

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 Durchmesserertrag liegt bei etwa 30 mm. Solche Produkte unterscheiden sich von den üblichen Zweilagigenbälgen 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 erkaufte 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 Federspür montieren und damit das Wankverhalten verbessern. Auch in Fahrzeuginnenrichtung steht mehr Bauraum für z.B. Tank und Batteriekästen zur Verfügung. Bevor man sich jedoch daranmacht eine luftgefederte Achsaufhängung mit Luftfedern für

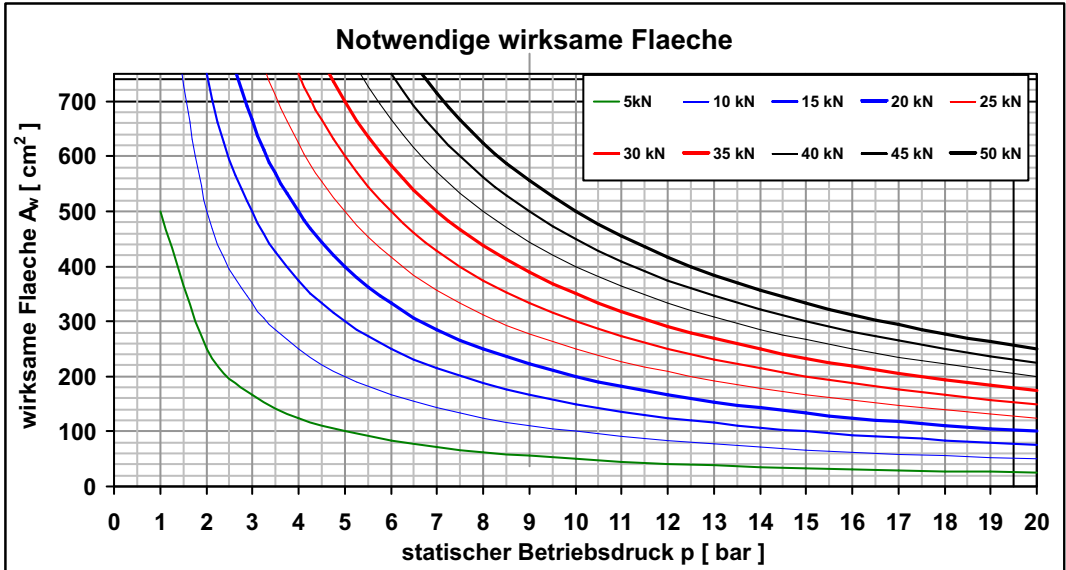


Diagramm 28: wirksame Fläche als Funktion des Betriebsdrucks mit der Federkraft als Parameter

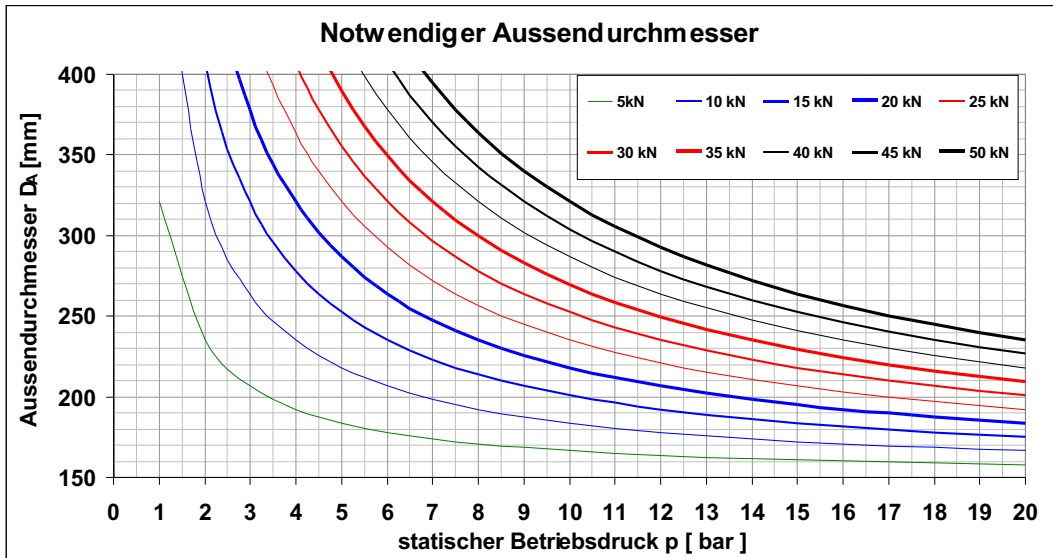


Diagramm 29: Aussendurchmesser als Funktion des Betriebsdrucks mit der Federkraft als Parameter

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.

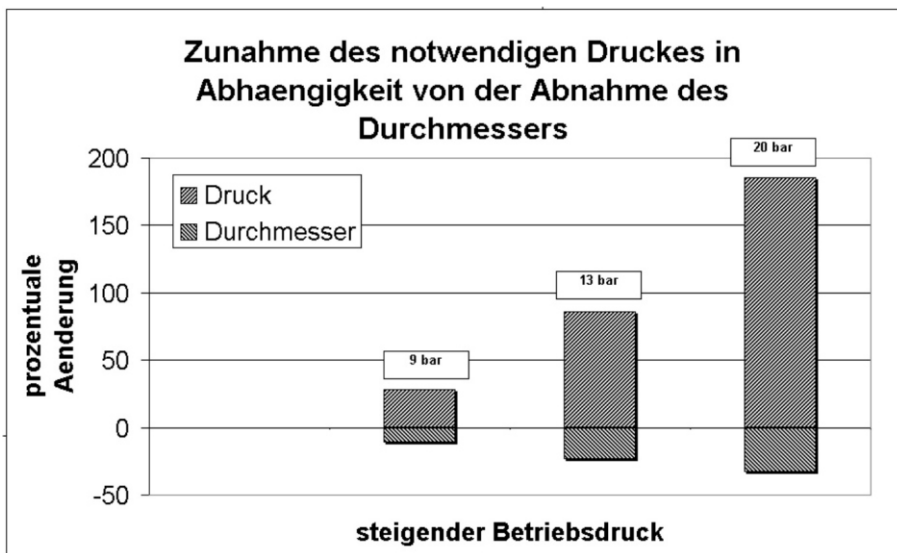


Diagramm 30: Druckzunahme und Durchmesserabnahme

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.

Vergößert 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:

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

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.

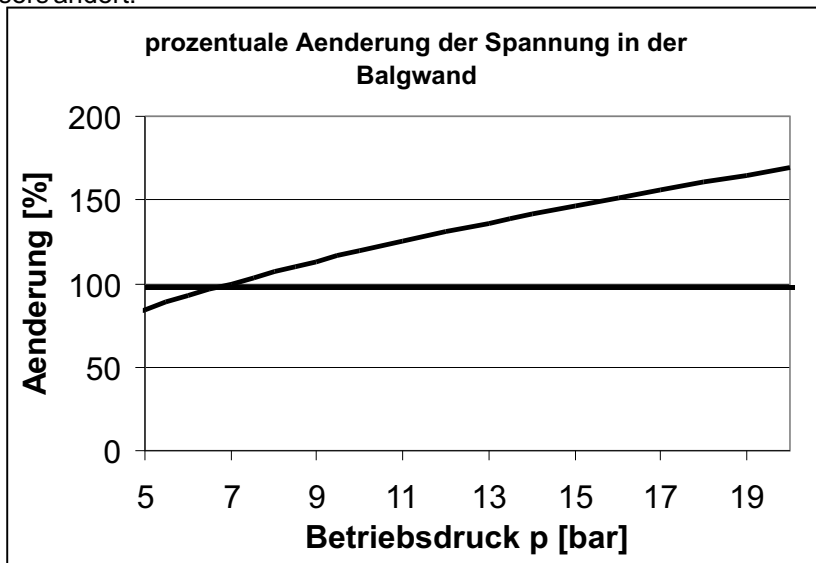


Diagramm 31: prozentuale Aenderung der Spannung in der Balgwand

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 Dreieckenker 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

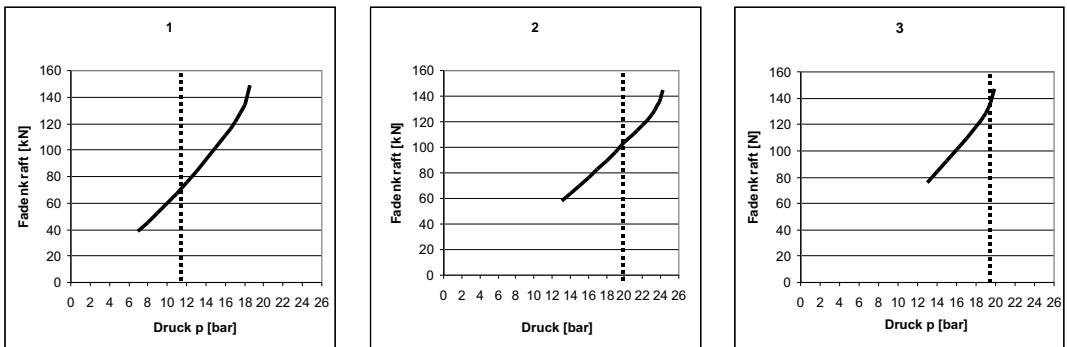


Diagramm 32: Fadenkräfte bei verschiedenen Auslegungen

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, dass 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 luftdichtem 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 beschriebene 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.