Luftfedern mit ihrer sich auf den Beladungszustand einstellenden Federrate vermeiden dieses.
Mit einer luftgefederten Hinterachse lässt sich das Ende der Ladefläche an verschieden Rampenhöhen anpassen und während des Be- oder Entladevorgangs konstant halten. Wechselpritschenfahrzeuge sind ohne Luftfedern nicht darstellbar.
Anders als bei Anhängerachsen sind bei getriebenen Fahrzeugen die Luftfedern ohne Übersetzung direkt auf der Achse montiert. Das bedeutet, dass sie die gleichen Wege machen wie die Achse selbst und die gesamte Achslast abzüglich des Eigengewichts der Achse zu tragen haben.
An der Antriebsachse mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 11,5 to sind deshalb üblicherweise 4 Luftfedern montiert, die je nach Eigengewicht der Achse etwa 26 bis 28 kN tragen müssen.
Mit den bei Nutzfahrzeugen üblichen 22,5 Zoll Reifen lassen an den übrigen Einzelbereiften Achsen rund 8 to Achslast realisieren. Die Summe der Achslasten ist häufig höher als das

zulässige Gesamtgewicht des Fahrzeugs. Man legt das deshalb so aus, um Lasten mit unterschiedlicher Schwerpunktlage transportieren zu können. Bei einem Fahrzeug, bei dem die Summe der Achslasten genau dem zulässigen Gesamtgewicht entspricht, würde die Vorderachse überlastet, wenn man von der maximal zulässigen Zuladung, bei der diese Achslasten erreicht werden etwas ablädt, was sich hinter der Hinterachse befindet. Die Luftfedern der einzelbereiften Achsen wie Vorder-, Vorlauf-, und Nachlaufachse sind daher für eine Traglast von 34 bis 36 kN ausgelegt.
Der Gesamtfederweg beträgt etwa 300 mm, von den ein knappes Drittel als Einfederweg und der Rest als Hubweg bei konstantem Druck genutzt wird. Lediglich bei ausschließlich zum Transport von voluminösen Gütern bestimmten Fahrzeugen ist der Gesamtfederweg auf etwa 200 mm reduziert. Hiervon werden dann ca. 60 mm als Einfederweg genutzt. Aufgrund ihres geringeren Volumen sind solche Federn auch härter.
Wie bereits in Abschnitt 4 “Bauarten” bereits erwähnt, wurde die Actros Baureihe von DaimlerChrysler von Anfang an als luftgefederte Fahrzeugbaureihe konzipiert. In Bild 52

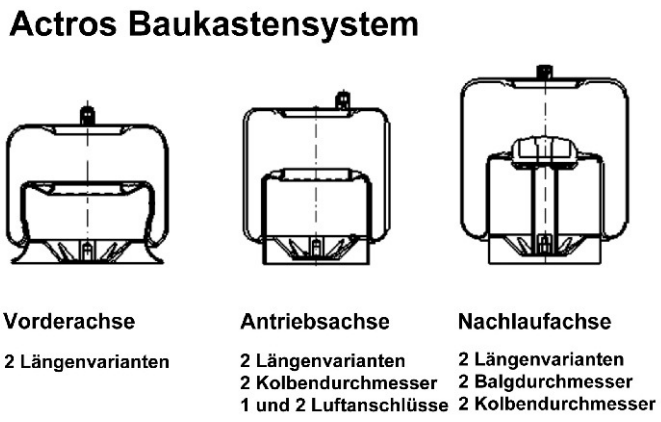


Bild 52: Actros Baukastensystem für Vorder-, Antriebs und Nachlaufachse

sind die drei Grundformen, aus denen das Baukastensystem hergeleitet ist, dargestellt.
An der Vorderachse befinden sich Luftfedern, deren Kolben sowohl oben als auch unten ausgestellt ist. Die untere Ausstellung verhindert, dass der Balg in drucklosem Zustand über das Kolbenende hinaus rollt. Direkt unter dem Kolbenrand schwenkt bei Lenkbewegungen der Betätigungszylinder für die Scheibenbremse hindurch. Wenn die Rollfalte über den unteren Rand des Kolbens hinausragt, wird sie von diesem abgeschert. Die obere Ausstellung des Kolben hat die gleiche Wirkung wie der bei der Vorgängerbaureihe, der “schweren Klasse” verwendete Abstützring aus Kunststoff. Dieser ist hier gleich in den Kolben mit integriert worden um mehr Hubvermögen zu erreichen. Die Wirkung einer solchen Kolbenform ist in Abschnitt 3.3 “Beeinflussung der Kennlinien” näher beschrieben. Es gibt diese Luftfeder in zwei Längenvarianten, für normale Ladehöhe und für die so genannten “Jumbofahrzeuge” mit niedrigerer Ladehöhe. Die Vorderachsluftfedern haben eine Nenntragfähigkeit von 32,5 kN bei 7 bar statischem Druck.
Von den Luftfedern für die Antriebsachse gibt es wieder zwei Längenvarianten mit zwei verschieden langen Bälgen und Kolben. Die Kolben sind zylindrisch und haben einen Durchmesser von entweder 190 oder 200 mm. Weitere Varianten kommen durch einen zusätzlichen Luftanschluss, der bei dreiachsigen Fahrzeugen als Aufnahme für einen Drucksensor dient, hinzu. Die beiden Luftfedern haben bei 7 bar eine Nenntragfähigkeit von

26kN und 27 kN. Die für die Nachlaufachsen vorgesehenen Luftfedern gibt es auch wieder in zwei Längen und zwei Durchmesservarianten. Die Kolben haben Durchmesser von 220 und 230 mm. Nur an der Nachlaufachse sind die mit eher Endanschlagcharakteristik ausgelegten Sekundärfedern innerhalb der Luftfedern angeordnet.Alle Luftfederbälge haben an ihrem oberen Ende eine einvulkanisierte Metallplatte durch die sie mit einer rahmenseitigen Platte verbunden werden. (siehe auch Abschnitt 4.2.4)
Es existieren noch weitere Varianten, mit denen aber eher Marktnischen bedient werden.

Außerhalb der Luftfedern angeordnete Sekundärfedern haben zwar den Nachteil eines etwas höheren Montageaufwands am Band. Der Vorteil liegt jedoch darin, dass man sie direkt dort anordnen kann, wo man den Einfederweg begrenzen will, nämlich zwischen Achsrohr und Rahmen. Hierbei braucht man auch auf die Bautoleranzen des Luftfederträgers keine Rücksicht zu nehmen und kann daher weiter einfedern ohne Gefahr zu laufen, dass Achsrohr und Rahmen sich berühren. Ein nicht unwesentlicher Vorteil ist es, dass die durch die Sekundärfeder aufgenommene Kraft nicht durch den Luftfederträger übertragen werden muss. Dieser kann jetzt weniger massiv und damit leichter ausgeführt werden. Nicht zuletzt lässt sich der Verschleißzustand der Sekundärfeder jederzeit leicht von außen kontrollieren.

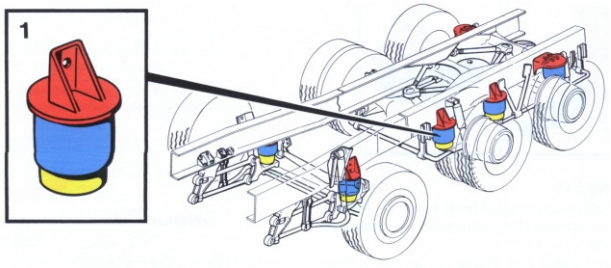


Bild 53: typische Anordnung der Luftfedern in einem Lkw oder Sattelzugmaschine Quelle: Volvo

An der Nachlaufachse war es wegen der Kinematik der Achsaufhängung mit neben dem Rahmen angebauten Luftfedern nicht möglich die Sekundärfeder außerhalb anzuordnen, da sie sowohl beim gleichsinnigen Einfedern als auch beim Wanken des Aufbaus zuerst in Eingriff kommen muss, bevor andere Fahrzeugteile sich berühren.

Die meisten Lkw und Sattelzugmaschinen sowie auch Busse haben an der Vorderachse zwei Luftfedern, an der Antriebsachse vier Luftfedern und an der Nachlaufachse wieder zwei Luftfedern. Bild 53 zeigt diese typische Anordnung am Beispiel eines Volvo Lkw Chassis. Die Vorderachse ist in Längsrichtung an je zwei parallelen übereinander liegenden Lenkerstangen mit beidseitigen Kugelköpfen geführt. Hiermit erreicht man, dass sich der Nachlauf der Achse nicht mit dem Federweg ändert. Vorderachsen, die nur an Längslenkern geführt werden sind selten und nur für langsam fahrende Fahrzeuge auf guter

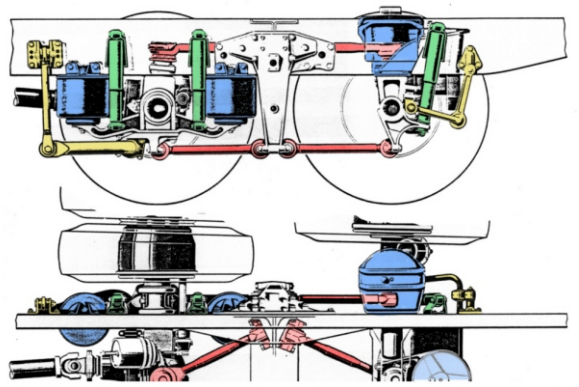


Bild 54: Antriebs und Nachlaufachse mit Luftfederung Quelle: DB

Fahrbahn geeignet. Da sich die Achse hier wie bei einer Anhängerachse auf einem Kreisbogen um einen Drehpunkt bewegt, wird der Nachlauf und damit das Rückstellmoment der Lenkung beim Einfedern kleiner und kann bei extremer Einfederung sogar zu Null werden. Eine solche Auslegung führt zu schlechtem Geradeauslauf auf unebener Fahrbahn.
In lateraler Richtung sind luftgefederte Vorderachsen meistens durch einen so genannten Panhardtstab geführt. Dieses ist eine Lenkerstange mit beidseitigen Kugelköpfen, die auf einer Seite mit der Achse, auf der anderen Seite mit dem Fahrgestellrahmen verbunden ist.
Die Vorderachse bewegt sich dabei, wenn man vorn vorne oder hinten auf das Fahrzeug sieht, auf einem Kreisbogen um den rahmenseitigen Anlenkpunkt des Panhardtstabes. Dabei bewegt sich die Achse bei Ein- und Ausfederbewegungen seitlich in einer Richtung aus der Fahrzeugmitte heraus. Da diese Bewegung unerwünschte Seitenkräfte im Reifenaufstandspunkt erzeugt, die sich wiederum auf die Lenkung auswirken, sollte der Panhardtstab so lang als möglich sein und in Fahrstellung waagerecht liegen um den seitlichen Versatz klein zu halten.
Die Hinterachsen sind bei den meisten Lkw Typen der europäischen Hersteller als Vierbalgluftfederung ausgeführt. Bild 54 zeigt dieses am Beispiel der “schweren Klasse” von DaimlerChrysler, die ab 1995 durch den Actros abgelöst wurde.
Die Last der Antriebsachse liegt auf vier Luftfedern (im Bild blau dargestellt), die der Nachlaufachse auf zweien. Die Sekundärfedern (Puffer) sind innerhalb der Luftfedern angebracht. An der Nachlaufachse ist zusätzlich in der Mitte ein sog. Liftbalg zum Anheben der Achse bei Leerfahrt angebracht. Im Bild 54 ist dieser in der Drausicht hellblau gekennzeichnet. Beide Achsen sind oben an Dreieckslenkern geführt, unten an parallel zum Dreieckslenker geführten Lenkerstangen. Der Dreieckslenker ist mit seiner Spitze oben auf der Achse befestigt, die beiden Schenkel gehen zu einem mitten zwischen den Achsen am Rahmen verschraubten Haltebock. Vom unteren Teil des Haltebocks geht je eine Lenkerstange nach vorne und hinten zur je einem Ausleger, der unterhalb der Antriebs- und Nachlaufachse angebracht ist. Der Dreiecklenker übernimmt die Kräfte in Seiten- und Längsrichtung, die unteren Lenkerstangen nur die Kräfte in Längsrichtung. Die Drehpunkte dieser Achsführungselemente (im Bild rot dargestellt) bilden ein Parallelogramm. Beim Ein- und Ausfedern bewegen sich die Achsen neben der Auf- und Ab Bewegung nur geringfügig nach vorn und hinten. Der Winkel der Eingangswelle der Antriebswelle zum Rahmen bleibt daher immer gleich. In den Kreuzgelenken tritt bei diesem Konstruktionsprinzip kein das Material belastender Gelenkfehler auf.

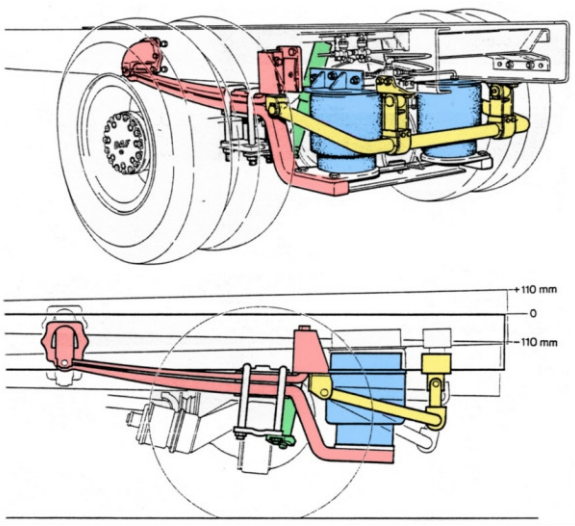


Bild 55: Lkw Hinterachse mit Zweibalgluftfederung

An beiden Achsen ist zur Verminderung des Wankwinkels ein Bügelstabilisator angebracht, der wegen der kleineren Federspur und der höheren Achslast an der Antriebsachse wesentlich kräftiger ausgeführt ist. Pro Luftfeder ist an beiden Achsen ein hydraulisch wirkender Stoßdämpfer vorhanden. An der Antriebsachse also vier und an der Nachlaufachse zwei.

Ein von den europäischen Nutzfahrzeugherstellen seltener gewähltes Konstruktionsprinzip ist am Beispiel eines älteren DAF Fahrzeugs in Bild 55 gezeigt. Auch hier sind zur besseren Kenntlichmachung die als Achsführungselemente dienenden Lenkerfedern rot und die Luftfedern blau dargestellt. Die Lenkerfedern übernehmen sowohl Längs- als Seitenkräfte. Das Ende des oberen Blattes der Lenkerfeder stützt sich seitlich an einem am Rahmen befestigten Gleitstück ab. Die Luftfedern sind auf dem längeren Hebelarm am Ende der Lenkerfedern angebracht. Am Ende sind die Lenkerfedern mittels einer Traverse verbunden, die es ermöglicht, dass die Luftfedern nicht mittig auf den Lenkerfedern angebracht sind. Die Federspur wird hierdurch allerdings sehr klein. Dieses erfordert einen ausreichen dimensionierten Bügelstabilisator. (gelb gekennzeichnet) Durch die Übersetzung müssen die Federn nicht die gesamte Achslast tragen, dafür aber einen längeren Weg machen. Die auf das Rad bezogene Federrate ist hierdurch um den Wert der Übersetzung in der zweiten Potenz größer als die Federrate der Luftfeder. Die Federn müssen also deutlich “weicher” aus gelegt sein als bei der eingangs beschriebenen Vierbalgluftfederung. In Abschnitt 5.2 “Übersetzung zwischen Rad und Feder” sind diese Zusammenhänge näher beschrieben. Es ergibt sich hierbei der Zielkonflikt, dass, um die Luftfeder “weich” auszulegen, das Volumen vergrößert werden muss, auf der anderen Seite beim Heben und Senken aber möglichst wenig Luft verbraucht werden soll. Durch die Anordnung auf dem längeren Hebelarm muss die Luftfeder einen größeren Weg durchlaufen. Üblicherweise kommt sie zum Ende des Hubes in den Bereich, in dem die Hebekurve abfällt weil die Rollfalte vom Kolben abhebt. In diesem Fall muss zum weiteren Heben nicht nur Volumen nachgefüllt werden, sondern auch noch der Druck erhöht werden. Da sich die Achse bei Federbewegungen um die vorderen Anlenkpunkte der Lenkerfedern dreht, ändert sich beim Federn auch ständig der Winkel der Eingangswelle der Antriebsachse gegenüber dem Rahmen. Hieraus resultiert ein Gelenkfehler in den Kreuzgelenken. In den USA wird diese Konstruktionsprinzip sehr häufig angewandt. Allerdings sind dort auch die Radstände der dort gängigen Haubenfahrzeuge meist länger und damit der Betrag des Gelenkfehlers kleiner.

Die Luftfederung des Actros und Atego

Wie bereits mehrfach erwähnt wurden Actros und Atego als luftgefederte Fahrzeuge konzipiert. Hierdurch ist es gelungen, gegenüber dem Vorläufer des Actros, der “schweren Klasse” nicht nur Gewicht einzusparen, sondern auch die Luftfederung ohne Aufpreis anbieten zu können. Laut Verkaufshandbuch war die Hinterachsluftfederung 85 kg schwerer als die Stahlfederung und auch 7500,- DM teurer.

Möglich wurde dieses durch ein konsequentes Baukastensystem und die Einführung eines im Nutzfahrzeugbau neuen Bauteils, des so genannten “Stabilenkers”. In diesem Bauteil sind die Funktion der unteren Lenkerstangen der Vierbalgluftfederung und des Bügelstabilisators miteinander vereint.

Es handelt sich hierbei um zwei Rechteckprofile, die an der gleichen Stelle angeordnet sind wie sonst die unteren Lenkerstangen. Sie sind an ihrem vorderen Ende unten mit einem am Rahmen verschraubten Haltebock gelenkig verbunden und hinten mit der Achse. Das Profil ist in vertikaler Richtung sehr biegesteif. In lateraler Richtung ist es weniger biegesteif und torsionsweich. Am achsseitigem Ende sind die beiden Profile untereinander mit einem Torsionsrohr verbunden, welches die Funktion der Basis eines Bügelstabilisators übernimmt.

Für jede Achse ist ein eigener Haltebock vorgesehen. Antriebs und Nachlaufachse sind nicht mehr über einen gemeinsamen mittigen Haltebock mit dem Rahmen verbunden. Beim Bremsen entstehen daher in den Achsführungselementen immer Zugkräfte, beim Beschleunigen werden sie auf Knickung beansprucht. Das System von zwei Luftfedern an Vorder-, Vorlauf- und Nachlaufachse und vier Luftfedern an der Antriebsachse ist mit Ausnahme der Hinterachse des leichten Atego beibehalten worden.

Vorderachse:
Bild 56 zeigt die Vorderachse des Actros, mit einer Parallelführung bestehend aus zwei oberen Lenkerstangen und dem "Stabilenker". Um noch mehr Wankstabilität zu erreichen, sind die Luftfedern nicht unter den Rahmenlängsträgern angeordnet, sondern seitlich damit die Federspur größer wird. Die hierbei in den Rahmen eingeleiteten Torsionsmomente werden durch einen bogenförmigen hinter der Achse liegenden Querträger aufgenommen. Der Querträger geht unter dem Motor hindurch und nimmt an der rechten Seite die Befestigung eines Panhardtstabes zur Seitenführung der Achse auf. Die Achsaufhängung gibt es für das sog. Normalfahrzeug und für die Jumbofahrzeuge mit kürzeren Luftfedern und Stoßdämpfern.

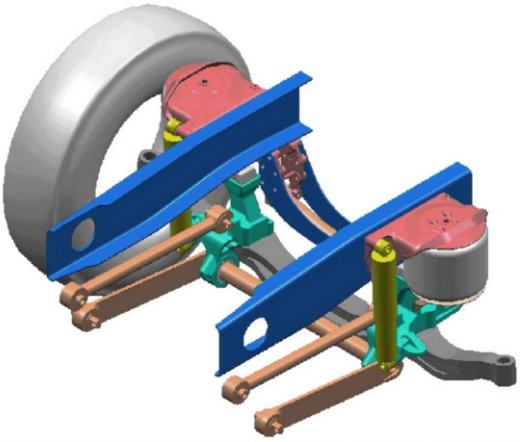


Bild 56: Vorderachse des Actros

Hinterachse:
In Bild 57 ist die Hinterachse des Actros dargestellt. Unter der Achse ist mit Spannschrauben der Luftfederträger befestigt. Auf ihm sind vor und hinter der Achse je zwei Luftfedern angeordnet. An seinem vorderen Ende nimmt er den Stabilenker auf. Die Stoßdämpfer sind zwischen Achskörper und vorderem Luftfederpaar eingebaut.
Die Seitenführung übernimmt ein Dreiecklenker, der rahmenseitig an einem Querträger gelagert ist, der auch die durch die Halteböcke verursachten Torsionsmomente aufnimmt.

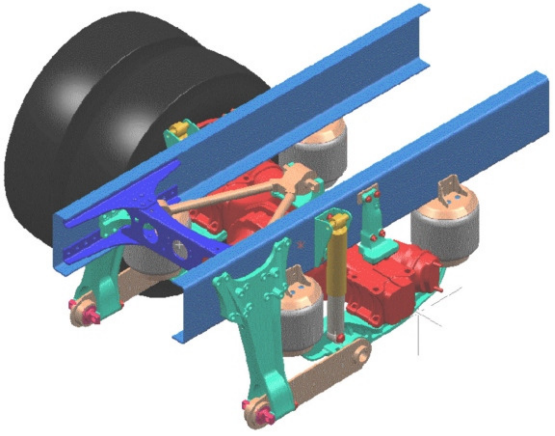


Bild 57: Hinterachse des Actros

Nachlaufachse:
Die Achsführung der Nachlaufachse ist vom Prinzip her die gleiche wie die der Antriebsachse. Entsprechend der geringeren Achslast sind die Halteböcke leichter ausgeführt. Zwei Luftfedern sind seitlich am Rahmen über der Achse angeordnet. Die Sekundärfedern befinden sich an der Nachlaufachse innerhalb der Luftfedern. Mittig hinter der Achse ist ein sog. Liftbalg angeordnet, um die Achse bei Leerfahrt anzuheben.

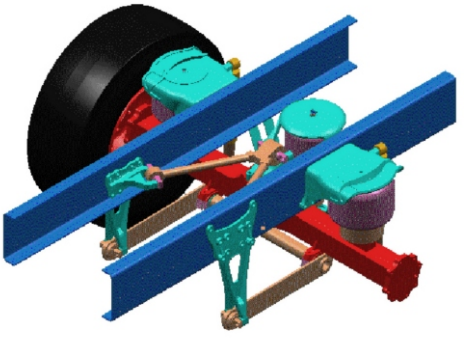


Bild 58: Nachlaufachse des Actros

Hinterachse des Atego

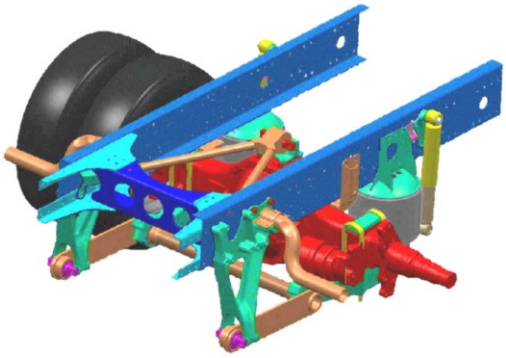


Bild 60: Die Hinterachse des Atego

Die Achsaufhängung der leichteren Ategofahrzeuge ist im Prinzip genauso aufgebaut wie die des Actros. Entsprechend der geringeren Achslast von bis zu 8 to sind nur zwei Luftfedern vorhanden. Es handelt sich hierbei um die gleichen Luftfedern wie sie an der Actros Vorderachse verbaut sind. Einziger Unterschied: Der Luftanschluss ist nicht wie bei der Vorderachse mittig angeordnet sondern seitlich. Bisher wurde hier zwischen einer Zweibalgluftfederung (gekennzeichnet durch die Führung der Achse an Längslenkern) und einer Vierbalgluftfederung (gekennzeichnet durch eine Parallelführung der Achse mittels Lenkerstangen und Dreiecklenker) unterschieden. Hier haben wir es mit einer neuen Variante zu tun. Die Achse wird an parallelen Lenkern und einem Dreiecklenker geführt, aber die Achslast wird nur durch zwei Luftfedern getragen. Eine Besonderheit ist hierbei, das die Achsführungselemente durch die asymmetrische Anordnung der Luftfedern auch bei stillstehendem Fahrzeug ständig unter Last stehen.

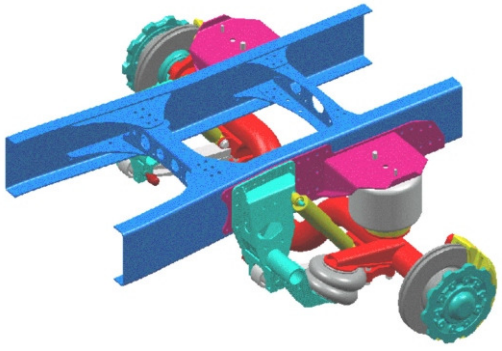


Bild 59: Vorlaufachse des Actros

Vorlaufachse

Nicht so recht ins Baukastensystem passt die Vorlaufachse. Sie kam erst hinzu nachdem die anderen Achsen konstruktiv fertig waren und wird vom amerikanischen Achshersteller Hendricksson zugekauft. Sie zeigt die typischen Merkmale einer Anhängerachse, wie die Führung an Längslenkern. Das als Rundprofil ausgeführte Achsrohr ist nach unten gekröpft um Platz für die Gelenkwelle zu schaffen. Bei Leerfahrt kann auch die Vorlaufachse angehoben werden. Der übliche Einbauort für einen Liftbalg steht hier allerdings wegen der Gelenkwelle nicht zur Verfügung. Vom Achsrohr geht daher ein Ausleger nach vorn, der sich auf einem Zweifaltenbalg abstützt. Dieser ist wiederum auf einem Ausleger des Haltebocks gelagert. Der Zweifaltenbalg muss dabei wie jeder andere Liftbalg bei am Boden rollender Achse die Federungsbewegungen mitmachen. Zweifaltenbälge sind hierfür besonders geeignet, weil sie nicht auf einem Kolben abrollen. Bei der Nachlaufachse des Actros und auch bei den meisten andern Lkw und Sattelzugmaschinen wird als Liftbalg die gleiche Luftfeder die zum Tragen der Achslast verwendet. Damit die Balgwände hier nicht bei beladenem Fahrzeug, wenn die Nachlaufachse mitträgt, aneinander scheuern, muss in dem Liftbalg ein gewisser Mindestdruck bleiben. Dieser Mindestdruck bewirkt eine Kraft, die der Kraft der beiden Luftfedern, die die Achslast tragen entgegenwirkt. Da das Achslastverhältnis durch die Dimensionierung der Luftfedern an Antriebs- und Nachlaufachse eingestellt wird, wirkt sich diese Kraft störend aus. Man wird immer bestrebt sein, keine zwei Luftfedervarianten an der Nachlaufachse einsetzen zu müssen. Eine für die Ausführung ohne Lifteinrichtung und eine mit Lifteinrichtung. Die notwendigen Unterschiede zwischen diesen beiden Varianten würden auch kaum außerhalb des Bereichs der Fertigungsstreuung liegen. Man sollte daher

bei der Auslegung der Luftfederkombination an Antriebs- und Nachlaufachse bereits beachten, dass es Varianten mit und ohne Lifteinrichtung gibt.

Vorderachse der Volvo Lkw und Sattelzumaschinen.
Bei Volvo hat man seit Anfang der Achtziger Jahre sukzessive damit angefangen, Rollbälge mit Dichtkonen gegen solche mit oberer Bördelplatte zu ersetzen. Begonnen hat man damit

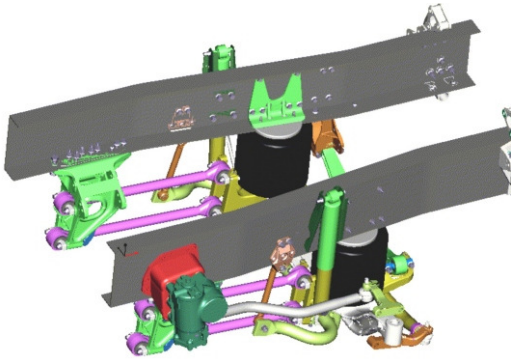


Bild 60: Vorderachse der Volvo Lkw und

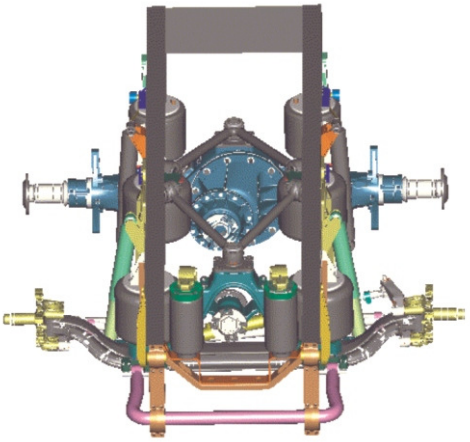


Bild 61: Anordnung der Liftbälge seitlich von der Gelenkwelle

mit der in Bild 60 gezeigten Vorderachse. Die Bördelplatte hat eine Versteifungssicke und ist mit zwei Schraubbolzen, die durch den Rahmenuntergurt gehen, direkt mit diesem verschraubt. Der Rahmen ist an dieser Stelle durch ein Einlageblech von innen verstärkt. In Längsrichtung ist die Achse an je zwei übereinander liegenden Lenkerstangen, deren Gelenke ein Parallelogramm bilden, geführt. Beim Ein- und Ausfedern entsteht daher keine Nachlaufänderung, die den Geradeauslauf beeinträchtigen könnte. Seitlich geführt wird die Achse durch einen hinter der Achse liegenden Panhardtstab. Zur Wankstabilisierung dient ein in Fahrtrichtung vor der Achse liegender Bügelstabilisator.

Im Vergleich zu, der Vorderachse in Bild 56 ist hier der Stabilisator ein getrenntes Bauteil, während dort untere Lenkerstange und Bügelstabilisator in dem so genannten Stabilenker zusammen gefaßt sind.

Vorlauf und Antriebsachse

Die Bilder 61 und 62 zeigen die Vorlauf- und Antriebsachse eines Volvo Lkw. Die Vorlaufachse ist sowohl lenkbar als auch bei Leerfahrt anzuheben. Das Anheben bei Leerfahrt bringt bei einer lenkbaren Vorlaufachse natürlich nicht den gleichen Einspareffekt wie bei einer nicht gelenkten Nachlaufachse, da durch die Lenkung der Schräglauf und damit auch der Reifenverschleiß kleiner ist.

Beide Achsen sind durch untere Lenkerstangen und je einen Dreiecklenker, die über einen mittigen Haltebock mit dem Fahrgestellrahmen verbunden sind, geführt. Zur Wankstabilisierung hat jede Achse einen zusätzlichen Bügelstabilisator. An der

Antriebsachse sind zwei unterschiedlich große Luftfedern verbaut. Die in Fahrtrichtung vorne liegenden sind größer im Durchmesser und nehmen damit eine höhere Kraft auf. Die hinter der Achse angebrachten sind kleiner. Damit um die Achse keine Momente entstehen, die die Achsführungselemente auch bei stehendem Fahrzeug belasten, hat der unter der Achse angebrachte Luftfederträger unterschiedliche lange Ausleger.

Bei der lenkbaren Vorlaufachse wird bei einem Linkslenker der Raum links neben dem Rahmen für das Lenkgestänge benötigt. Um die Achse bei Leerfahrt anheben zu können, sind wie in Bild 61 deutlich zu sehen die beiden Liftbälge innerhalb des Rahmen rechts und links der Gelenkwelle angeordnet. Wegen des beengten Raumes müssen diese Luftfedern sehr lang und schmal ausgeführt sein. Dieses bedingt einen vergleichsweise hohen Druck um die Achse gegen die oberen Endanschläge zu drücken.
Diese Luftfedern sind als Schlauchrollbälge mit Spannringen wie sie sonst bei sehr kleinen Luftfedern für Fahrersitze,Fahrerhäuser und Pkw verwandt werden, ausgeführt. Von ihren Dimensionen her liegen sie zwischen diesen beiden Kategorien.
In ausgefederten Zustand kann bei großem Längen- Durchmesserverhältnis leicht die Gefahr des Ausknickens bestehen.
Die obere Platte wurde daher so groß wie es fertigungstechnisch möglich ist ausgelegt. Auch hier besteht wieder der Zielkonflikt, dass in angehobenen Zustand der Achse möglichst viel Kraft verfügbar sein soll, um die Achse oben zu halten. Bei mittragender Achse soll diese Kraft so klein wie möglich sein. Aus diesem Grunde besteht der Abrollkolben aus zwei durch große Radien ineinander übergehenden zylindrischen Bereichen. Ausgefedert liegt die Rolffalte auf dem großem Kolbendurchmesser an um die Knicksicherheit zu erhöhen und um eine große wirksame Fläche zu zur Verfügung zu stellen. In eingefedertem Zustand liegt die Rollfalte dann auf einem deutlich kleinerem Kolbendurchmesser, der neben einer kleineren wirksamen Fläche auch das Abrollen bei kleinen Drücken begünstigt.

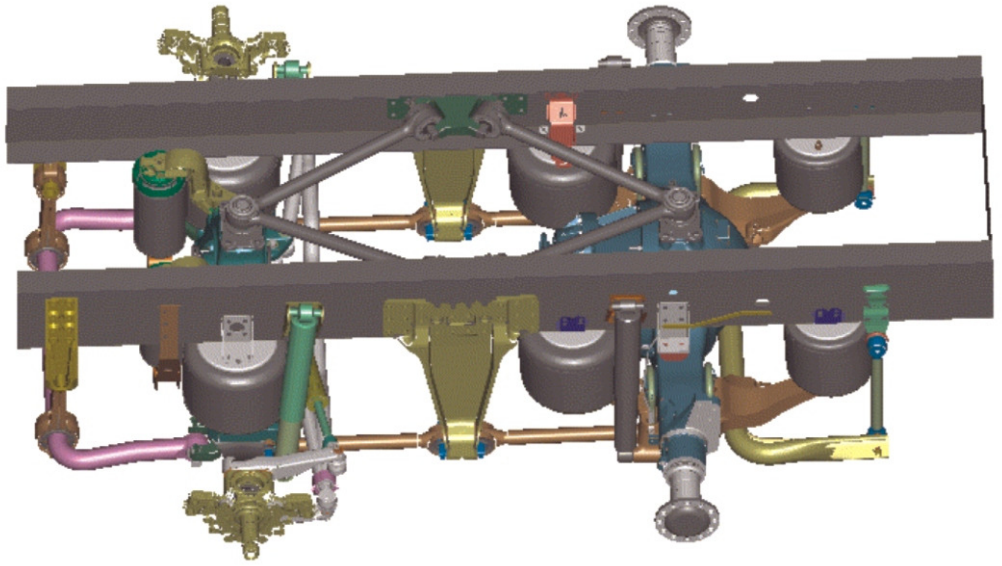


Bild 62: Vorlauf und Antribsachse der Volvo Lkw und Sattelzugmaschinen

7.2 Luftfedern für Reise- und Linienbusse

Seit Mitte der fünfziger Jahre setzt man in Fahrzeugen zur Personenbeförderung Luftfedern ein, um den Fahrkomfort zu verbessern. Angefangen hat man damals mit Pkw und Bussen. Während sich bei den Pkw die Luftfederung nicht durchsetzen konnte, (vgl. dazu Abschnitt 5.5.1) sind seit einigen Jahren alle neu gebauten Busse in Westeuropa und Nordamerika luftgefedert.
Ausgenommen hiervon sind Kleinbusse, die auf Transporterfahrgestellen basieren. Jedoch auch hier geht der Trend wie bei den Transportern zu Luftfedern, die als Sonderausstattung angeboten werden.
Während bei Lkw bisher mit wenigen Ausnahmen (Tatra) alle Achsen als Starrachsen ausgeführt sind, sind bei den für höhere Geschwindigkeiten ausgelegten Reisebussen, die Vorderachsen häufig als Einzelradaufhängung in Doppelquerlenkerbauweise ausgeführt.
Man unterscheidet drei Arten von Bussen:

Reisebusse mit zwei bis vier Achsen, für hohen Fahrkomfort und Reisegeschwindigkeit ausgelegt.

Mischbauweisen, für den Linienverkehr im ausserstädtischem Bereich oder für kürzere Reisen mit geringerem Komfortanspruch.

Linienbusse, meist als Zweiachser oder Gelenkbus, von der Geschwindigkeit für den Stadtverkehr ausgelegt.

Bild 63 zeigt eine vordere Einzelradaufhängung eines Reisebusses mit Doppelquerlenkern. Bild 64 zeigt die dazugehörige Hinterachse. An der Vorderachse befindet sich die Luftfeder auf der Plattform auf dem nach oben verlängerten Schwenklager. Man nutzt hier die vom Pkw bekannten Vorteile dieses Konstruktionsprinzips. Durch die Lage und Länge der Lenker lässt sich das die Höhe des Momentanzentrums beeinflussen und damit die Wanksteifigkeit verbessern. Auch das Einfedern der Vorderachse beim Bremsen (Bremsnicken) kann durch in der Seitenansicht schräg gestellte Lenker gemindert werden. Durch sehr kurze obere Lenker und lange untere Lenker wird bewirkt, dass das einfedernde und damit höher belastete kurvenäussere Rad negativen Sturz annimmt und damit höhere Seitenkräfte überträgt. Auch die den Reifenverschleiss beeinflussende Spurweitenänderung bei Federungsvorgängen lässt sich durch die Gestaltung der Lenker beeinflussen.

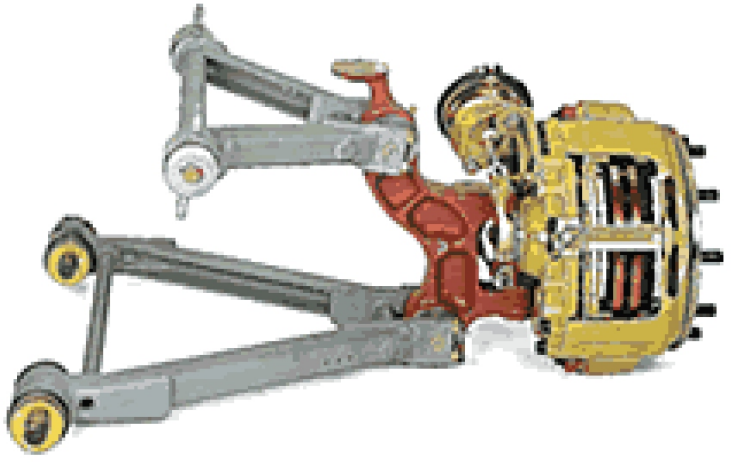


Bild 63 vordere Einzelradaufhängung eines Linienbusses
Quelle: EvoBus

Die Übersetzung zwischen Rad und Luftfeder beträgt damit 1:1. Da der obere Lenker kürzer ist als der

untere, bewegt sich der Luftfederkolben beim Ein- und Ausfedern nicht exakt auf einer Geraden, sondern auf einer Kreisbahn. Je grösser der Unterschied der Lenkerlängen, desto kleiner wird der Radius der Kreisbahn. Für Luftfedern mit hinterschnittenem Kolben (vgl. Abschnitt 3.3 “Beeinflussung der Kennlinien” bedeutet dieses, dass die Rollfalte auf der dem Drehpunkt zugewandten Seite schneller über den Kolben rollt als auf der dem Drehpunkt abgewandten Seite. Dieses bedeutet, dass sich ein Teil der Rollfalte bereits auf dem unteren Bereich des Kolbens befinden kann, in dem Der Durchmesser zunimmt, während sich der gegenüberliegende Teil noch im oberen, im Durchmesser abnehmenden Teil des Kolbens befindet. In solch einer Kinematik wird sich eine auf einem Hydropulser aufgenomme Kennlinie kaum darstellen lassen. Will man durch die Kolbenkontur die Kennlinie beeinflussen, so sollte diese durch Kraft/Weg Messungen in einer der Realität nachgestellten Kinematik auslegen. Es ist mit erhöhtem Versuchs- und Entwicklungsaufwand zu rechnen, will man die Wirkung einer hinterschnittenen Kolbenkontur bei einem Doppelquerlenker optimal für den Fahrkomfort nutzen.

Bild 64 Hinterachse eines Reisebusses Quelle: EvoBus

Während früher die typische Busluftfeder aus einem Rollbalg mit beidseitigen Dichtkonen und einem hinterschnittenem Kolben mit oder ohne Kolbenvolumen bestand, verwendet man heute wieder überwiegend zylindrische Kolben. Der Grund hierfür sind nicht unbedingt die niedrigeren Herstellkosten.

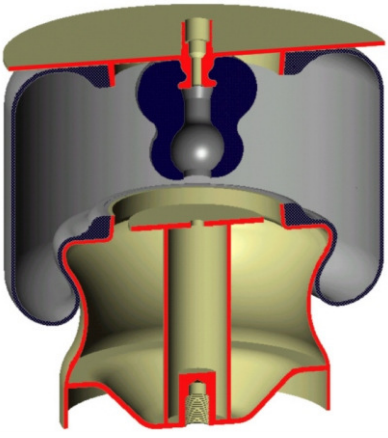


Bild 65 typische Busluftfeder mit hinterschnittenem Kolben

Bei Linienbussen legt man sehr großen Wert auf eine gleichmäßige und vor allem niedrige Einstiegshöhe, um den Fahrgästen schnelles und bequemes Ein- und Aussteigen zu ermöglichen.

Man senkt den Bus hierzu an der Bordsteinseite ab, indem man die Luftfedern auf dieser Seite entlüftet und hebt ihn durch Belüften der Luftfedern auf der gegenüberliegenden Seite an. Da die Federspur schmaler ist als die Fahrzeugbreite, senkt sich der Einstieg bis nahezu auf Borsteinniveau ab. Solch ein Kneeling genannter Vorgang verbraucht natürlich jedesmal viel Luft aus den Vorratsbehältern der Bremse und setzt eine leistungsfähige Druckluftversorgung voraus. Je niedriger der Einstieg ist, desto seltener sind Kneeling Vorgänge, z.B. um einem Rollstuhlfahrer den Einstieg zu ermöglichen, notwendig. Bei sehr niedriger Einstiegshöhe machen sich Änderungen jedoch um so mehr bemerkbar.

Die Einfederung der Reifen unter statischer Last variiert vom beladenen zum leeren Zustand um bis zu 40 mm. Diese Differenz lässt sich mit Hilfe der Luftfedern leicht ausgleichen, indem man den der Beladung proportionalen Druck in den Luftfedern als Kenngröße zur Höhenregelung benutzt.
Bei den für Busse typischen Luftfedern mit einem hinterschnittenem Kolben (Bild 65) ändert sich die wirksame Fläche mit der Einbauhöhe. Dieses bedeutet für gleiche Last bei unterschiedlicher Einbauhöhe unterschiedliche Drücke. Damit würde die lastabhängige Bremse falsch angesteuert.
Die Federrate ändert sich in jedem Fall mit der Einbauhöhe, da das Federvolumen sich ändert. Bei einem hinterschnittenem Kolben kommt noch die Änderung der wirksamen Fläche hinzu. Wird die Einbauhöhe bei leerem Fahrzeug um den Betrag der Reifenausfederung gegenüber dem beladenem Zustand abgesenkt, so kann die Rollfalte in dem Bereich des Kolbens zu liegen kommen, auf dem der Durchmesser und damit die wirksame Fläche ansteigt. Die Federrate wird dadurch wesentlich grösser als bei

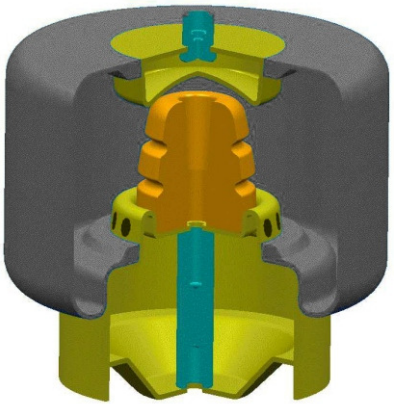


Bild 67 Busluftfeder mit zylindrischem Kolben

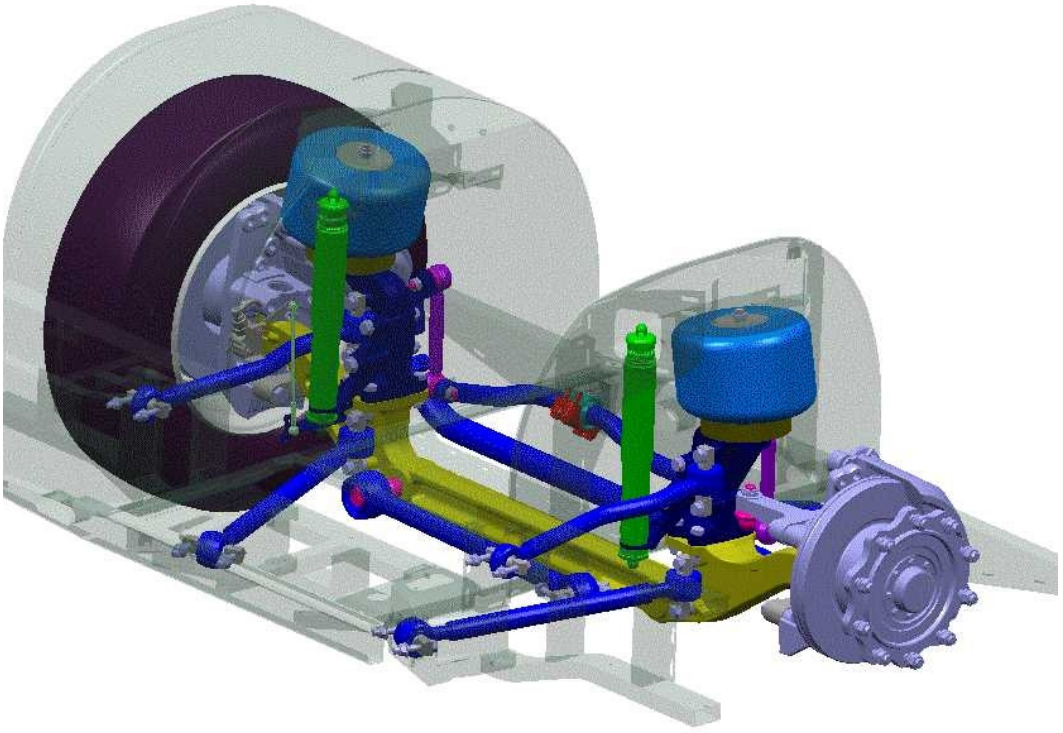
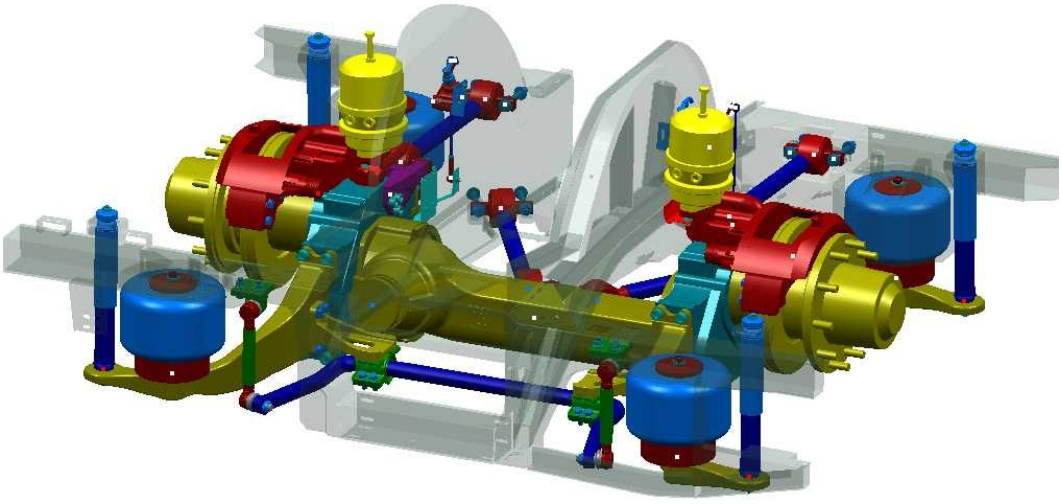


Bild 66 Vorderachse eines Linienbusses Quelle: EvoBus

einem zylindrischen Kolben und als konstruktiv vorgesehen. (vgl. Abschnitt 3.3.2 Kolbenkontur)
Um diese Nachteile zu vermeiden, setzt man in neueren Konstruktionen zylindrische Kolben mit angeschlossenem Kolbenvolumen ein. (siehe Bild 67)

Die Vorderachse eines modernen Linienbusses zeigt Bild 66. Die Achse ist als Starrachse ausgeführt und an parallelen Längslenkern geführt. Die Seitenführung erfolgt mit einem Panhardtstab. Der Achskörper weit nach unten durchgekröpft um den Fußboden des Busses so niedrig als möglich zu halten. Die Luftfedern sind mit Zwischenstücken oberhalb des Achskörpers angeordnet, so dass die beim Lenken bewegten Teile der Achse unter ihnen hindurchschwenken können.
Die Federspur sollte aus zweierlei Gründen so breit wie möglich sein. Sogenannte Niederflurbusse haben einen höheren Schwerpunkt als Busse mit herkömmlicher Bodenhöhe. Dieses kommt daher, dass Baugruppen, die sonst unterhalb der Sitze und unter dem Boden angeordnet sind, oberhalb des Fahrgastraumes eingebaut werden. So befindet sich z.B. bei gasbetriebenen Bussen der Gastank auf dem Dach des Busses.
Der Mittelgang zwischen den Sitzreihen sollte nach Möglichkeit so breit sein, dass ein Rollstuhlfahrer ihn passieren kann. Das die Breite des Ganges bestimmende Teil sind die Luftfedern, die zwischen den Reifen Platz finden müssen. Hier sind Luftfedern, die für höhere Betriebsdrücke ausgelegt sind, von Vorteil, da sie kleinere Aussendurchmesser ermöglichen. (vgl. Abschnitt 7 Hochdruckluftfedern)
Bild 68 zeigt die zum gleichen Bus gehörende Hinterachse. Die Achse ist im Prinzip genauso geführt wie bei Lkw mit Vierbalgluftfederung. Der Dreieckslenker ist jedoch unten angeordnet und die Querlenker oben, damit der Dreiecklenker nicht in den Mittelgang des Busse hineinragt. Aus dem gleichen Grund ist der Achskörper durchgekröpft und der Antrieb aussermittig angeordnet.



Billd 68 Hinterachse eines Linienbusses Quelle. EvoBus

7.3 Luftfedern für Anhänger

Luftgefederte Anhängerachsen unterscheiden sich sowohl bezüglich ihrer Achslast als auch von ihrem Konstruktionsprinzip her deutlich vom Lkw oder Busachsen. Beiden gemeinsam ist allerdings, dass es sich in beiden Fällen um Starrachsen handelt.
Bei Lkw und Bussen ist normalerweise der Fahrzeughersteller derjenige, der auch die Achse herstellt oder sie von einem Zulieferer, mit dem er vorher gemeinsam entwickelt hat, fertigen lässt. Ausnahmen gibt es bei nicht angetriebenen Vor- oder Nachlaufachsen. Solche Achsen werden von Lkw Herstellern zum Teil von auf die Entwicklung und Fertigung von Anhängerachsen spezialisierten Betrieben zugekauft.
Während das Zugfahrzeug ausschließlich von den großen Nutzfahrzeugherstellern gebaut wird, gibt es in Deutschland eine Vielzahl von kleinen und mittelständischen Unternehmen, die Lkw Aufbauten und Anhänger herstellen. Diese Betriebe haben meist keine große Fertigungstiefe solange es sich nicht um Spezialanhänger handelt. Geht man von einem üblichen Speditionsanhänger mit Plane oder Kofferaufbau aus, so liegt der überwiegende Teil des technischen Know Hows bei den Achsen.
Man unterscheidet bei Anhängern grundsätzlich zwei Bauarten. Sattelauflieger, die vorne auf einer Sattelzugmaschine aufliegen und hinten eine bis drei Achsen haben. Daneben gibt es Zugdeichselanhänger, deren Vorderachse über einen Drehschemel mit dem Fahrgestell verbunden ist. Hinten sind dann wieder eine bis zwei Achsen.

Ein Lkw hat eine gelenkte Vorderachse, eine angetriebene Hinterachse und evtl eine nicht angetriebene Vor- oder Nachlaufachse. Alle diese Achsen unterscheiden sich bezüglich ihrer Konstruktion deutlich voneinander.
Eine Anhängerachse kann dagegen sowohl unter einem Drehschemel als Vorderachse in einem Zugdeichselanhänger Verwendung finden als auch als einzelne Achse oder in einem Dreiachsaggregat. Bild 69 zeigt ein typisches Dreiachsaggregat eines Sattelaufliegers.

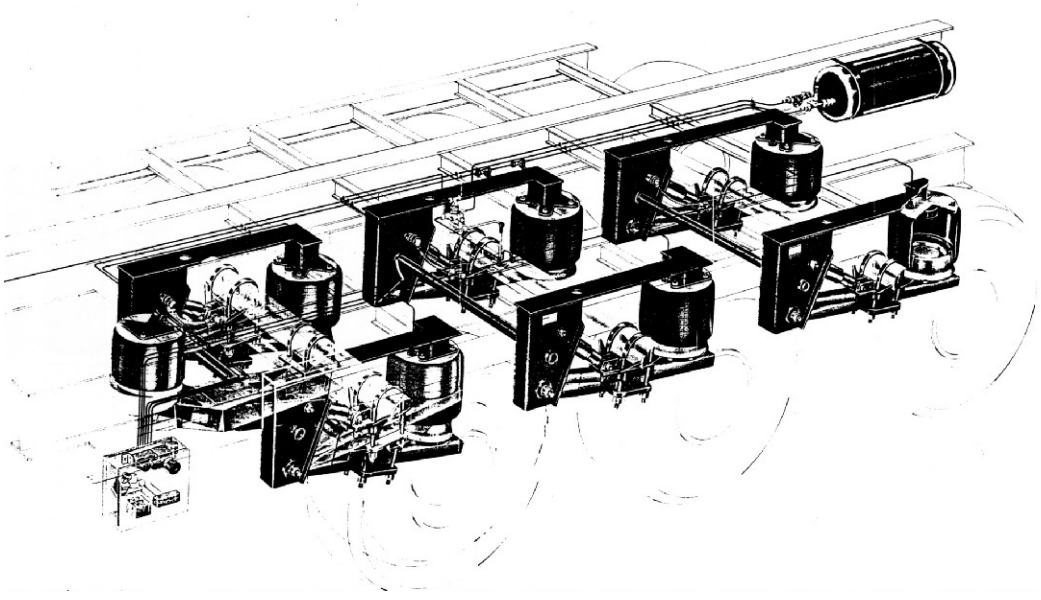


Bild 69: Dreiachsaggregat eines Sattelaufliegers

Neben dem eigentlichen Achsrohr mit der Radnabe, den Bremsen und den Rädern besteht ein Achsaggregat aus zwei Halteböcken, die bei Anhängern mit den Rahmenlängsträgern verschweißt werden, zwei Längstlenkern, zwei Stoßdämpfern und zwei Luftfedern. Am unteren Ende der Halteböcke sind die Längslenker drehbar gelagert. Die Achse ist mit den Längslenkern meist über Bridenschrauben fest verbunden. Die Stoßdämpfer sind unter einem recht flachen Winkel eingebaut, der ihre Wirksamkeit mindert. Am hinteren Ende der Längslenker befindet sich je eine Luftfeder, die sich unter dem Rahmenlängsträger abstützt. Anders als bei den meisten Lkw Achsen wird also nur ein Teil der Achslast von den Luftfedern getragen.
Die Achsen werden üblicherweise für eine Last von neun Tonnen bei Verwendung in einem Dreiachsaggregat bzw. zehn Tonnen für eine einzelne Achse ausgelegt. Das Druckniveau liegt unter dem im ziehenden Fahrzeug, da über den Kupplungshahn am Zugfahrzeug nur acht bar Vorratsdruck zur Verfügung stehen.

Da die Federspur schmaler ist als die Radspur, muss das Achsrohr biegesteif ausgeführt sein. Dieses hat zur Folge, das es auch torsionssteif ist.
Beim einseitigen Überfahren eines Hindernisses wird das Achsrohr daher auf Torsion beansprucht mit dem Resultat, das sich die Radlast auf der gegenüberliegenden Seite verringert. Die Wirkung ist wie bei einem sehr steif ausgelegten Bügelstabilisator. Auf diese Weise sind die Wankeigenschaften weitgehend unabhängig von der Federspur.
Anhänger, die mit solchen Achsen ausgerüstet sind, sind im allgemeinen sehr wankstabil. Man kann dieses erkennen, wenn man hinter einem Lkw mit Zugdeichselanhänger in einer langgezogenen Kurve fährt. Der Aufbau des Zugfahrzeugs lehnt sich weit mehr aus der Kurve heraus als der Anhänger.
Bei den bei Lkw üblichen Achsaufhängungen federn die kurvenäußeren Luftfedern der Fliehkraft entsprechen ein und die kurveninneren federn aus. Bei Anhängern ist dieses weit weniger der Fall. Der Momentanpol bei Wankbewegungen liegt bei Anhängerachsen nicht wie bei Lkw in Höhe der oberen Federbefestigung sondern etwa auf Fahrbahnhöhe. Der Abstand zwischen Schwerpunkt und Momentanpol und damit der Hebelarm der Fliehkraft wird natürlich auch größer.
Die Längslenker wurden früher meist aus Federstahl wie Blattfedern hergestellt. Heute geht man mehr zu Kastenprofilen aus Stahlblech über.
Einige Hersteller haben auch einige Zeit Einzelradaufhängungen wie in Bild 70 gezeigt hergestellt. Dieses Konstruktionsprinzip hat sich jedoch nicht in großem Umfang durchsetzen können. Da beide Achsseiten unabhängig voneinander federn können, ist die auf das Rad bezogene Federrate in jedem Fall kleiner, die Federung damit weicher. Man benötigt allerdings ein Niveauregelventil pro Seite, da sonst keine Federkraft entstehen kann, die den Aufbau nach Kurvenfahrt wieder in die senkrechte Lage bringt. Bei zylindrischen Kolben ist die wirksame Fläche der Luftfedern von der Ein- oder Ausfederung unabhängig. Sind die Federn der rechten und linken Fahrzeugseite miteinander verbunden, so ist auch der Druck und damit die Kräfte auf beiden Seiten gleich.

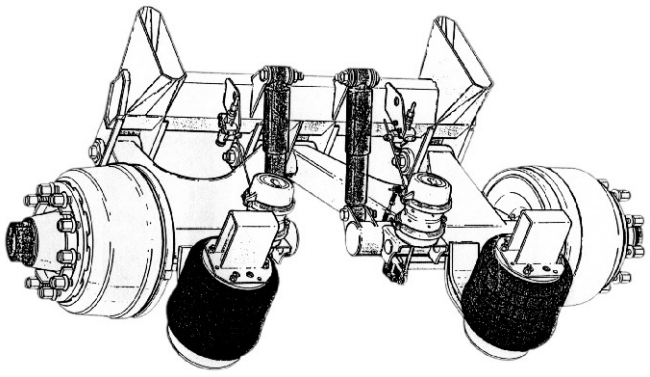


Bild 70: Anhängerachse mit Einzelradaufhängung

Auch ist der Reifenverschleiß bei Einzelradaufhängungen größer, da sich die Spurweite beim Ein- und Ausfedern ändert.

An Luftfedern in Anhängern werden häufig höhere Anforderungen gestellt als an Luftfedern

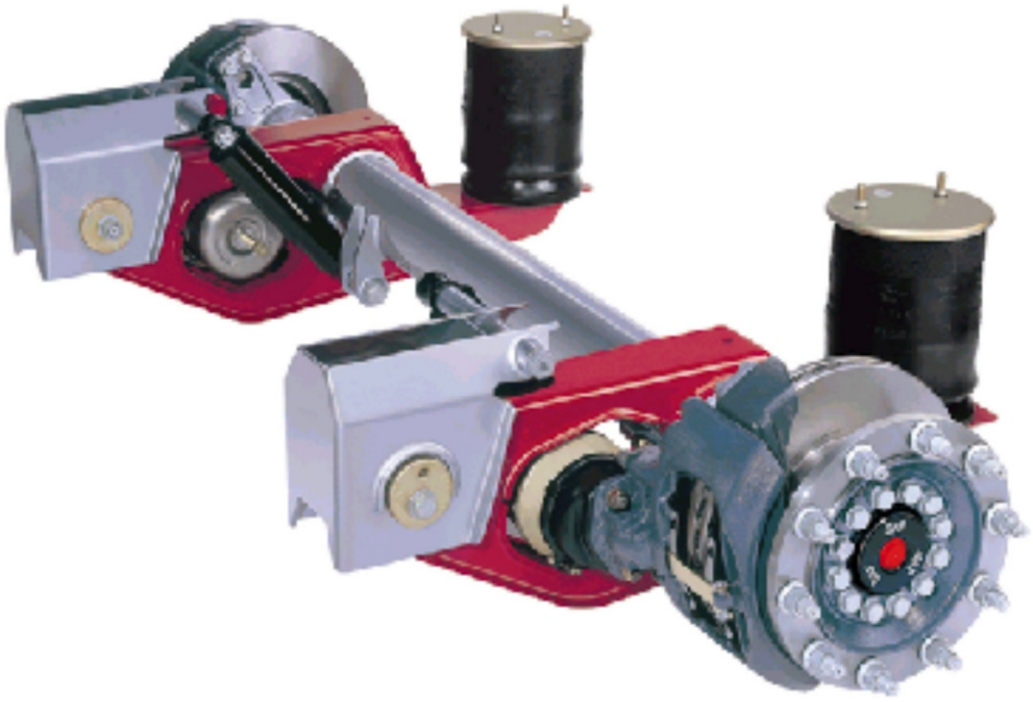


Bild 71: Anhängerachse mit Längslenker aus gepresstem Blech und Scheibenbremsen Quelle: SAF

für Lkw und Busse. Während Zugfahrzeuge häufig einem Fahrer zugeordnet sind, werden insbesondere Sattelauflieger oft von einer Zugmaschine zu einer Bahnverladestation oder zu einem Fährhafen gebracht. Beim Abstellen des Sattelaufliegers wird die Luft aus den Luftfedern abgelassen, damit man sicher sein kann, dass ein auf einem Schiff festgezurrter Auflieger sich nicht löst wenn die Luft aus den Federn wegen geringer Leckagen langsam entweicht. Die abgestellten Fahrzeuge werden von dann von Terminalschleppern auf das Fährschiff gezogen. Damit der Fahrer des Terminalschleppers nicht die Abstützung des Aufliegers hochkurbeln muss, haben solche Schlepper eine anhebbare Sattelkupplung. Damit wird der Auflieger vorne so hoch angehoben, dass die Abstützung ausreichenden Abstand zum Boden hat. Die erste Achse des Dreiachsaggregats hängt dabei meist an den Luftfedern, da die Stossdämpfer länger sind. Die zweite Achse rollt ohne Last und das Gewicht wird von der letzten Achse getragen. Hierbei besteht nicht die Gefahr, dass die Luftfedern bersten, da ja kein Druck vorhanden ist. Die Kolben müssen allerdings dafür ausgelegt sein die erhöhte Last zu tragen.
Der kritische Moment ist der, wenn der Sattelauflieger wieder abgesetzt wird. Die Luftfedern sind alle ohne Innendruck, die der vorderen Achse sind sogar auf Zug belastet. Der Absetzvorgang geht meist sehr schnell vonstatten, so dass sich beim Einfedern in dem

Luftfederbalg kein ausreichender Druck aufbauen kann, der den Außendurchmesser soweit vergrößert, dass der Balg wieder über den Kolben rollt. Mit dem Splitter®, einem speziell entwickelten System von Weweler , besteht die Gefahr, dass der Balg nicht richtig über den Kolben rollt nicht. Und so funktioniert es: Die obere Platte ist nicht fest mit dem Rahmenlängsträger verbunden. Fällt die Achse nach unten, wird diegesamte Luftfederung automatisch vom Chassis abgekoppelt. Wird sie beim Einfedern wieder in ihre ursprüngliche Position gebracht, rastet die obere Platte der Luftfeder wieder im Adapter ein.

Bild 72: Splitter® von Weweler: die gesamte Luftfeder bewegt sich bei der Verladung mit nach unten

Luftfederbälge, die für Anhängerachsen vorgesehen sind, werden daher meisten in Formen vulkanisiert, die einen vergleichsweise großen Durchmesser, zumindestens deutlich größer als der Kolbendurchmesser, haben. Da sich der Abrollkolben auf einem Kreisbogen um den Anlenkpunkt des Längslenkers bewegt, kann es zu einer Berührung der Balgwände innerhalb der Luftfeder kommen. Um zu vermeiden, dass hierdurch die Abrollbewegung behindert wird oder dass Scheuerstellen entstehen, werden die Luftfederbälge vor dem Zusammenbau häufig innen mit einem Gleitmittel eingesprüht. Mit zunehmendem Alter des Balges nimmt die Gefahr, dass sich die Balgwände bei niedrigem Druck innen berühren ab.

Der Balgdurchmesser im drucklosem Zustand nähert sich mit der Zeit dem Durchmesser unter Druck an.

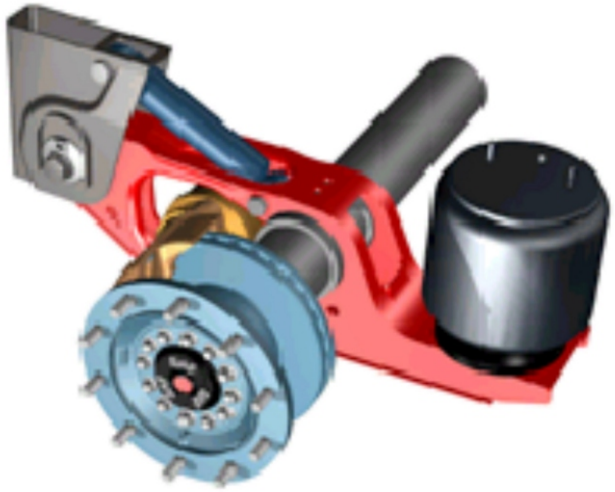


Bild 73: Variante des Längslenkers mit Aufnahme für das untere Stoßdämpferauge Quelle: SAF

Bezüglich der Produzierbarkeit und der Lebendauer des Produkts müssen hier oft Kompromisse eingegangen werden. Die Forderung nach einem Winkel von 45° im Vulkanisationszustand und nach großen Übergangsradien in der Balgwand um ein Durchschrumpfen von Fäden (stramme Fäden) zu vermeiden ist hier kaum zu erfüllen.

Bild 71 zeigt eine Anhängerachse neuerer Bauart mit aus Blech gepressten Längslenkern mit hoher Gestaltfestigkeit. Für die Bremszylinder der Scheibenbremsen sind Öffnungen vorgesehen. Der vordere Anlenkpunkt der Längslenker besteht aus einem

Gummielement, welches einen Teil der Achslast und die Seitenkräfte bei Kurvenfahrt aufnimmt. Die Stossdämpfer sind oben an der höchstmöglichen Stelle der Halteböcke gelagert. Von der Achse sind zwei Haltebleche nach unten geführt, die das untere Stoßdämpferauge aufnehmen. Die Längslenker bieten an ihrem rückwärtigen Ende eine ausreichend große Auflagefläche um auch Luftfedern mit Kunststoffkolben verwenden zu können. Das Achsaggregat baut sehr niedrig.

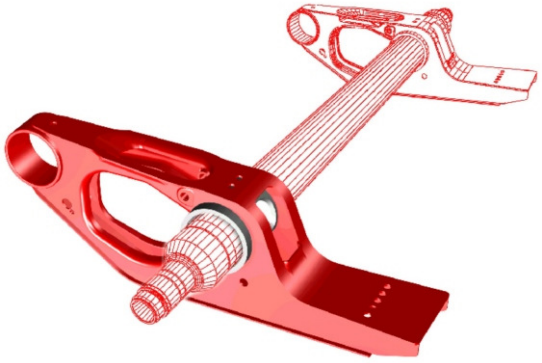


Bild 74: Aus Blech gepresster Längslenker
Quelle: SAF

Für Anhängerachsen werden für gewisse Anwendungen Luftfedern mit besonders großem Hub und damit entsprechender Bauhöhe benötigt.
Hier für gibt es mehrere Gründe:
Um voluminöse Güter zu transportieren, sollte die Ladefläche so niedrig wie möglich sein, um innerhalb des gesetzlichen Höhenlimits möglichst viel Laderaum zur Verfügung zu haben. Da solche Güter meistens nicht sehr schwer sind, sind für solche Fahrzeuge meistens kleinere Reifendimensionen möglich. Zum Be- und Entladen muss die Ladefläche jedoch an die auf Fahrzeuge mit normaler Ladehöhe abgestimmten Rampen angehoben werden.

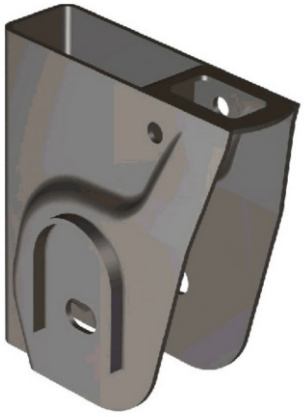


Bild 75: Haltebock
Quelle: SAF

Sattelauflieger, die für den kombinierten Verkehr mit der Bahn bestimmt sind, haben zum Teil am vorderen und hinteren Ende Verriegelungen, mit denen sie direkt auf Eisenbahndrehgestelle aufgesetzt werden können. Auf diese Weise können bis zu 60 Sattelauflieger zu einem Zug zusammengesetzt werden. Die Zugkräfte müssen allerdings durch den Rahmen des Aufliegers übertragen werden. Die Nutzlast verringert sich dadurch um ca. 1,5 to. Um eine Sattelauflieger auf die Drehgestelle aufzusetzen, benötigt man nur ein ebenerdiges überfahrbares Gleis. Mittels der Luftfedern wird das Heck soweit angehoben, dass es sich mit dem Drehgestell verriegeln lässt. Alle Achsen des Aufliegers sind als Liftachsen ausgeführt um sie anheben zu können so das genügen Freiraum zwischen Reifen und Schiene entsteht.
Spezialfahrzeuge wie z.B. Glasinnenlader senken sich zum Beladen ab und fahren unter die Last - in diesem Fall die Glaspalette. In diesem Fall liegt die Fahrhöhe kurz unter dem oberen Ende des Hubes. Die Luftfeder hat in dieser Stellung ein sehr großes Volumen und ist gegenüber Luftfedern mit üblichen Feder- und Hubwegen sehr weich.
In allen Fällen kann die notwendigen Hubhöhe aus der oder in die Fahrhöhe etwa 400 mm betragen.

Bild 76: Voderes Lager des Längslenkers
Quelle: SAF

8. Typische Schäden an Luftfedern

Luftfedern müssen, wie viele andere Fahrzeugteile auch, gelegentlich ersetzt werden. Sie entfernen sich hierbei auf zwei verschieden Arten von ihrem Neuzustand.

Auf der einen Seite kommt es zu durch die Abrollbewegungen der Balgwand zu einer Materialermüdung. Die Balgwand im unteren Teil der Rollfalte kommt abwechselnd auf dem Aussendurchmesser und dem Kolbendurchmesser zu liegen. Hierbei werden die Fadenrauten ständig dahingehend verformt, dass sich Winkel und Abstand zwischen den Fäden ändern. Insbesondere die Änderung des Abstands belastet die Haftung zwischen Faden und Gummimischung. Löst sich hierbei partiell ein Faden von der Gummimischung, so kann sich diese Stelle schnell vergrößern. Dieses ist insbesondere dann der Fall, wenn wegen eines zu dünnen Innengummis oder wegen Fertigungsfehlern Luft von innen in den Faden eindiffundieren kann. Je weiter solch ein Schaden fortschreitet, desto mehr können die Fäden aneinander reiben und sich gegenseitig beschädigen, bis es zum Bersten des Balges kommt.
Bei Fahrzeugen mit hoher jährlicher Laufleistung ist dieses häufig der Grund aus dem Luftfederbälge ersetzt werden müssen.

Gummi unterliegt wie die meisten künstlichen Werkstoffe einer Alterung, die durch äußere Einflüsse wie direkte Sonneneinstrahlung, Ozon, Wärme durch die Nähe des Motors oder Auspuffs, Reinigungs- und Schmiermittel beschleunigt wird. Die Balgwand wird dann hart und spröde (quantifizierbar durch die Shore Härte). Insbesondere im unteren Teil der Rollfalte, dem so genannten Rollbereich bilden sich dann sowohl innen als auch aussen Risse, die mit der Zeit grösser und tiefer werden. Je mehr das Material altert, umso härter, spröder und unflexibler wird es.
Im dynamisch am meisten beanspruchten Teil des Balges, der Rollfalte bilden sich dann Risse, die bis auf das Gewebe reichen können. Sichtbar sind diese Risse am deutlichsten im eingebauten Zustand des Balges unter Betriebsdruck. In das freiliegende Gewebe kann Wasser eindringen, was dem aus Polyamid oder Polyester bestehenden Fäden keinen direkten Schaden zufügen kann, da diese Materialien nicht verrotten.
Dringt jedoch mit dem Wasser zusammen Schmutz ein, so kann es innerhalb des Fadens zum Scheuern kommen. Dieses kann wiederum zum Bersten durch Reißen des Fadens führen. Treten Risse im Bereich der Rollfalte wie in den Bildern gezeigt auf, sollte der Balg abhängig von Einbauort und der Art des Fahrzeugeinsatzes bald ausgetauscht werden. Im Zweifel sollte man sich an die Angaben des Fahrzeugherstellers halten. Ein geborstener Luftfederbalg auf der Vorderachse eines Busses kann andere Folgen haben als bei Dreiachsaggregat eines Sattelaufliegers. Oft wird die Balgwand jedoch vorher undicht und die Luftfeder verliert Druck. Haben sich einmal Risse gebildet, werden diese meistens schnell größer.

Neben diesen beiden als “normaler Verschleiß” zu bezeichnenden Gründen einen Luftfederbalg zu wechseln, gibt es noch andere, die auf unsachgemäßer Behandlung beruhen, oder Folgeschäden anderer Defekte sind.

Wird am Niveauregelventil eine zu hohe Fahrhöhe eingestellt, so tritt am Luftfederbalg ein Defekt ein, der als Schlingenabriss bezeichnet wird. Das Gewebe ist platten- und kolbenseitig von innen um den Kern herumgeführt. Normalerweise wird eine Luftfeder so ausgelegt, dass die Rollfalte nur beim Heben und Senken, aber nicht bei dynamischen Federbewegungen vom Abrollkolben abhebt. Geschieht dieses, weil die Fahrhöhe zu hoch eingestellt oder der Balg falsch ausgelegt ist, so ist das Ende der Kernschlinge in ständiger

Bewegung. Im Bereich der Kernschlinge liegt das Gewebe vierfach, in der übrigen Balgwand doppelt. Durch den abrupten Übergang in der Flexibilität neigt die Kernschlinge dazu hier aufzugehen. Bei der Fertigung neigt man dazu, die Kernschlinge so lang als möglich zu machen, da dieses die Fertigung vereinfacht. Die Gefahr eines Schlingenabrisses wird dabei natürlich größer.

Oft findet man an ausgebauten Luftfederbälgen Scheuerstellen, die von der Berührung mit andern Fahrzeugteilen herrühren.Solche Scheuerstellen führen nicht unbedingt zum Bersten. Berührt der Luftfederbalg bei Leerfahrt mit niedrigem Druck z.B. den Reifen, so kann die Balgwand hier durchscheuern und ein Luftverlust eintreten bevor es zum Bersten kommt.
Auf jeden Fall ist so ein Ausfall mit Stillstand und ungeplanten Kosten verbunden. Das Fahrzeug kann seine Fahrt nur mit stark verringerter Geschwindigkeit fortsetzen, bis ein neuer Luftfederbalg montiert ist. Auf jeden Fall sollte man bei einem geborstenem oder einem angescheuerten Luftfederbalg erst nach der Ursache suchen und diese beheben bevor man einen neuen Luftfederbalg einbaut. Scheuerstellen an Luftfederbälgen sind oft Folgeschäden einer verzogenen Achsaufhängung.
Besser ist es auf jeden Fall, einen drohenden Ausfall frühzeitig zu erkennen und für Abhilfe zu sorgen.
Dieses ist nicht immer einfach. Ist der Abrollkolben stark verschmutzt, so können sich in diesem Schmutz Fremdkörper wie z.B. Steine festsetzen, die die Balgwand verletzen können. Der Fremdkörper kann bei stehendem Fahrzeug auf dem Bereich des Kolbens liegen, der durch die Rollfalte verdeckt ist.
Auch sollte man beachten, dass sich der Abstand des Luftfederbalges zu anderen Fahrzeugteilen beim Ein- und Ausfedern ändert. Das Anscheuern geschieht dann nicht unbedingt in der Fahrstellung.
Ein anderer Grund für einen spontanen Ausfall durch Bersten kann kurzzeitige hohe oder langandauernde geringere Überlastung sein.
Die Fäden in der Balgwand werden überlastet und reißen. Am Bruchbild kann man häufig erkennen, ob es sich um einen sogenannten Gewaltberster durch einmalige hohe Überladung oder durch langandauernde geringfügig zu hohe Last oder falsche Auslegung des Luftfederbalges handelt. Langandauernde geringe Überlastung tritt häufig bei Fahrzeugen auf, bei denen sich der leere und der beladene Zustand nicht mehr oder weniger regelmäßig abwechseln, wie z.B. bei Geräteträgern.

Gummi ist ein künstlicher Werkstoff, der mit Zeit fließt. Ein nach einigen Jahren Betrieb ausgebauter Luftfederbalg hat sich daher weitgehend von der Kontur der Vulkanisationsform entfernt. Auch im drucklosen Zustand ähnelt er der Gestalt im druckbeaufschlagten, eingebauten Zustand. Wird ein verschlissener Luftfederbalg ausgebaut, und das Ersatzteil sieht deutlich anders aus als der zu ersetzende Balg, so sind manche, die wenig Erfahrung mit der Materie haben oft im Zweifel, ob sie das richtige Ersatzteil verwenden. Da es für Luftfederbälge keine einheitlich

Bild 77: Neuteil und zu ersetzender Luftfederbalg

Bild 78: Luftfederbalg mit Ermüdungsrissen

verbindlichen Bezeichnungen wie für Reifen gibt, sollte man sich hier an den Angaben der Hersteller orientieren. Bild 77 zeigt einen Luftfederbalg, der etwa zweieinhalb Jahre auf der Vorderachse eines Linienbusses montiert war. Im Vergleich zum Neuteil hat sich der Durchmesser vergrößert und sich damit dem Betriebsdurchmesser angenähert, während sich die Höhe verringert hat. Die beiden Luftfederbälge der Vorderachse wurden ausgetauscht, da sich infolge von Materialermüdung im Außengummi des Balges bis auf das Gewebe reichende Risse gebildet hatten. Um die Risse zu erkennen, muss der Balg eingebaut sein und unter Druck stehen damit sich der Außengummi im Rollbereich dehnt. Am einem ausgebauten Balg sind solche Risse nur zu erkennen, wenn man die Balgwand in diesem Bereich nach innen biegt. Bild 78 zeigt die Rollfalte von unten. Der Balg ist dabei auf einem Messkolben montiert. In Bild 79 ist eine Ausschnittsvergrößerung des Rollbereichs gezeigt. Deutlich sind hier die Risse mit im Grund freiliegendem Gewebe zu sehen.

Bild 79: Ermüdungsrisse
Bis auf das Gewebe reichende Ermüdungsrisse am unteren Ende der Rollfalte

Am unteren Faltenende, dem Rollbereich wird der Außengummi gedehnt. Weil das Material mit der Zeit härter und spröder wird, reißt der Außengummi in diesem dynamisch am höchsten beanspruchten Bereich zuerst.

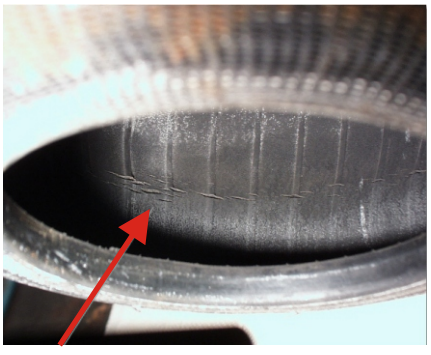


Bild 80: Risse im Innenbereich
Risse auf dem Bereich des Balges, der auf der Kolbenschulter aufliegt

Der Innengummi wird im Bereich der Kolbenschulter, dort wo die Stirnfläche in den zylindrischen Teil übergeht, gedehnt. Bei der Vulkanisation liegt dieser Balgabschnitt in einem Innenradius, während im eingebauten Zustand die Balgwand in die entgegengesetzte Richtung gebogen wird. Obwohl Dieser Bereich dynamisch bei weitem nicht so belastet ist, bilden sich auch hier Risse. Wenn dieser Teil des Balges während normaler Straßenfahrt in Bewegung ist, besteht zusätzlich die bereits erwähnte Gefahr eines Schlingenabrisses. Solche Schlingenabrisse können auch die Folge von verschlissenen Stoßdämpfern sein. Durch die nicht ausreichende Dämpferkraft klingen die Schwingungen später ab und es treten über längere Zeit größere Amplituden auf, bei denen die Rollfalte

vom Kolben abhebt. Bild 80 zeigt solche Risse auf der Balginnenseite.

Wenn defekte Luftfedern mit bordeigenen Mitteln am Straßenrand montiert werden, kommt es häufig vor, dass der zur Verfügung stehende Druck nicht ausreicht, den kolbenseitigen Dichtkonus des Balges auf den Kolbenkonus aufzupressen.
Die Folge eines häufigen Montagefehlers ist in Bild 81 gezeigt. Der Rand des Kolbenkonus hat sich auf dem Balgkonus bleibend eingedrückt. Die Kontur ist noch mehrere Monate nach der Demontage deutlich sichtbar. Ein so montierter Konussitz kann natürlich nicht richtig abdichten. Im Falle dieses Balges war die Undichtigkeit, die von Anfang an vorhanden gewesen sein muss, jedoch nicht Ursache für den Wechsel des Balges. Sie war offensichtlich so gering, dass sie nicht auffiel. Man muss sich hierbei bewusst sein, dass der Innendruck die Balgwand auf die Kolbenoberfläche drückt. Dieses bewirkt in diesem Bereich eine gewisse Abdichtung, die durch Schmutz und Rost natürlich schlechter wird. Auch fallen Undichtigkeiten bei Lkw und Anhängern wesentlich eher auf als bei Bussen. Die Luftfedern sind hier von außen wesentlich leichter sichtbar und zugänglich. Wird ein Fahrzeug gewaschen und das mit Reinigungsmittel versetzte Wasser fließt über eine Leckagestelle, so verursachen auch sehr kleine Leckagen deutlich sichtbare Schaumblasen. Aus dem oben genannten Grund machen sich manche Leckagen auch nur in der angehobenen Stellung der Luftfeder, wenn die Balgwand nicht auf dem Kolben liegt, bemerkbar.

Bild 81: nicht korrekt montierter kolbenseitiger Dichtkonus

Sowohl die Abmessungen des Balgkonus wie auch die des Kolbenkonus unterliegen Fertigungstoleranzen. Wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, muss der Balgkonus bei korrekter Montage die Möglichkeit haben auf dem Kolbenkonus noch weiter herunter zu gleiten. D.h. zwischen Balg und Kolbenstirnfläche muss bei neu montiertem Balg ein gewisser Spalt bleiben. Bei ungünstigen Fertigungstoleranzen ist eine solche Reserve früher aufgebraucht. Es herrscht dann kein Druck mehr zwischen den Dichtflächen von Balg- und Kolbenkonus. Ein solcher Balg wird wahrscheinlich im Fahrzeug eingebauten und angehobenem Zustand undicht sein. Reklamiert man einen solchen Luftfederbalg beim Händler oder Hersteller, so wird dieser unter Umständen keine Undichtigkeit feststellen können, da er einen anderen Kolben mit anderen Toleranzen verwendet, oder weil der Balgkonus durch Rückverformung des Materials während des Transports wieder enger geworden ist. Möchte man eine solche Undichtigkeit reklamieren, so sollte man auf jeden Fall den Balg auf dem Kolben belassen und beides einschicken.

Eine andere häufige Ursache von Reklamationen sind geborstene Luftfedern. Eine Luftfeder birst normalerweise dann, wenn die Fadenkraft am höchsten ist. Dieses ist dann der Fall, wenn der Betriebsdruck am höchsten ist, nämlich in der ganz eingefederten Stellung. Neben einer falschen Auslegung kommen folgende Gründe für das Bersten in Frage:
Der Balg ist anderen Fahrzeugteilen angescheuert und dabei der Festigkeitsträger (Gewebe) beschädigt worden.
Die Fahrhöhe war zu hoch eingestellt. Das Volumen in dieser Stellung ist natürlich größer als das in der konstruktiv vorgesehenen Fahrhöhe. In der ganz eingefederten Stellung ist das

Volumen natürlich immer gleich groß, so dass sich beim Einfedern aus größerem Volumen ein höherer Druck ergibt. Auch bei Überladung können Luftfedern in der ganz eingefederten Stellung bersten, da das gesamte Druckniveau und damit auch der Druck in dieser Stellung höher liegt. Man spricht in diesem Fall von einem so genannten Überlastungsplatzer. Die Risse in der Balgwand haben meistens die Form eines Y, wobei der längere Riss in Fadenlängsrichtung und der Kürzere quer zum Faden verläuft. Der Schnittpunkt der beiden Risse liegt meist im oberen Bereich des Balges. Die Risse reichen üblicherweisenicht in den Teil der Balgwand hinein, der während des Berstens auf dem Abrollkolben gelegen hat.
In Bild 82 ist eine Luftfeder gezeigt, die etwa dreieinhalb Jahre auf der Hinterachse eines Lkw im Einsatz war. Die Achse ist bei diesem Lkw Typ an Längslenkern geführt, auf denen zwei Luftfedern hinter der Achse auf dem längeren Hebelarm angeordnet sind.

Das Schadenbild zeigt mehrere Besonderheiten:
Der durch das Bersten entstandene Riss verläuft von etwa 50 mm unterhalb der Bördelplatte über die gesamte Balglänge bis zum unteren Kern. Die Kernschlinge ist aufgerissen. Auf dem Abrollkolben ist im Foto eine Beschädigung zu sehen, die jedoch keinen Abdruck auf der Balgwand hinterlassen hat. Sie ist wahrscheinlich während der Demontage oder später entstanden. Der Rollbereich weist bis auf den Festigkeitsträger reichende Risse infolge von Materialermüdung auf. Teilweise sind Fremdkörper (Sandkörner) eingedrungen.
Die Risskante und die Fadenenden sind ausgefranst.
Der bis zum unteren Kern gehende Riss läßt darauf schließen, dass sich die Luftfeder zum Zeitpunkt des Berstens in ausgefederter Stellung befand. Einem Zustand also, in dem der Innendruck maximal dem Vorratsdruck der Bremsanlage des Fahrzeugs entsprochen haben kann. Dieser beträgt 12 bar. Wenn ein Druck von 12 bar über einen längeren Zeitraum in der ausgefederten Luftfeder ansteht, so kann dieses durchaus zu einer bleibenden Schädigung des Festigkeitsträgers führen. Man sollte ein beladenes Fahrzeug daher nicht mit geöffnetem Heb- Senkventil über längere Zeit stehen lassen. Das Ventil sollte nur solange geöffnet bleiben, bis die gewünschte Höhe erreicht ist. Der Druck in der Luftfeder entspricht dann nur der von ihr zu tragenden Last. Andernfalls würde sich der Druck mit dem Vorratsdruck ausgleichen und bei laufendem Motor sogar den Abschaltdruck des Kompressors erreichen. Der Stossdämpfer als Ausfederbegrenzung wird dabei auf Zug belastet. Moderne Fahrzeuge haben eine Einrichtung, die die Luftzufuhr abschließt, bevor die Ausfederbegrenzung erreicht wird. Am Aussehen des Risses und insbesondere der Fadenenden kann man erkennen, ob es sich um eine kurzzeitige hohe Belastung oder eine geringere aber dafür länger währende Überlastung gehandelt hat, die zum Bersten geführt hat.

Bild 82: geborstene Luftfeder mit Riss bis zum unteren Kernbereich

Dahinter steckt folgende Theorie:
Aus einer kurzzeitigen hohen Druckspitze, wie sie z.B. beim Überfahren eines Fahrbahnhindernisses entsteht, resultieren entsprechend hohe Fadenkräfte. Liegen diese oberhalb der Reiskraft des Fadens, so reißt dieser spontan ab und es entstehen mehr glatte Fadenenden.

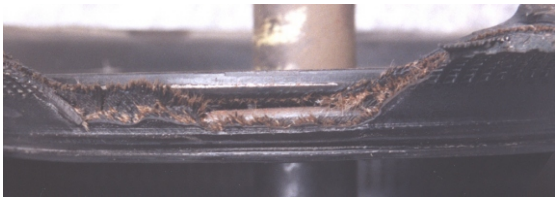


Bild 83: Riss im unteren Kernbereich

Werden die Fäden dagegen über eine längere Zeit geringfügiger überlastet, so fängt das Material zuerst an zu fließen und es reißen einzelne Fasern, bis die Fäden soweit geschwächt sind, dass auch eine geringe Lastspitze zum Reißen ausreicht. Die Fadenenden sehen dann mehr ausgefranst aus.
Diese Theorie konnte in eigenen Versuchen nicht erhärtet werden. Man muss hierbei jedoch berücksichtigen, dass es nur schwer möglich ist solche Versuche unter realistischen Bedingungen durchzuführen. Die Schädigung, der ein Festigkeitsträger über einige Jahre im Betrieb bei geringer aber häufiger Überlast erfährt, lässt sich kaum in der für Versuche zur Verfügung stehenden Zeit in ein Versuchsobjekt einbringen.
Auch die Definition der Überlast ist problematisch:
Ein statischer Druck von sieben bar erzeugt je nach Baugröße und Wickeldurchmesser bei der Herstellung der Luftfeder unterschiedliche Fadenkräfte sowohl in der Konstruktionslage als auch in den Endlagen. Auch das gesamte Federvolumen (mit oder ohne Zusatzvolumen) hat einen entscheidenden Einfluss. Viele Luftfedern sind den Unterlagen der Hersteller mit einem maximalen statischen Druck von 7 bar angegeben. Dieses bedeutet aber nur, dass der Hersteller zusichert, dass die Luftfeder bis zu einem solchen Druck geeignet ist. Man kann hier nicht den Umkehrschluss ziehen,

Bild 84: Riss im unteren Kernbereich

Bild 85: Aus der Balgwand herausgeschnittener Bereich mit bis auf das Gewebe reichenden Rissen und eingedrungenen Fremdkörpern

dass bei Überschreiten dieses Druckes Schäden unausweichlich sind. Die Grenzbelastung, bei der Schäden eintreten, ist nur in langwierigen Versuchsreihen zu finden.
Folgt man der Theorie, so handelt es sich bei dem hier vorliegendem Luftfederbalg um einen sogenannten Überlastungsplatzer. Wie in Bild 85 deutlich zu erkennen, sind sowohl

der Riss als auch die Fadenenden ausgefranst, was auf längere Überlastung schließen lässt. In den Ermüdungsrissen im Rollbereich sind angerissene Fäden und eingedrungene Fremdkörper zu erkennen.
Was schließlich zum Bersten der Luftfeder geführt hat, lässt sich aus dem Schadenbild oft nicht eindeutig folgern. Im diesem Beispiel kann das Fahrzeug sowohl längere Zeit in angehobener Stellung abgestellt gewesen sein, in das Gewebe eingedrungen Fremdkörper oder häufige Überladung können es geschädigt haben. Relativ sicher ist hier nur, dass der Balg in ausgefederter Stellung geborsten ist und in erheblich verschlissenem Zustand war.

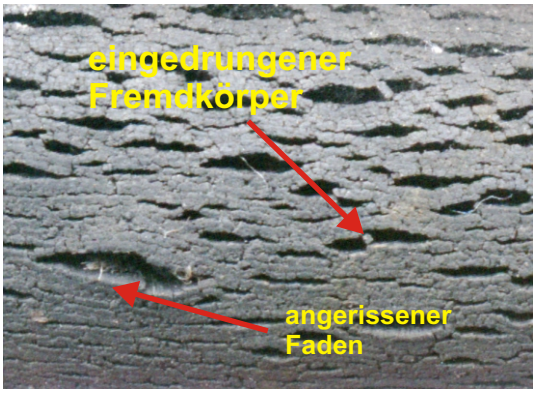


Bild 86: Detailvergrösserung der Balgwand im Rollbereich

In diesem Abschnitt sind nur die Schäden an Luftfedern beschrieben, die Folge von Überlastung, Fehlbedienung, oder Alterung sind. Eine Ausnahme macht der Schlingenabriss. Dieses Schadenbild kann sowohl durch eine zu hoch eingestellte Fahrhöhe als auch durch einen Fertigungsfehler entstehen.

Literaturverzeichnis

1 Krettek, Otmar (Hrsg)
Federungs- und Dämpfungssysteme
Fortschritte der Fahrzeugtechnik
ISBN 3-528-06400-5

2 Voß, Hartwich
Die Luftfedeung in Straßenfahrzeugen
Firmenschrift ContiTech

3 Döhla, Werner
Ventilsysteme für die Luftfederung
ISBN 3-478-93239-4

4 Gieck, Jack
Riding On Air, A History Of Air Suspension
ISBN 0-7680-0454-3

Stichwortverzeichnis

A

Abrollkolben 8 13 60 114
Abrollverhalten 58
Achslastverteilung 68
Adiabatische Kennlinie 14 15 38 77
Anhängerachsen 61 71
Antriebsachse 96 102 103
Anwendungsgrenzen 86
Ausfederweg, dynamischer 71 72
Außendurchmesser 23

B

Balgkonus 60 116
Balglänge 24 35
Baukastensystem 96
Berstdruck 49 51
Berstsicherheit 47
Bodenplatte 8
Bördelplatte 60 62 64
Bremskraftaufteilung 69 78
Bügelstabilisator 74 77 78 98 99

C

D

Dauerhaltbarkeit 47 51
Dichtkonen 59 60 102
Dichtkonus 8
Doppelachslast 83
Doppelquerlenker 104
Drehfederrate 74 73 76
Drehschemel 108
Dreiachsaggregat 108
Dreiecklenker 74
Dreiecklenker 91 102
Durchmesser, wirksamer 23 53 82

E

Eigenfrequenz 36 40 70 81
Einzelradaufhängung 104
Endanschlagpuffer 27

F

Fadenabstand 46
Fadendichte 47 49 50 51 52 53 58 92
Fadenkraft 49 50 51 53 118

Fadenraute 46 47 113
Fadenwinkel 29 30 34 47 57
Faltenbälge 55 58 59
Faltenbildung 58
Faltenhöhe 9
Faltenüberhang 9 24
Fangseile 62
Federrate 10 36 71 106
Federspur 75
Festigkeitsträger 13 46 48 49
Fläche, wirksame 11 14 37 42 106 109
Fliehkraft 75 76

G

Gasfeder 1 13
Gewebedehnung 30
Gleichgewichtswinkel 30 52 53
Gürtelbälge 86

H

Haltenase 60
Harshness 82
Heb- Senkeinrichtung 67
Hebekurve 15 16
Herstellzustand 34
Hinterachse 100 101 104
Hochdruckluftfedern 86 93 94

I

Isentropen Exponent 11
Isentropengleichung 15
Isobare Kennlinie 14 15 41

J

K

Kennlinie 10
Kernschlinge 114
Kneeling 68
Kolben, hinterschnittener 43 68 105
Kolbendurchmesser 9 23
Kolbenhöhe 24
Kolbenkontur 36 41 42 45 78
Kolbenlänge, freie 9
Kolbenmantel 8
Kolbenvolumen 105 107
Komfortverbesserung 79
Kompressor 65

Konusplatte 8 63
Kurvenfahrt 73
L
Ladegut 81
Ladehöhe 81
Längslenker 70 97 101 109 110 117
Last- Leerverhältnis 80 81
Lenkerfedern 99
Liftbalg 102
Losbrechkraft 82
M
Mehrkreisschutzventil 65
Metallkonus 60
Metallteilabstand 9 26
Momentanpol 73 74
N
Nachlaufachse 67 96 100
Niveauregelventil 65 68 109 113
Nutzlastverlust 69
O
P
Panhardtstab 98
Piercekern 59
Polyamid 49 50 51 60
Polyester 49 50 51 60
Puffer 8 27
Q
R
Radlastschwankungen 83
Reifeneinfederung 78
Rollbälge 55 56 57
S
Schlauchrollbälge 103
Schlingenabriss 115
Schwerpunkt 73 74
Seildrahtkern 62
Sekundärfeder 26 77 97
Spannplatte 61
Spannringe 103
Spitzendruck 20
Stabilenker 91 100
Stahlfeder 10
Stahlfederung 81 99

Starrachsen 108
Strassenschonung 79 83
T
Terminalschlepper 110
U
Übersetzung Rad / Feder 70
V
Verformungsgeschwindigkeit 51 52
Vierbalgluftfederung 107
Volumen 36 38 39 41
Volumenfederung 1 11
Volumengradient 11 39 40
Volumenkurve 19
Vorderachse 96 100 102 104 108
Vorlaufachse 99 101 102
Vorratsdruck 86 94
Vulkanisationsform 26 34
W
Wankeigenschaften 109
Wanksteifigkeit 104
Wankverhalten 73 87
Wickelwinckel 31 53
X
Y
Z
Zugdeichseanhänger 108
Zusatzfeder 26 77
Zweibalgluftfederung 98
Zweifaltenbalg 101

www.airsprings.de

AIRTECH®
Luftfedern

AIRTECH®
Luftfedern

hohe Qualität · große Auswahl · schnelle Lieferung