

Vorderradaufhängen An Motorisierten Zweirädern:

Untersuchung der dynamischen Beanspruchungen und deren Auswirkungen bei verschiedenen Fahrzuständen, sowie kinematische Analysen diverser Aufhängungssysteme.

Autor: Dipl. Ing. Klaus Vosteen

Inhalt

Vorwort.....	Seite 3
Ablösung der Teleskopgabel.....	Seite 4
Anforderungen an eine Vorderradaufhängung.....	Seite 5
Vorderradaufhängungsvergleich.	Seite 6
Bremsnickausgleich.....	Seite 9
Mc Pherson Konzept.....	Seite 11
Doppellängslenkerkonzept.....	Seite 14
VII Achsschenkellenkungskonzept.....	Seite 17
Lenkwinkeländerung infolge Einfederung.....	Seite 20
Nachlaufänderung infolge Einfederung.....	Seite 21
Abstützreaktionen infolge Bremskraft.....	Seite 22
Fazit.....	Seite 23

Vorwort

In letzter Zeit mehren sich Konstruktionen, die nicht mehr über eine Teleskopgabel zur Vorderradföhrung verfügen.

Das Ziel der hier vorliegenden Untersuchung ist die Erarbeitung theoretischer Grundlagen zur Bewertung verschiedener Vorderradaufhängungssysteme. Das Hauptaugenmerk gilt dabei *den* kinematischen Möglichkeiten der Konzepte.

Das Fahrverhalten vorhandener Konstruktionen in Zusammenhang mit der Kenntnis der Kinematik lässt Rückschlüsse zu, wie eine 'ideale!' Kinematik einer Aufhängung beschaffen sein müsste.

Die Beurteilung der Steifigkeit und Festigkeit einzelner Systeme wurde nur qualitativ vorgenommen. Eine quantitative Erfassung hätte nicht dem Ziel der Bewertung der Systeme an sich, sondern nur der einzelner Ausführungen entsprochen.

Aus den Ergebnissen der Untersuchung erfolgte die Erstellung eines Pflichtenheftes als Grundlage für eine Neukonstruktion.

Die Achsschenkellenkung von Hans G. Helms und dem Autor ist das daraus entstandene Resultat.

Ablösung der Teleskopgabel

Die Teleskopgabel steht kurz vor dem Ende ihrer Entwicklung. Insbesondere die Anforderungen der heutigen Reifentechnologie lassen die prinzipbedingten Nachteile dieses Systems offen zutage treten. Diese sind:

- Die mangelnde Steifigkeit der Teleskopgabel im Verhältnis zur Steifigkeit der heutigen Motorradfahrwerke. Größere Standrohrdurchmesser, Gabelstabilisatoren, größere Radachsdurchmesser und auch steifere Gabelbrücken bringen keine durchschlagende Verbesserung mehr.
- Das schlechte Ansprechverhalten der Federung infolge stick-slip-Effekt, sowie der notwendigen Dichtringvorspannung. Bei einer der Steifigkeit zuträglichen Vergrößerung des Standrohrdurchmessers verstärkt sich diese Erscheinung zudem.
- Ein Bremsnickausgleich ist nur über aufwendige Zusatzkonstruktionen erreichbar.
- Eine Teleskopgabel verursacht eine hohe Strukturbelastung des Fahrwerkes. Der lange Hebelarm zwischen Radaufstandspunkt und Lenkkopf bewirkt: dort hohe Biege- und Torsionsmomente infolge der am Radaufstandspunkt eingeleiteten Kräfte.
- Die hohe Strukturbelastung erfordert, um den Anforderungen von Steifigkeit und Festigkeit der Struktur Rechnung zu tragen viel Material-, und somit Masseeinsatz.
- Der Radstand verkürzt sich beim Einfedern in Abhängigkeit vom Gabelwinkel.

Anforderungen an eine Vorderradaufhängung

1. Maximale Steifigkeit bei minimalem Materialeinsatz.
2. Minimale Ansprechverzögerung der Federung.
3. Bremsnickausgleich, einstellbar, und möglichst progressiv zunehmend bei Einfederung.
4. Geringstmögliche Strukturbelastung des Fahrwerkes durch die über die Vorderradaufhängung darin eingeleiteten am Rad wirksamen Kräfte.
5. Darausfolgend geringstmöglicher Materialeinsatz beim Fahrwerk.
6. Geringstmögliche Radstandsänderung beim Einfedern.
7. Geringstmögliche Änderung von Lenkwinkel und Nachlauf beim Einfedern.
8. Geringstmögliche ungefederte Masse.
9. Geringstmögliches Massenträgheitsmoment um die Lenkachse.
10. Direkte, vom Einfederweg unabhängige Lenkbetätigung.
11. Weitestgehende Einsparung von verschleißanfälligen Lagerungen.
12. Möglichkeit einer progressiven Federdämpferbetätigung.
13. Vorhandensein ausreichender Bodenfreiheit bei jedem Fahrzustand, insbesondere bei Kurvenfahrt.

Vorderradaufhängungsvergleich

Anforderung	Teleskopgabel	Vorderradschwinge	System Fior	System RB 2	System Elf 3, 4	System BakkerQCS	System RADD	System Bimota Tesi	System VH
1	-	-	0-	+	+	+0	+0	+0	+
2	-	+	+	0	0	+	+	+	+
3	-	+	0	-	-	0	0	0	+
4	-	-	0-	+0	0	+	+	+	+0
5	-	-	0-	+0	0	+	+	+	+0
6	-	0	0	0	0	+0	+0	+0	+
7	0	0	0	0	0	+0	+0	+0	+
8	+	+	-	0	0	0-	0-	0-	0-
9	+	-	+	0	0	0	0	+	0
10	+	+	0	+	+	0	0	-	+
11	-	0	-	0	+	-	-	0	+
12	-	0	0	+	-	+	+	+	+
13	+	0	+	0	0	0	0	0	0

+ entspricht der Anforderung

0 entspricht teilweise der Anforderung

- entspricht nicht der Anforderung

Vorderradaufhängungsvergleich

Anhand bereits ausgeführter Konstruktionen lassen sich Gewichtungen einzelner Anforderungen treffen. So ist eine direkte, von der Einfederung unbeeinflusste Lenkung eine unabdingbare Voraussetzung für die Erhaltung der Fahrstabilität. Spurstangenlenkungen wie bei den ersten Elf-Versionen lassen auch bei hohem konstruktiven Aufwand eine Restbeeinflussung der Lenkung infolge Einfederung übrig. Lenkspiel infolge Verschleiß der Spurstangenlager stellt ein weiteres Problem einer solchen Lenkbetätigung dar. Eine hydraulische Lenkung kann solche Erscheinungen verhindern, bringt aber neue Komplikationen. (Bimota Tesi) So stellen sich Fragen bezüglich Schwingfähigkeit und Kompressibilität der Hydraulikflüssigkeit, der dauerhaften Zuordnung von Rad- zu Lenkerstellung, sowie zur Ausfallsicherheit. Bereits durchgeführte Versuche einer Lenküber- oder Untersetzung (Elf, Gallina) brachten keine befriedigenden Ergebnisse. Andere Systeme der Lenkbetätigung, als die über einen Lenkkopf ebenfalls. Konstruktionen, bei denen die gesamten am Vorderrad wirkenden Kräfte in den Lenkkopf eingeleitet werden bewirken eine hohe Belastung der Fahrwerksstruktur, sie müssen deshalb bei gleicher Steifigkeit schwerer sein als Achsschenkelkonzepte. Von den Konzepten mit konventionellem Lenkkopf weist das auch heute noch vielfach angewandte Vorderradschwingenprinzip erhebliche Vorteile gegenüber der Teleskopgabel auf. Höhere Steifigkeit, besseres Ansprechen der Federelemente, sowie weitgehende Variationsmöglichkeiten bei der Einfederungskinematik stehen dem Nachteil des hohen Massenträgheitsmomentes um die Lenkachse entgegen.

Die Forderung nach minimalem Fahrzeuggewicht insbesondere im Rennsport bedingt jedoch die Abkehr von der Steuerkopflenkung. Ein in unmittelbarer Nähe der Radachse befestigter, sich nicht mit der Lenkung mitdrehender Längslenker, der die am Vorderrad wirkenden Kräfte in das Antriebsaggregat einleitet ist bei den auf einen Lenkkopf verzichtenden Konstruktionen Stand der Technik. Je näher sich der vordere Anlenkpunkt dieses Längslenkers am Vorderradaufstandspunkt befindet, desto geringer sind die auf ihn wirkenden Kräfte. Platzprobleme bewirken eine Favorisierung einer einarmigen Ausführung dieses Längslenkers in Verbindung mit einem Vorderrad, das automobilähnlich mit einer Einpresstiefe versehen ist. Die Verbindung des vorderen Anlenkpunktes dieses Längslenkers, der aus einem um mindestens zwei Achsen verdrehfreien Lager bestehen muss, mit der Radachse erfolgt über einen Achsschenkel, in den auch die Einleitung der Bremskraft erfolgt» Dieser Achsschenkel kann über einen zweiten Längslenker oder aber über eine teleskopartige Ausführung seiner selbst geführt sein. Erstere, im weiteren Doppellängslenkerkonzepte genannten Systeme sind das Bakker QCS System, das Radd-System sowie, wenn auch mit einigen konstruktiven Unterschieden, das VH-System Die zweiten Konzepte werden hier, aufgrund gewisser konstruktiver Ähnlichkeiten McPherson-Konzepte genannt. Zu ihnen gehören das RB und die Elf 3,4 Systeme. Das Fior-System ist ein Doppellängslenkerkonzept, bei dem beide Längslenker oberhalb des Vorderrades am Achsschenkel angebracht sind.

Die kinematischen Grundlagen zur Bewertung der verschiedenen Aufhängungssysteme nach den Anforderungskriterien sollen hier im weiteren dargestellt werden.

Bremsnickausgleich

Ein Bremsnickausgleich hat die Aufgabe, die Federfähigkeit der Vorderradaufhängung bei Bremsung sicherzustellen. Starke Änderungen der Fahrwerksgeometrie sollen vermieden werden. (Verkürzung von Nachlauf und Radstand, Vergrößerung des Lenkwinkels)

Um die hier genannten Forderungen bei einer Teleskopgabel zu erfüllen, werden zumeist hohe Federraten gewählt, um ein frühzeitiges Durchschlagen der Federung bis zum Anschlag bei Bremsverzögerung zu verhindern. Zudem werden, insbesondere im Straßenrennsport, im Sinne geringer Fahrwerksgeometrieänderungen kurze Federwege verwendet. Resultat dieser Maßnahmen ist eine unzulängliche Wirksamkeit der Vorderradfederung bei der Egalisierung von Bodenunebenheiten. An eine Teleskopgabel angebrachte Vorrichtungen zum Bremsnickausgleich funktionieren nur, wenn das Bremsabstützmoment zur Tauchkompensation herangezogen wird. Um eine Wirksamkeit eines solchen Systems in gewünschter Höhe zu erreichen, ist ein erheblicher konstruktiver Aufwand erforderlich.

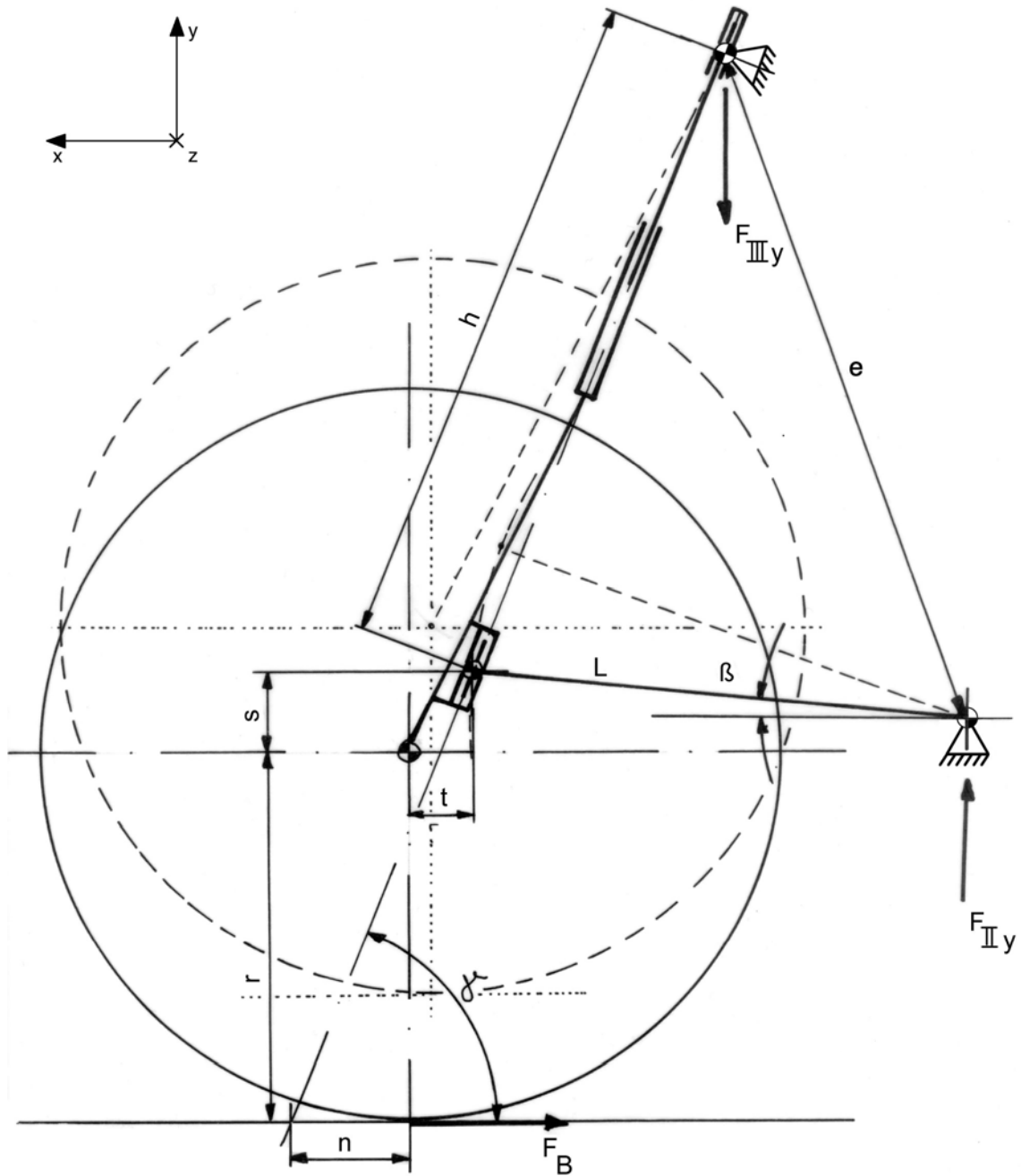
Eine weitere Forderung an einen Bremsnickausgleich ist das Vorhandensein eines so genannten 'Resttauchens', das heißt, ein geringes, bremskraftabhängiges Einfedern des Vorderrades um dem Fahrer die Höhe der momentanen Bremsverzögerung mitzuteilen.

Ein Bremsnickausgleich sollte auch bei einem bereits eingefederten Aufhängungssystem wirksam sein. Um dies zu erreichen, muss die den Bremsnickausgleich bewirkende Aufhängungsgeometrie so beschaffen sein, dass das Rückstellmoment bei zunehmendem Einfederweg ebenfalls zunimmt.

Zweckmäßigerweise sollte diese Zunahme proportional zu der am Rad wirksamen Federrate sein. Da letztere eine Progression aufweisen sollte, ergibt sich die Forderung nach einem progressiv wirkenden Bremsnickausgleich,

Die Untersuchung verschiedener Aufhängungssysteme diesbezüglich ergibt, dass ein progressiver Bremsnickausgleich nur bei der VH-Vorderradaufhängung vorhanden ist. Die gewünschte Eigenschaft ist kinematisch bei anderen Systemen nicht, oder nur in Verbindung mit erheblichen Nachteilen bei der Einfederungskinematik realisierbar.

Systemplan Mc Pherson Konzept



Mc Pherson Konzept

Eine im Radaufstandspunkt eingeleitete Bremskraft bewirkt folgende Abstützkkräfte in y-Richtung an den Befestigungspunkten des Aufhängungssystems:

$$F_{IIIy} = \frac{F_B (r+s) \cos \gamma}{h}$$

$$F_{IIy} = \frac{F_B (r+s+h \sin \gamma) \sin \beta}{h (\cos \beta \sin \gamma + \sin \beta \cos \gamma)}$$

Gesamtstützreaktion:

$$F_R = F_{IIIy} - F_{IIy}$$

Lenkwinkel:

$$\gamma = \arccos \left(\frac{h^2 + l^2 - e^2}{2 \cdot l \cdot h} \right) + \beta$$

Nachlauf:

$$n = (r+s) \cot \alpha \gamma - t$$

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Die Lenkwinkeländerung dieses Systems ist abhängig von Ausgangsstellung und Länge des unteren Längslenkers, sowie von der Distanz zwischen dem vorderen Anlenkpunkt des unteren Längslenkers zum oberen Befestigungspunkt des Achsschenkels (h).

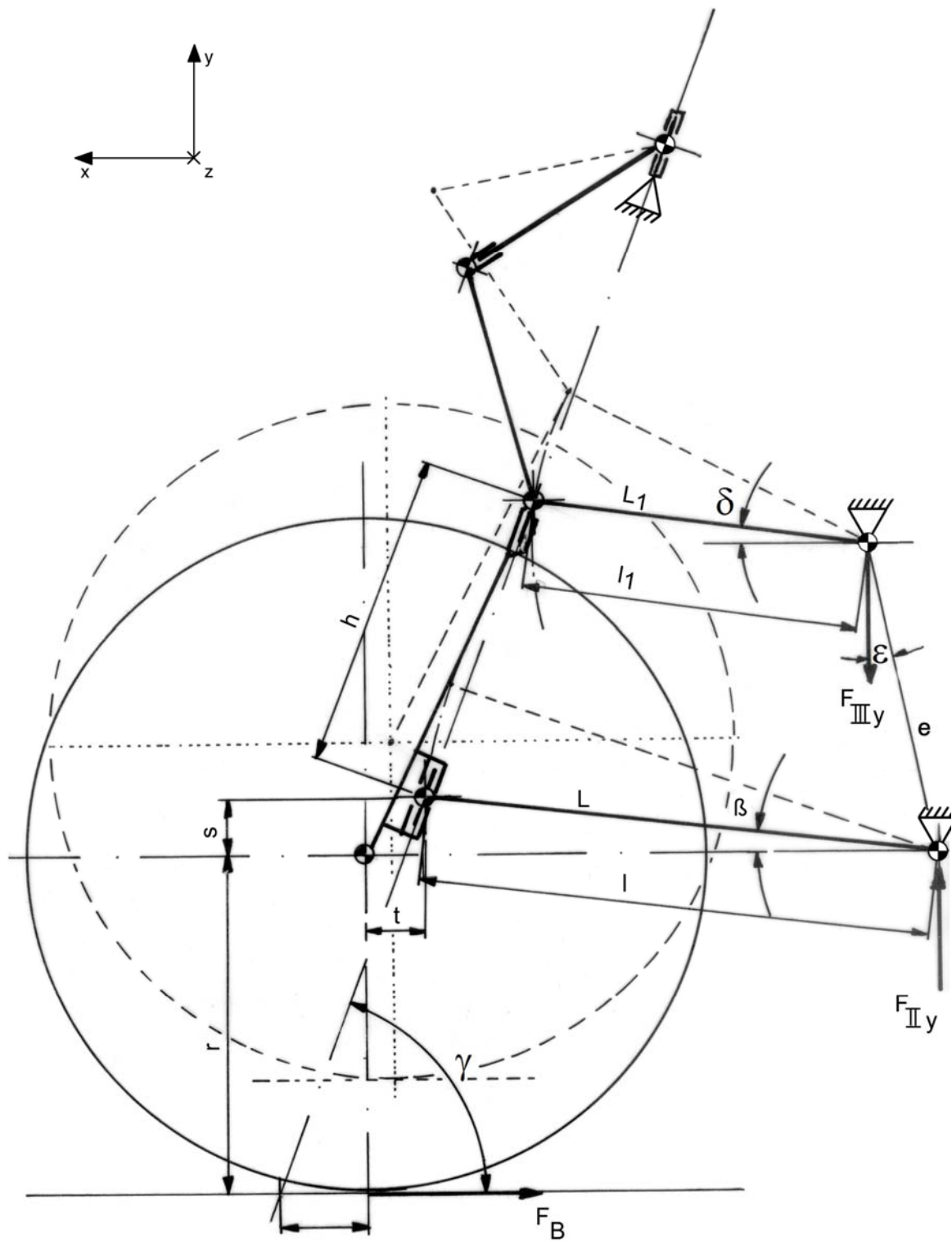
Für $\gamma + \beta < 90^\circ$ verringert sich der Lenkwinkel bei Einfederung

Für $\gamma + \beta > 90^\circ$ vergrößert sich der Lenkwinkel bei Einfederung

Je kürzer der Längslenker ist, desto größer ist die Änderung des Lenkwinkels bei Einfederung.

Die McPherson-Konzepte verfügen über keinen Bremsnickausgleich im angestrebten Sinn. Die Änderung von Nachlauf und Lenkwinkel sind dergestalt miteinander gekoppelt, dass eine Nachlaufverkürzung eine gleichzeitige Lenkwinkelvergrößerung bewirkt und umgekehrt. Vorteile dieser Bauart sind das geringe Massenträgheitsmoment um die Lenkachse, die direkte Lenkbetätigung, sowie die Einfachheit der Konstruktion. Die Ausführung dieses Konzeptes von Elf hat gegenüber der von RB den Nachteil der erhöhten Strukturbelastung des Fahrwerkes über das im Achsschenkel angebrachte Feder-Dämpfer-Element.

Systemplan Doppellängslenker Konzept



Doppellängslenkerkonzept

Reaktionskräfte in vertikaler Richtung infolge Bremsung an den Lagerpunkten II und III:

$$F_{III_y} = \frac{F_B (r+s) \sin \delta}{h \sin \gamma (\cos \delta + \sin \delta \cos \gamma)}$$

$$F_{II_y} = \frac{F_B (r+s+h \sin \gamma) \sin \beta}{h \sin \gamma (\cos \beta + \sin \beta \cos \gamma)}$$

Gesamtabstützreaktion:

$$F_R = F_{III_y} - F_{II_y}$$

Lenkwinkel:

$$\gamma = \arccos \left(\frac{1 \cos \beta - l_1 \cos \delta - e \sin \varepsilon}{h} \right)$$

Nachlauf:

$$n = (r+s) \cot \alpha \gamma - t$$

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Ein Doppellängslenkerkonzept kann über einen Bremsnickausgleich im gewünschten Sinne bei entsprechender kinematischer Auslegung verfügen. Voraussetzungen dafür sind:

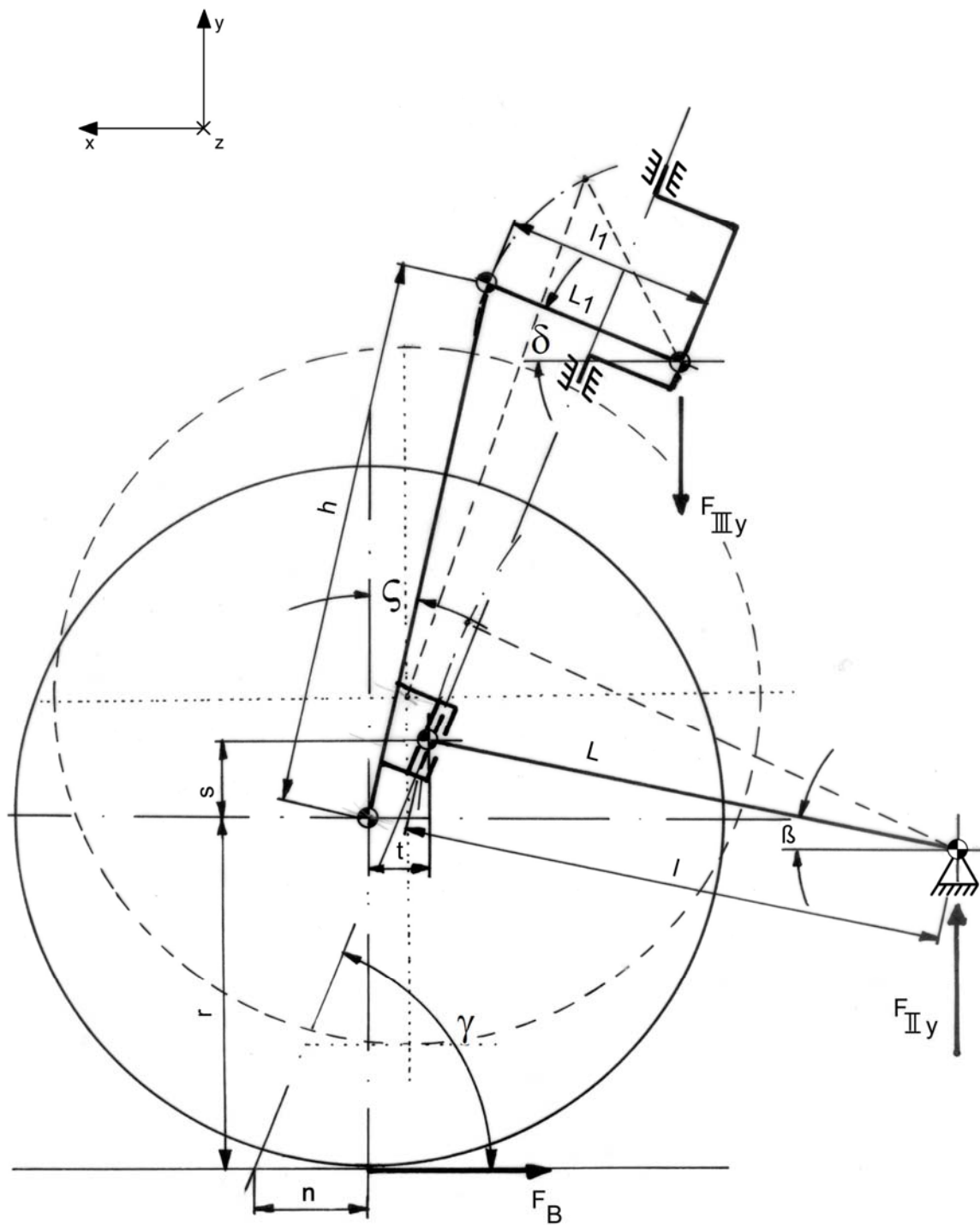
$$l/l_1 = 1,5; \delta_0 > \beta_0$$

Als Nachteil ergibt sich bei einer solchen Ausführung bei relativ konstant über den Einfederweg haltbarem Radstand eine Nachlaufverlängerung und Lenkwinkelverringerung beim Einfedern. Zudem gilt:

Je stärker ansteigend der Bremsnickausgleich bei Einfederung, desto größer die Änderung von Nachlauf und Lenkwinkel.

Der Hauptvorteil dieser Konstruktion ist die geringe Strukturbelastung eines Fahrwerkes durch eine solche Aufhängung. Nachteilig sind die vielen notwendigen Lagerstellen, insbesondere an den aufwendigen Vorrichtungen zur Lenkübertragung.

Systemplan VH Achsschenkellenkungskonzept



VH-Konzept

Die vertikalen Stützkräfte in den Hebellagerungen ergeben sich aus den gleichen Rechnungsgängen wie bei der konventionellen Doppellängslenkeraufhängung mit der zusätzlichen Variablen ζ , die die Neigung des Achsschenkels zur Vertikalachse kennzeichnet.

$$F_{II_y} = \frac{F_B (r + s + h \cos \zeta) \sin \beta}{h \cos \zeta (\cos \beta + \sin \beta \sin \zeta)}$$

Gesamtabstützreaktion:

$$F_B = F_{III_y} - F_{II_y}$$

Lenkwinkel:

$$\gamma = \arccot \tan \left(\frac{n + t}{r + s} \right)$$

Nachlauf:

$$n = (r + s) \cot \alpha \gamma - t$$

Zusammenfassung der Ergebnisse:

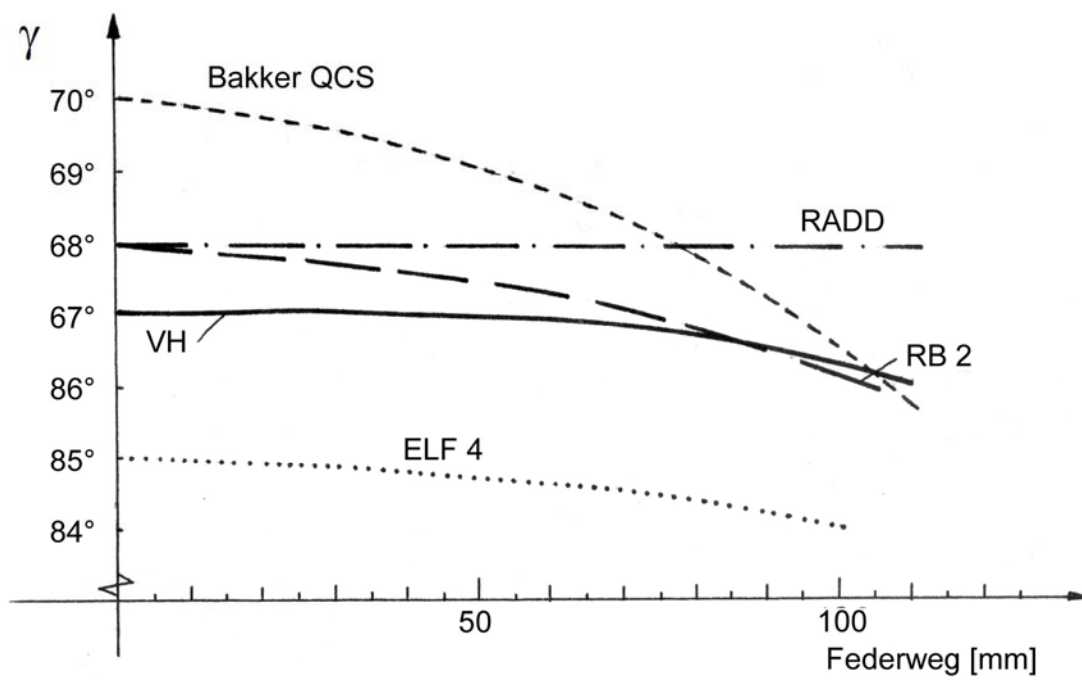
Die Lenkwinkeländerung infolge Einfederung verhält sich bei der VH-Konstruktion wie bei den McPherson Konzepten. Die Nachlaufänderung hingegen ist, abhängig von der Länge des oberen Längslenkers l_1 , sowie seiner Ausgangsstellung, variierbar.

Diese Konstruktion ist die einzige hier untersuchte, die in der Lage ist, einen progressiv wirkenden Bremsnickausgleich zu erzeugen, ohne gleichzeitig eine Nachlaufvergrößerung und Lenkwinkelverringerung zu bewirken.

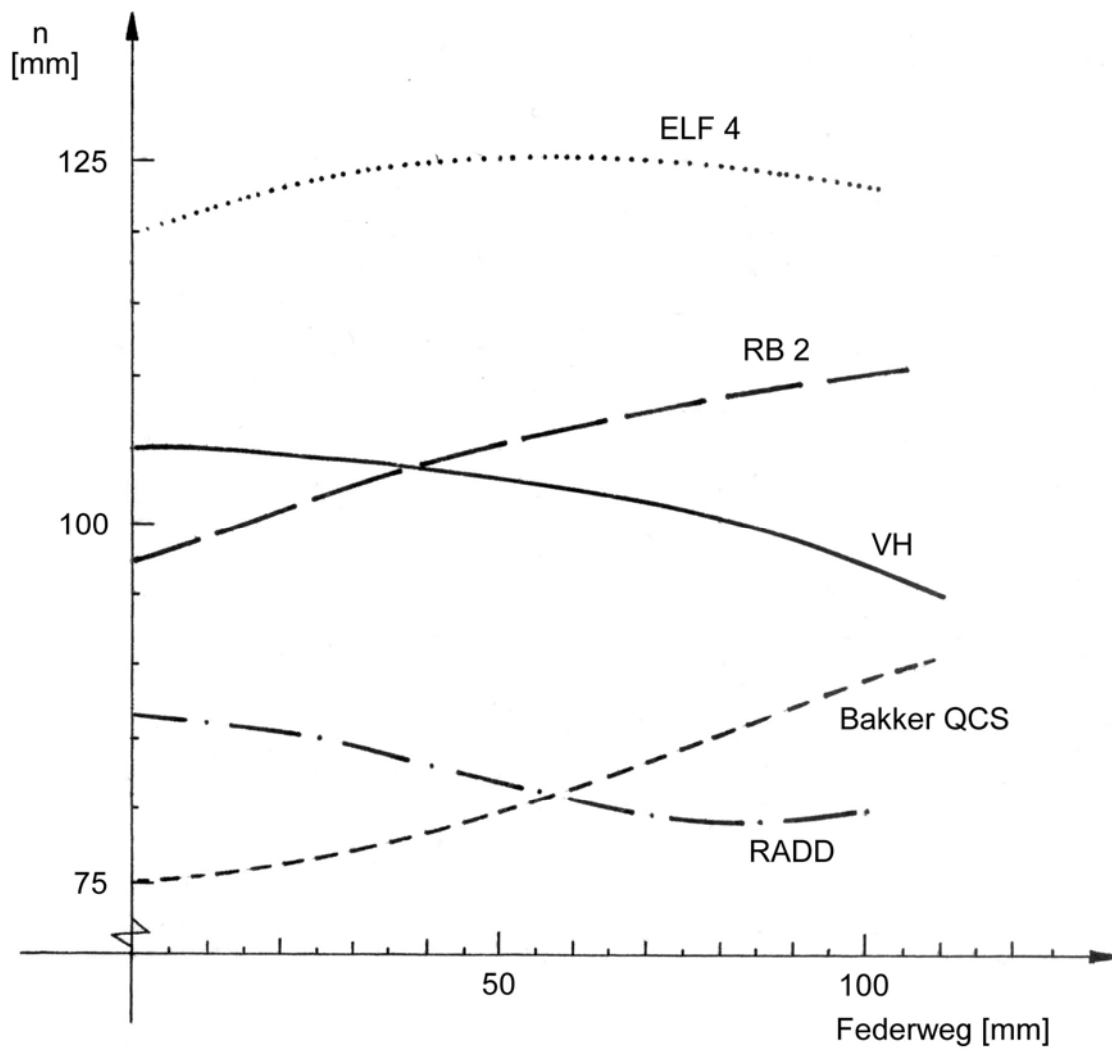
Die Strukturbelastung verhält sich etwa wie beim RB-Konzept, das jedoch, wie auch das Elf-System nicht die kinematischen Vorteile der VH-Konstruktion aufweist. Gegenüber der Doppellängslenkervariante, die die geringsten Strukturbelastungen am Fahrwerk zur Folge hat, besitzt diese Entwicklung demgegenüber kinematische Vorteile.

Da beim VH-Konzept der obere Längslenker zugleich das Lenkmoment überträgt, ist zudem der konstruktive Aufwand erheblich geringer. Zudem ist eine separate Variation von Einfederungs- und Bremsnickausgleichskinematik möglich.

Lenkwinkeländerung infolge Einfederung

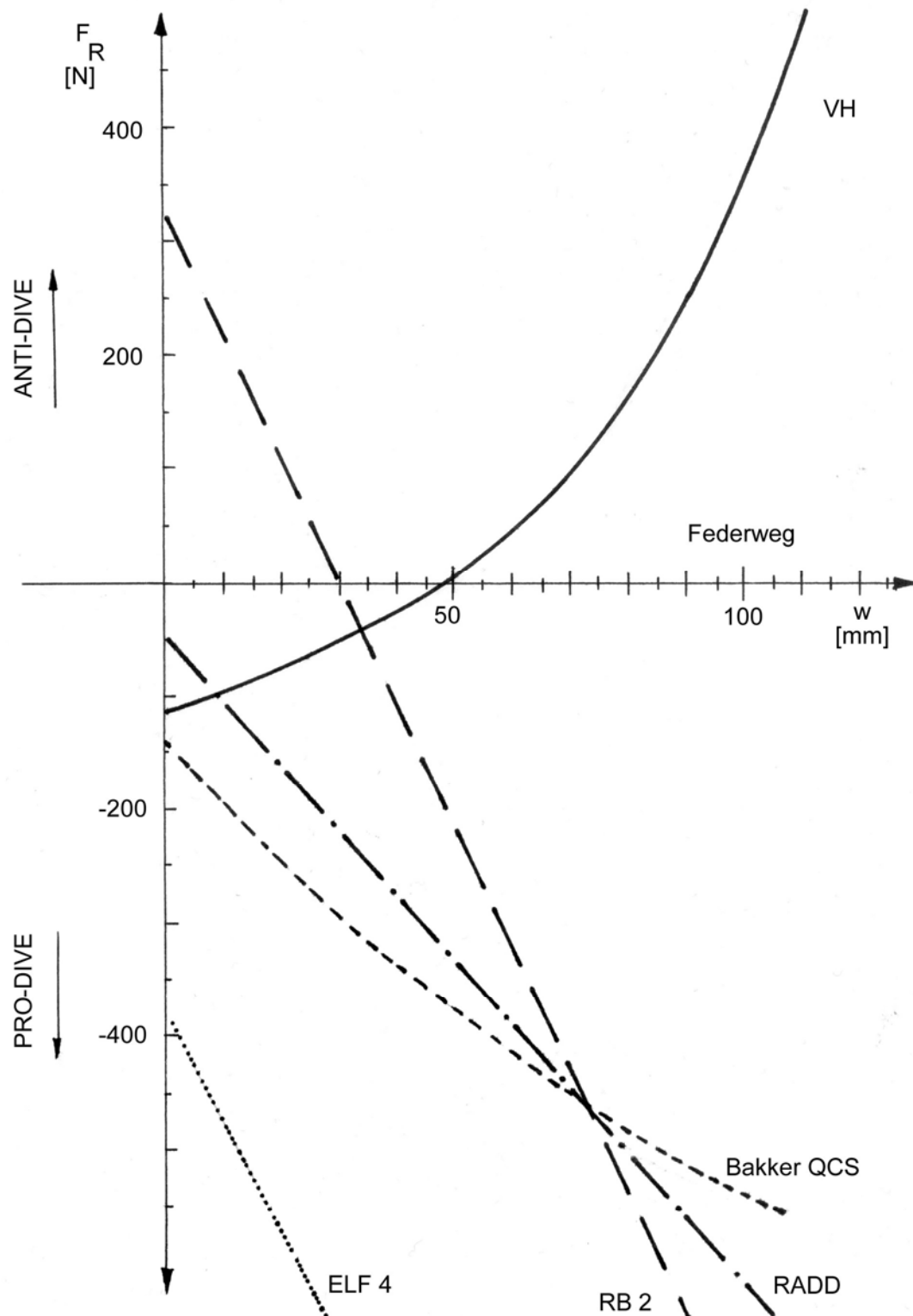


Nachlaufänderung infolge Einfederung



Abstützreaktionen infolge Bremskraft

mit $F_B = m \cdot a$; $M = 300 \text{ kg}$; $a = g$; $\Rightarrow F_B = 2943 \text{ N}$



Fazit

Die Forderung nach Lenkwinkelkonstanz erfüllen das RADD, VH und Elf 4-System am ehesten. Der Bakker Lenkwinkel wurde mit 70° im Ausgangszustand sehr steil gewählt, wohl um die starke Abnahme bei Einfederung zu kompensieren. Das RADD-System ist auf Lenkwinkelkonstanz ausgelegt. Elf 4-, RB und VH nehmen mehr oder weniger (VH und Elf 4- 1° , RB 2°) bei Einfederung ab.

Der Nachlauf des Bakker und RB Systems nimmt bei Einfederung stark zu. Das Elf 4 und das RADD Konzept besitzen einen relativ konstanten Nachlauf. Bei VH nimmt dieser Wert ab, um die erforderliche Lenkkraft bei zunehmender Einfederung in Grenzen zu halten. Der Vergleich der Abstützreaktionen infolge Bremskraft zeigt den progressiven Bremsnickausgleich des VH-Systems. Bei zunehmendem Einfederweg nimmt die der Einfederung entgegengerichtete Abstützkomponente der Längslenker überproportional zu. Bei allen anderen Systemen entsteht bei zunehmender Einfederung eine Zunahme der Abstützkräfte in Einfederrichtung. Das RB-System weist in der Ausgangslage einen Bremsnickausgleich auf, der jedoch bei zunehmender Einfederung abnimmt. Alle anderen Konzepte verfügen über keinen Bremsnickausgleich, weisen jedoch ein weitaus geringeres Bremstauchen als jede Teleskopgabelkonstruktion auf. In der Summe aller Eigenschaften stellt das VH-Achsschenkelkonzept die beste bekannte Lösung einer Vorderradaufhängung dar.