

## Abstimmung einer Federgabel durch Optimierung des Luftpolsters

von Dr.-Ing. Rainer Nowak

Die richtige Abstimmung der Federgabel hat einen wesentlichen Einfluss auf das Fahrverhalten. Häufig wird deshalb gefragt: Wieviel Gabelöl ist optimal? Was bringen progressive Federn?

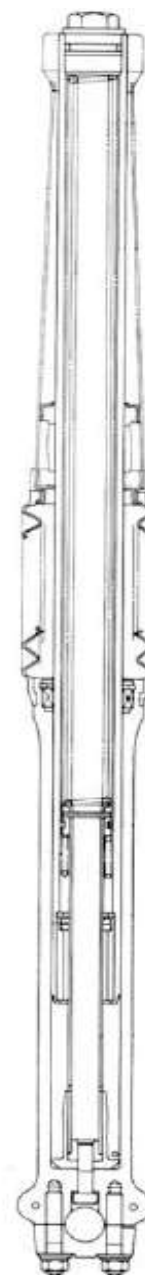
Der vorliegende Beitrag widmet sich dem Zusammenspiel von Feder und Luftpolster in einer klassischen Federgabel und der Wirkung der Rückstellkräfte auf K0-Lage und Eintauchtiefe bei Vollbremsung.

An einem Auslegungsbeispiel wird der Einfluss der Progressivität der Gabelfeder und der Höhe des Einstellluftpolsters verdeutlicht. Dämpfungskräfte sind nicht Gegenstand der Untersuchung, sind aber sehr wohl in Verbindung mit den Radsteifigkeiten und den Massen für ein gutes dynamisches Verhalten des Fahrzeugs relevant.

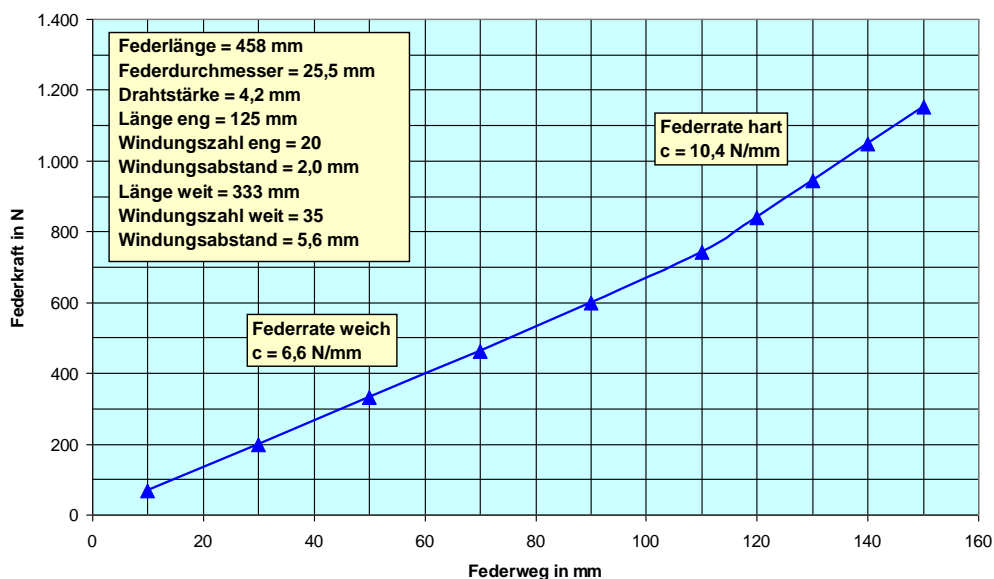
### 1. Basisdaten für Konstruktion, Standrohr, Gabelfeder, Massen und Kräfte

Max. Eintauchweg	115 mm
Innendurchmesser Standrohr	26 mm
Außendurchmesser Standrohr	35 mm
Umgebungsdruck	0,1 N/mm <sup>2</sup>
Verschlusschraube in mm Luftsäule	19 mm
Federrate weich	6,6 N/mm
Federrate hart	10,4 N/mm
Federweg weich	110 mm
Federvorspannung	30 mm
Feder Masse	372 g
Dichte Federstahl	0,0078 g/mm <sup>3</sup>
Masse Fahrzeug incl. Fahrer	280 kg
Schwerpunkthöhe	580 mm
Achsabstand	1405 mm
Gewicht auf Vorderachse	110 kg
Bremsverzögerung*)	6,5 m/sec <sup>2</sup>
Gabelwinkel in Grad	30°

\*) Vollbremsung von 100km/h auf Null in 60m (nur mit Vorderrad und einer Brems Scheibe)

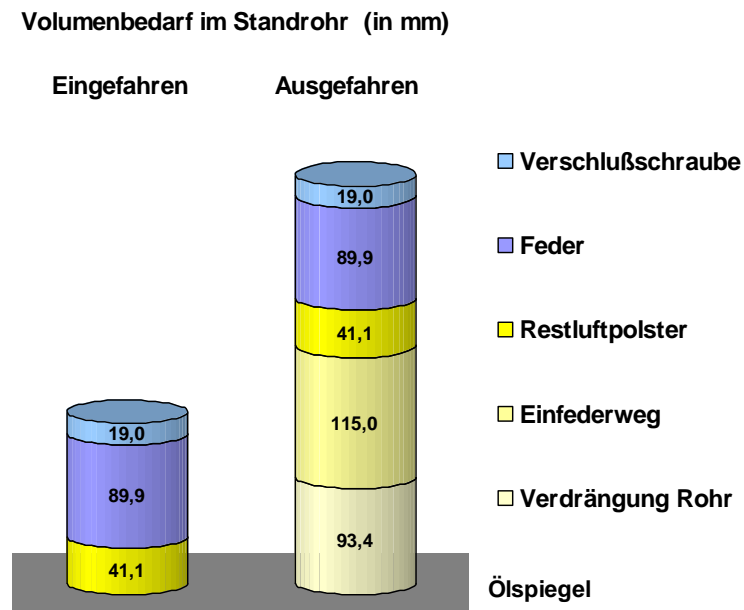


Kennlinie progressive Gabelfeder



Es handelt sich hier um eine typische progressive Gabelfeder mit an einem Ende enger gelegten Windungen. Beim Zusammendrücken gehen die engen Windungen ab einem Federweg von 110mm auf Block und die Federrate steigt von 6,6 N/mm auf 10,4 N/mm.

## 2. Volumenbedarf im Standrohr



Im Bild ist für die Zustände „**Eingefahren**“ und „**Ausgefahren**“ die Volumenverteilung im Standrohr über dem Ölspiegel in mm Säulenhöhe dargestellt. Die im fertig montierten und verschlossenen Standrohr vorhandene Luft ist in beiden Zuständen an der gelben Einfärbung erkennbar.

Im Zustand „**Eingefahren**“ bildet die Summe aus Verschlusschraube, Feder und Restluftpolster (Luftvolumen nach Verdichtung) das Einstellluftpolster. Im Beispiel sind das **150 mm Luftsäule** von der Oberkante Standrohr gemessen.

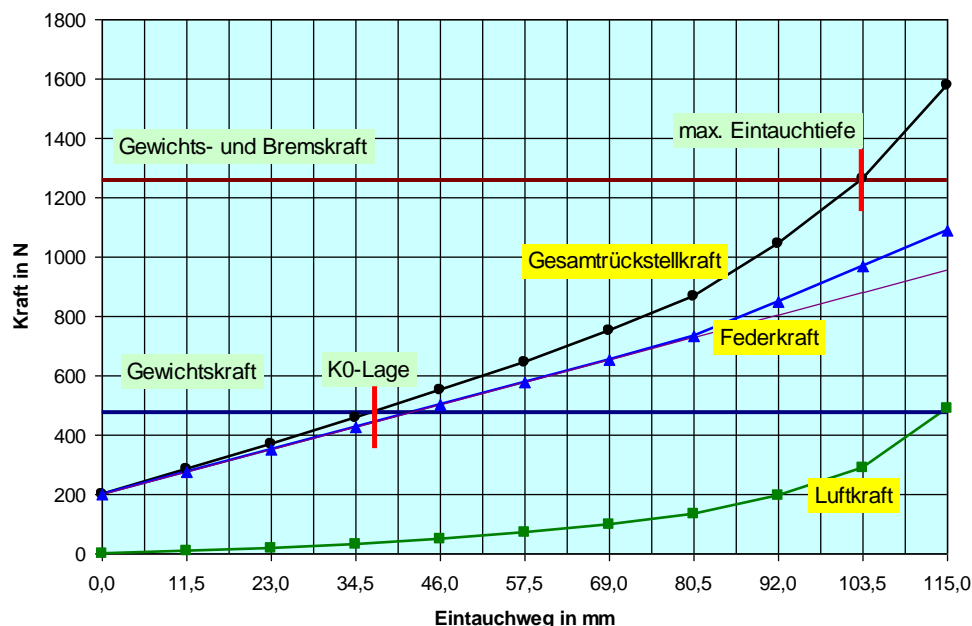
Im Zustand „**Ausgefahren**“ wird die Feder eingesetzt und die Verschlusschraube montiert. Die verbleibende im Standrohr eingeschlossene Luft (im Beispiel sind das **249,5 mm Luftsäule**) wird beim Einfahren durch den Einfederweg und die damit verbundene Ölverdrängung der Rohrwand auf das Restluftpolster (im Beispiel sind das **41,1 mm Luftsäule**) zusammengedrückt.

## 3. Berechnung der Rückstellkräfte im Standrohr in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe

Das unten stehende Diagramm zeigt die auf Basis obiger Daten berechneten Kräfte der Tragfeder, der eingeschlossenen Luft und die Summe aus den beiden Kraftverläufen im Standrohr als Funktion der Eintauchtiefe. Für das **Luftpolster wurden 150mm** gewählt. Die Schnittpunkte mit der ins Standrohr eingeleiteten Gewichtskraft und der Summe aus Gewichtskraft und Bremskraft liefern die K0-Lage und die Eintauchtiefe unter Bremslast.

Da eine Vollbremsung über 60m zu einem relativ konstanten Druckniveau in der Gabel führt, wurde davon ausgegangen, dass näherungsweise ein isothermer Verdichtungsprozess zugrunde liegt. Bei extrem schnellen bzw. dynamischen Verdichtungsstößen ist der Verdichtungsprozess eher polytrop und kann kurzzeitig zu deutlich höheren Drücken bzw. Rückstellkräften im Standrohr führen

Kräfte im Standrohr einer Federgabel mit Luftunterstützung



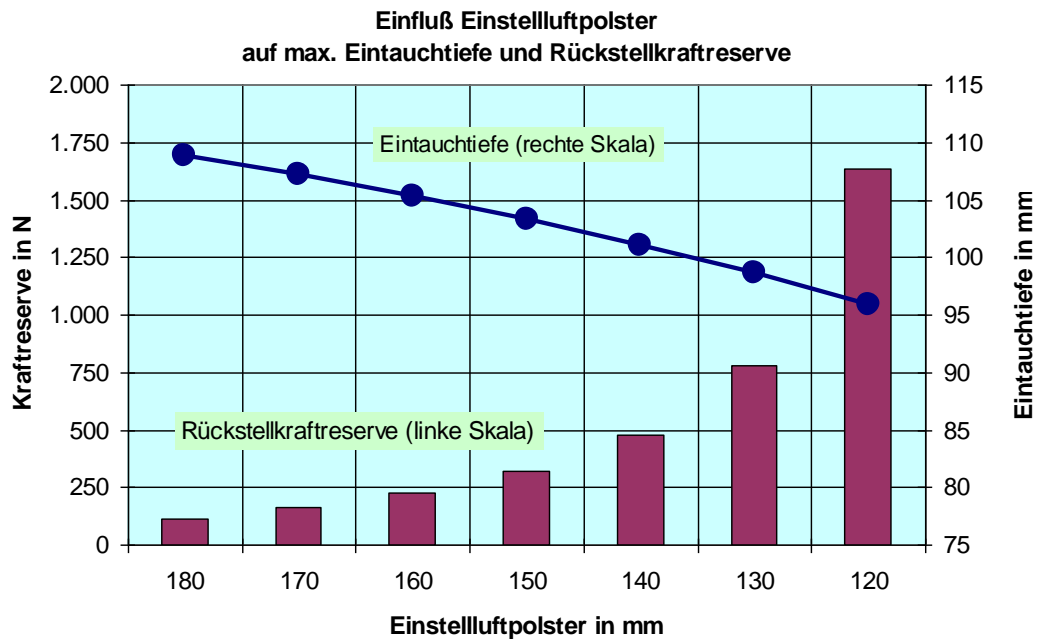
Bei dem gewählten **Einstellluftpolster von 150mm** ist die **K0-Lage bei ca. 37mm**, das entspricht etwa 32% von Gesamthub der Gabel. Durch das zusätzliche Bremsen beträgt die **maximale Eintauchtiefe ca. 103mm**, das entspricht etwa 90% vom möglichen Gesamthub der Gabel.

Die Gabelfeder alleine ist trotz progressiver Kennlinie nicht stark genug, das Durchschlagen infolge Gewicht und Vollbremsung abzufangen. Die progressive Feder liefert gegenüber der „nur“ linearen Feder bei maximaler Eintauchtiefe eine gerade mal 90N höhere Rückstellkraft. Damit spielt die Progressivität der Feder im Vergleich zum wesentlich progressiveren Kraftaufbau durch das verdichtete Luftpolster für das Verhalten der Gabel unter Last eine eher untergeordnete Rolle.

Eine weiche Kennlinie der Feder um die K0-Lage ist sinnvoll, damit die Gabel beim normalen Fahren komfortabel reagiert. Die Forderung nach einer weichen Kennlinie im unteren Bereich schränkt aber die Möglichkeiten einer starken Progression ein. Ab dem Federweg von 110 mm gehen die 20 engen Windungen auf Block und die verbleibenden 35 Windungen liefern eine um ca. 57% höhere Federrate, die sich damit im Mittel nur um 3,8 N/mm erhöht. Der Beitrag aus der komprimierten Luft erhöht die Gesamtsteifigkeit dagegen deutlich, was richtigerweise die Fahrsicherheit bei hohen Belastungen verbessert.

Bei Verwendung einer durchgehend **linearen Gabelfeder mit  $c = 7,0\text{N/mm}$  und einem Luftpolster von 145mm** stellt sich **in etwa die gleiche Gesamtkennlinie** ein, wie bei Verwendung der progressiven Feder. Der Unterschied zwischen den Federn ist selbst für einen geübten Fahrer kaum „erfahrbar“.

#### 4. Einfluss des Einstellluftpolsters auf Eintauchtiefe und Rückstellkraftreserve



Die Rückstellkraftreserve wurde bei vollem Eintauchen des Standrohres berechnet und ist ein möglicher Maßstab für die Sicherheit gegen Aufschlagen auf den Tauchrohrboden. Bei einem **Einstellluftpolster von 150mm beträgt die Reserve je Standrohr 320N und für die Gabel 640N**. Das entspricht 41% der Last aus der Vollbremsung und ist neben dem hydraulischen Zuganschlag (Konus am Tauchrohrboden) ein guter Schutz gegen das Durchschlagen auf die Tauchrohre.

#### 5. Fazit

- Ohne die richtig eingestellte Luftunterstützung kann das Standrohr trotz progressiver Gabelfeder auf das Tauchrohr durchschlagen.
- Die Progressivität der Gabelfeder hat gegenüber dem progressiven Kraftverlauf des verdichteten Luftpolsters eine untergeordnete Bedeutung.
- Fahrdynamisch hat der progressive Verlauf der Gabelfeder kaum Relevanz. Der Steifigkeitszuwachs der Gesamtfederrate und damit das Sicherheitsplus bei extremer Belastung (Bodenwelle bei Vollbremsung oder in Kurven) kommen fast ausschließlich durch die progressive Luftfeder.
- Die Wirkung des Luftpolsters ist relativ robust gegen Ölverlust. Selbst wenn 30mm Öl fehlen, also die Luftsäule um 30mm zu groß ist, führt das noch nicht zum Aufsetzen der Gabel.
- Das Einstellluftpolster darf nicht zu klein sein, sonst geht das Gabelöl theoretisch „auf Block“. Der Druck wird je nach Lastfall sehr hoch und der nutzbare Gabelfederweg stark eingeschränkt. Das rechnerisch minimale Einstellluftpolster liegt im vorliegenden Beispiel bei ca. 109 mm.
- Das optimale Einstellluftpolster ist ein Kompromiss zwischen der maximalen Ausnutzung des Gabelfederweges und der Sicherheit gegen Durchschlagen der Standrohre auf die Tauchrohrböden.