

## Zur Fahrstabilität von Motorrädern

Ein Motorrad oder Roller ist ein Einspurfahrzeug; die Räder stehen in einer Flucht zur Fahrtrichtung. Diese geometrische Anordnung bedingt, dass sich Einspurfahrzeuge – sobald sich ihr Schwerpunkt nicht exakt senkrecht über der gedachten Verbindungslinie der beiden Reifen-aufstandsflächen befindet – zur Seite neigen und umfallen können. Und trotzdem ist es möglich, dass wir mit diesem Fahrzeug fahren können – und dies nicht nur geradeaus.

Dieser Artikel soll aufzeigen, warum Motorradfahren funktioniert und welche physikalischen Mechanismen dahinterstehen. Dass in dieser Abhandlung mathematische Gleichungen genannt sind, soll Sie nicht irritieren, sondern lediglich zu einem besseren Verständnis der Zusammenhänge führen. Denn jede Gleichung kann meines Erachtens einen physikalischen oder technischen Sachverhalt besser ausdrücken als 1.000 Worte.

Betrachten wir zunächst die Geradeausfahrt, obwohl auch diese im eigentlichen Sinne nie ganz geradeaus erfolgt, sondern immer aus korrigierten Kurvenfahrten besteht.



Bild 1: Geradeausfahrt als korrigierte Schlangenlinie

Die nähere Betrachtung der Geradeausfahrt gibt zu erkennen, dass hierbei eine Überlagerung dreier physikalischer Phänomene vonstatten geht:

- **Das Prinzip der Massenträgheit des Fahrzeugs samt Fahrer,**
- **die Wirkung der Kreiselkräfte** und
- **das durch den Nachlauf erzeugte Rückstellmoment am Vorderrad.**



Institut für Zweiradsicherheit e.V.

Institut für Zweiradsicherheit e.V.  
Postfach 120 404  
45314 Essen

Tel.: 0201/83 53 9-0  
e-mail: [Info@ifz.de](mailto:Info@ifz.de)  
Internet: [www.ifz.de](http://www.ifz.de)

Autor: Dr.-Ing. Achim Kuschefski

Stand: 08/2010

Für eine genaue Erklärung bedarf es jedoch einen Exkurs in die Physik.

Das **erste Newtonsche Axiom (Trägheitsgesetz)** besagt:

*„Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, sofern er nicht durch eine äußere Kraft zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.“*

Damit ist gemeint, dass sich ein Körper ohne äußere Krafteinwirkung gar nicht oder immer mit der gleichen Geschwindigkeit und in die gleiche Richtung bewegen würde, die man ihm vorher gegeben hat. Dieses Axiom trifft bestenfalls in einem völligen Vakuum und in völliger Schwerelosigkeit zu. Da wir es jedoch auf unserem Planeten mit der Gravitation und der Reibung zwischen Fahrbahn und Reifen, dem Luftwiderstand, dem Seitenwind oder unebenen Fahrbahnzuständen (z.B. Spurrillen) zu tun haben, wirken ständig äußere Kräfte bzw. Einflüsse, die sowohl die Geschwindigkeit als auch die Bewegungsrichtung beeinflussen.

Was man jedoch aus diesem Gesetz ableiten kann, ist die Ihnen bekannte „träge Masse“. Diese begründet sich in dem **Impuls  $p$** , den jeder Körper mit seiner Masse  **$m$**  durch seine ihm verliehene Geschwindigkeit  **$v$**  erhält.

$$p = m \cdot v \quad [\text{kg} \cdot \text{m/s} = \text{N} \cdot \text{s}] \quad (\text{Gl. 1})$$

Dabei wirkt der Impuls  **$p$**  (siehe Bild 2) in die gleiche Richtung wie die Geschwindigkeit  **$v$** . Je größer die Masse  **$m$**  eines Fahrzeuges und/oder je höher die gefahrene Geschwindigkeit  **$v$** , umso größer wird der Impuls  **$p$**  dieses Fahrzeuges und umso geringer können sich äußere Krafteinwirkungen auf die Bewegungsrichtung („Massenträgheit“) auswirken. Deshalb ist es nur logisch, dass auch der Fahrer auf einem schweren Motorrad mit hoher Geschwindigkeit für eine Kurskorrektur oder zum Einleiten einer Kurve eine größere äußere Kraft aufwenden muss, um das Fahrzeug aus seiner momentanen Spur zu bekommen.

Schwere Motorräder bei hoher Geschwindigkeit fahren – vereinfacht ausgedrückt – am sichersten geradeaus, sofern fahrwerkstechnisch keine Mängel vorliegen! Jedoch lassen sie sich auch am schwierigsten vom Kurs abbringen, z.B. in eine Kurve „zwängen“.



Bild 2: Der Impuls beim Motorradfahren

Als ein sehr anschauliches Beispiel möchte ich hier das Motorradfahren bei Seitenwind anführen. Denn je schneller man fährt, umso geringer ist der Windeinfluss und somit die zu korrigierende Fahrlinie. Diese Tatsache darf nicht falsch verstanden werden und soll auch nicht zum schnellen Fahren bei Seitenwind anspornen. Denn Starkwinde oder Windböen sind hier nicht einkalkuliert und haben schon oft einen Motorradfahrer von der Strecke abgebracht!

Aus dem Impulserhaltungssatz und der Massenträgheit kann gefolgert werden, dass wenn immer die Geschwindigkeit  $v$  eines Körpers reduziert werden soll, eine Impulsübertragung  $\Delta p$  vonstatten gehen muss. Deshalb kann man die Kraft  $F$  auch als Impulsübertragung  $\Delta p$  pro Zeiteinheit  $\Delta t$  definieren.

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m \cdot \Delta v}{\Delta t} = m \cdot a \quad [\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2 = \text{N}] \quad (\text{Gl. 2})$$

In Gleichung 2 ist  $a$  die Beschleunigung [ $\text{m} / \text{s}^2$ ], die ihrerseits als Veränderung der Geschwindigkeit  $\Delta v$  [ $\text{m} / \text{s}$ ] pro Zeiteinheit  $\Delta t$  [ $\text{s}$ ] definiert ist.

Die nächste wichtige Größe, die hier näher beschrieben werden soll, ist der Einfluss von rotierenden Massen und hier im Speziellen der des Vorderrads. Denn für die Stabilisierung des Motorrades bei Geradeausfahrt spielt das Hinterrad eine eher untergeordnete Rolle.

Bei dieser Betrachtung muss man zwischen zwei physikalischen Phänomenen unterscheiden. Zum einen ist es die ebenfalls träge Masse eines rotierenden Rades, zum anderen der gyroskopische Effekt, der die sogenannten Kreiselkräfte hervorruft.

Ein Rad besitzt in Abhängigkeit von dessen Masse **m** und dessen Massenverteilung ein sogenanntes **Trägheitsmoment J**:

$$J = \sum_i (m_i * r_i^2) \quad [\text{kg} * \text{m}^2] \quad (\text{Gl. 3})$$

Hierbei ist **m** die Masse [kg] des jeweiligen Teilchens **i** und **r** der Abstand [m] dieser Masse **m<sub>i</sub>** von der Drehachse. Die Aufsummierung aller Einzel-Trägheitsmomente (Anzahl **i**) ergibt das Gesamt-Trägheitsmoment **J** (siehe Bild 3).

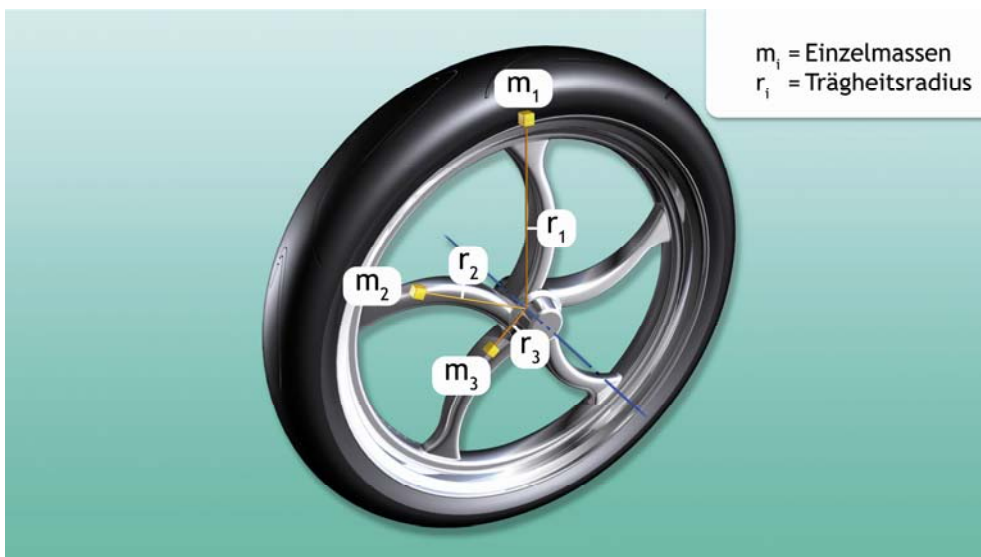


Bild 3: Berechnung eines Trägheitsmomentes

In Analogie entspricht ein Trägheitsmoment der Masse bei einer geradlinigen Bewegung, weshalb früher auch von der „Drehmasse“ gesprochen wurde. Das Massenträgheitsmoment ist somit eine Bezugsgröße, um feststellen zu können, wie schwer oder leicht es ist, die Drehbewegung eines Rades zu ändern.

Je näher ein Massenschwerpunkt an der Drehachse liegt, umso geringer fällt das Trägheitsmoment aus, da der Abstand **r** mit dem Quadrat in die Berechnung einfließt. Zu dem Trägheitsmoment des Rades kommen alle weiteren rotierenden Massen hinzu, die an diesem Rad befestigt sind. So sind dies z.B. beim Vorderrad der Reifen und die Bremsscheiben, wobei der Erstgenannte die größte Entfernung zur Drehachse hat und somit das Gesamt-Trägheitsmoment massiv beeinflusst.

Dieser Effekt lässt sich besonders leicht beim Fahren eines Pkw beobachten, der z.B. serienmäßig 17“-Räder besitzt und auf 18“- oder 19“-Räder umgerüstet wurde. Das Fahrzeug wirkt behäbig bzw. träge. Und dies nicht nur beim Beschleunigen, sondern auch beim Bremsen. Der Grund ist einfach: Bei jeder Veränderung der Geschwindigkeit müssen die Massen der rotierenden Räder ebenfalls beschleunigt oder verzögert werden. Den gleichen Effekt kann man aber auch beim Umbau auf Breitreifen feststellen, obwohl der Felgendurchmesser konstant blieb. Denn hier wurde die Masse unter Beibehaltung des radialen Abstandes in Achsrichtung erhöht.

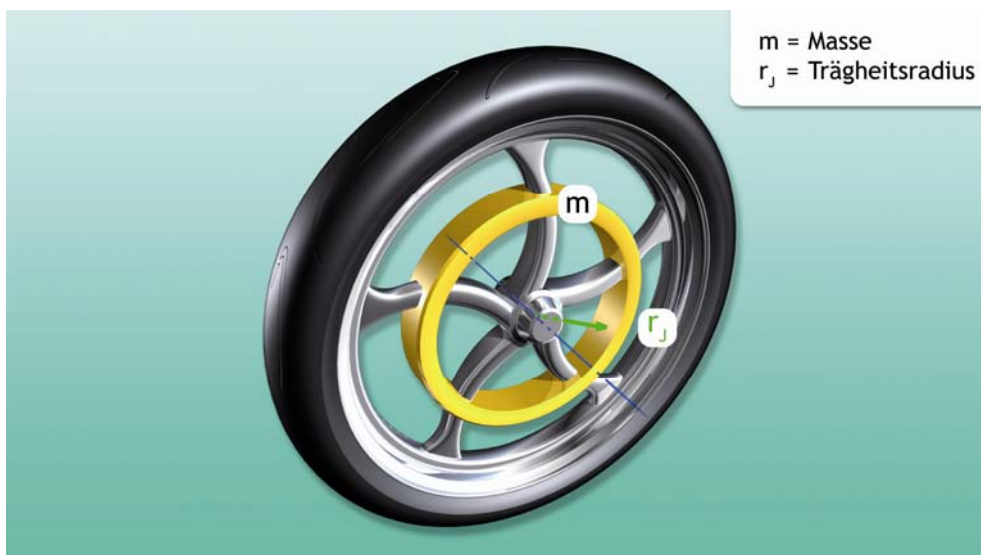


Bild 4: Ersatz-Trägheitsmoment  $J$  als Hohlzylinder mit Trägheitsradius  $r_j$

Zur Veranschaulichung wurde in Bild 4 das Rad-Trägheitsmoment durch einen Hohlzylinder (hier gelb) mit einer Masse  $m$  und einem Trägheitsradius  $r_j$  dargestellt. Man kann sich nun gut vorstellen, dass das Trägheitsmoment anwächst, je größer der Hohlzylinder werden würde und dass es umso schwieriger wäre, das Rad in Drehung zu versetzen.

In Analogie zu einer linearen Bewegung errechnet sich bei einer Rotation der **Drehimpuls  $L$**  aus dem Trägheitsmoment  $J$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ] und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  [ $\text{rad/s}$ ]:

$L = J \cdot \omega$

[ $\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}$ ]      (Gl. 4)

An Gleichung 4 erkennt man sehr gut, dass sich der Drehimpuls („Drall-/Schwungenergie“) mit zunehmendem Trägheitsmoment  $J$  und/oder zunehmender Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  erhöht.

Im Übrigen berechnet sich die Raddrehzahl bei einem Vollkreis zu:  
 $n = \omega / 2\pi$  mit der Dimension [1/s].

Die Wirklinie bzw. die Richtung des Drehimpulses liegt in der Radachse (siehe Bild 5).

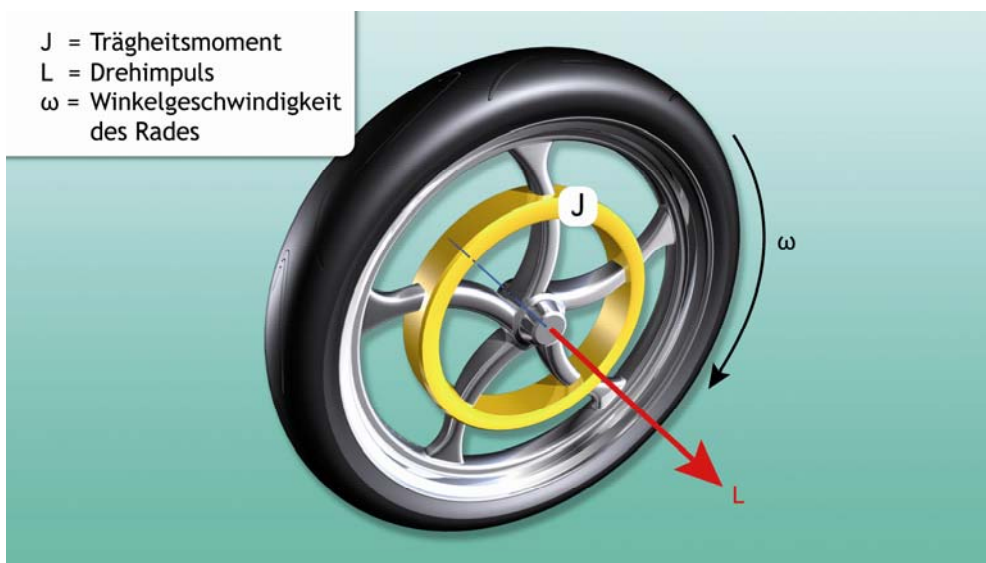
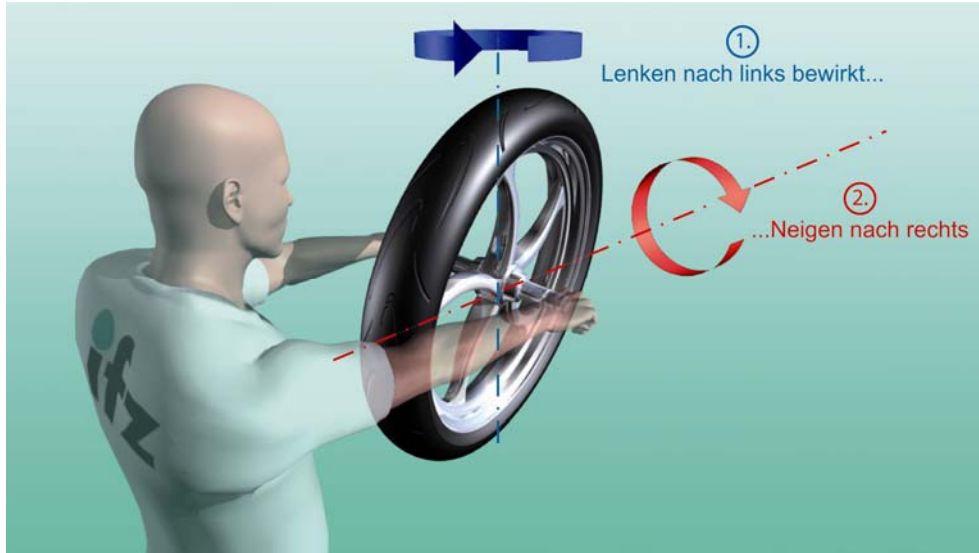


Bild 5: Der Drehimpuls L

Neben dem Drehimpuls kommt jetzt noch eine physikalische Besonderheit zum Tragen: **Der gyroskopische Effekt**, der auch als *Kreiseffekt* bekannt ist und der von der Höhe des Drehimpulses abhängt.

Hält man sich z.B. ein drehendes Rad (Laufriktion nach vorn) an seiner Drehachse vor die Brust und versucht dieses wie ein Vorderrad um die senkrechte Lenkachse z.B. nach links zu drehen, so bemerkt man, dass das Rad nach rechts kippen möchte. Dieses Kippen ist ein Zeichen dafür, dass ein *Reaktions-Drehmoment* entsteht, welches um die dritte noch zur Verfügung stehende Achse wirkt. Dieser Effekt wird auch als „**Präzession**“ bezeichnet und lässt sich durch das Streben nach der Drehimpulserhaltung erklären (siehe Bild 6).



**Bild 6: Präzession als Wirkung der Kreiselkräfte;**  
Lenken nach links bewirkt eine Neigung nach rechts.

Die Achse, um die dieses Drehmoment wirkt, liegt sowohl orthogonal (mit 90°-Winkel) zur Rotationsachse (waagerechte Radachse) als auch zu der hier senkrechten Lenk-/Drehachse. Das Reaktions-Drehmoment wirkt also um die waagerechte Längsachse in Radlaufrichtung. Das dabei auftretende **Drehmoment  $M_P$**  lässt sich wie folgt berechnen:

$$M_P = L * \omega_L$$

$$[\text{kg} * \text{m}^2 / \text{s}^2 = \text{Nm}] \quad (\text{Gl. 5})$$

Mit:  $\omega_L$  als Winkelgeschwindigkeit der Lenkbewegung in [rad/s].

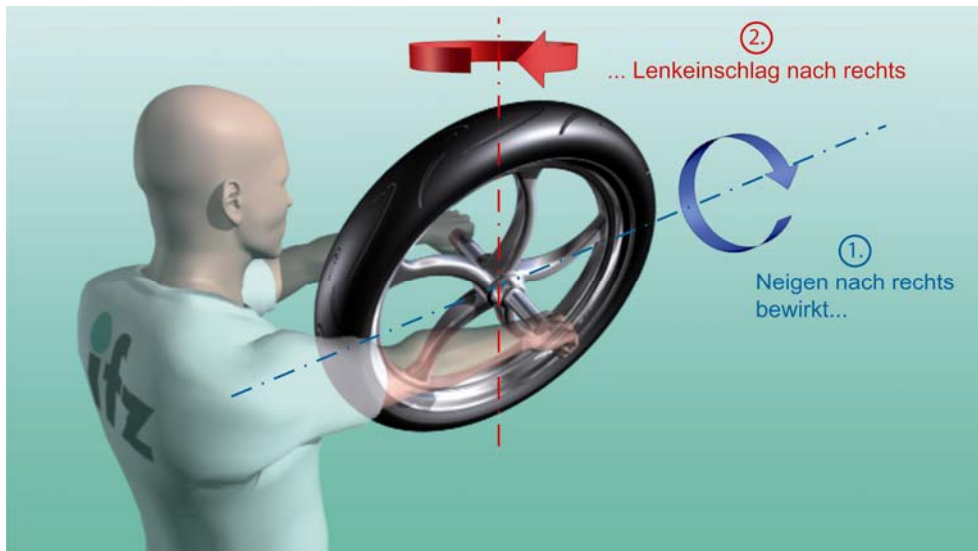
An Gleichung 5 erkennt man sehr gut, dass das Reaktions-Drehmoment sowohl von der Höhe des Drehimpulses  $L$  als auch von der Lenkgeschwindigkeit  $\omega_L$  abhängt. Zur Erinnerung: Die Höhe des Drehimpulses ist abhängig vom Trägheitsmoment und von der Winkelgeschwindigkeit des Rades!

Zusammengefasst bedeutet diese Erkenntnis, dass mit zunehmendem Rad-Trägheitsmoment, zunehmender Raddrehzahl und/oder zunehmender Lenkgeschwindigkeit dieses Reaktions-Drehmoment  $M_P$  zwangsläufig wächst.

Im Übrigen wirkt dieser Effekt auch beim Gegenlenkimpuls, also dem Einleitvorgang für eine Kurvefahrt, mit dem Ziel, das Motorrad relativ schnell in Schräglage zu bringen. Allerdings spielt dabei diese hier beschriebene Präzession – wegen des geringen Lenkwinkels – nur eine untergeordnete Rolle.

Der gyroskopische Effekt hat aber auch noch andere Auswirkungen, die auf das Motorradfahren stabilisierend wirken. Und zwar sollten Sie jetzt das drehende Rad, genau wie vorher beschrieben, wieder vor Ihrer Brust halten. Wenn Sie dann das Rad nach rechts zur Seite neigen, also in eine rechte Schräglage versetzen, merken Sie, dass das Rad automatisch auch nach rechts lenken möchte (siehe Bild 7).

Im Grunde genommen wirkt hier das gleiche Reaktions-Drehmoment, allerdings jetzt um die senkrechte Lenkachse, weil die von Ihnen eingeleitete Störkraft um die waagerechte Radlängsachse erfolgte. Die Wirkung des Drehmomentes kann man anhand einer Drei-Finger-Regel genau vorhersagen. Auf dessen Erklärung zur Anwendung möchte ich an dieser Stelle jedoch verzichten.



**Bild 7: Präzession als Wirkung der Kreiselkräfte;  
Neigen nach rechts bewirkt Lenken nach rechts.**

Dieses soeben beschriebene Vorderradverhalten macht es uns relativ einfach, ab einer gewissen Geschwindigkeit freihändig mit einem Einspurfahrzeug zu fahren bzw. es zu korrigieren. Denn durch den automatischen Lenkeinschlag in die gleiche Richtung wie die bereits eingenommene Schräglage richtet sich das Motorrad wieder auf. Grund: Der Lenkeinschlag wirkt jetzt als Störgröße und das in Versuch 1 (siehe Bild 6) beschriebene Reaktions-Drehmoment wird neu erzeugt. Beide Mechanismen wechseln sich gegenseitig ab und erzeugen sich auch gegenseitig. Beim Motorradfahren kommt noch unterstützend hinzu, dass sobald Schräglage und somit eine Kurvenbahn gefahren wird, die Fliehkraft das Fahrzeug samt Fahrer aufrichten möchte.





Institut für Zweiradsicherheit e.V.

Institut für Zweiradsicherheit e.V.  
Postfach 120 404  
45314 Essen

Tel.: 0201/83 53 9-0  
e-mail: [Info@ifz.de](mailto:Info@ifz.de)  
Internet: [www.ifz.de](http://www.ifz.de)

Autor: Dr.-Ing. Achim Kuschefski

Stand: 08/2010

Die hier genannten physikalischen Mechanismen bedingen jedoch eine gewisse Raddrehzahl und somit Geschwindigkeit, weshalb man auch von „**dynamischer Stabilität**“ oder von einem „**dynamischen Gleichgewicht**“ spricht. Im Stand oder bei langsamer Fahrt befindet sich das Fahrzeug in einem labilen Gleichgewicht, weil es nur durch ständige Kurskorrekturen vom Fahrer vor dem Umfallen geschützt wird. Impuls und Drehimpuls sind zu gering, als dass sie eine stabilisierende Wirkung ausüben könnten.

In dieser Situation, also im Stand oder bei sehr langsamer Fahrt, können jedoch andere Drehimpulse hilfreich sein: Und zwar die des Motors, sofern Ihr Motor eine quer zur Fahrtrichtung eingebaute Kurbelwelle hat. In Abhängigkeit von der Motordrehzahl bewirken sie eine merkbare Unterstützung bei der Stabilisierung des Motorrades. Als Gegenbeispiel möchte ich die längs eingebauten Kurbelwellen bei einem Boxer- oder V-Motor nennen. Gibt man hier im Stand oder bei geringer Geschwindigkeit mit gezogener Kupplung Gas, so neigt sich das Motorrad zur Seite, wodurch diese Drehimpulse destabilisierend wirken. Bei einer quer zur Fahrtrichtung eingebauten Kurbelwelle addieren sich die Drehimpulse von Motor und Rädern, sofern sie die gleiche Laufrichtung haben. Dreht die Kurbelwelle entgegen der Drehrichtung der Räder, vermindert sie den Gesamt-Drehimpuls. Den soeben genannten Antriebs-Drehimpuls kann man auch während der Fahrt deutlich merken. Er unterstützt die Trägheit des gesamten Fahrer-Fahrzeug-Systems, weshalb beim schnellen Befahren von Wechselkurven ein zusätzlicher Kraftaufwand vom Fahrer erforderlich ist. Diese negative Erscheinung ist neben der Leistungssteigerung der zweite Grund, warum bei Rennmaschinen alle rotierenden Massen von den Ingenieuren auf ein Minimum reduziert werden.

Das dritte physikalische Phänomen, welches beim Motorradfahren geradeaus stabilisierend wirkt, ist das durch den Nachlauf erzeugte Rückstellmoment am Vorderrad (siehe Bild 9). Um dieses jedoch zu verstehen, müssen wir vorab einige technische Definitionen klären.

Das Wort „**Nachlauf**“ begründet sich in der Tatsache, dass der Reifenaufstandspunkt (siehe Bild 8) dem Schnittpunkt der gedachten Linie durch die Lenkachse (Mittellinie der Lenkkopflager) mit der Fahrbahnoberfläche hinterher eilt; der Reifenaufstandspunkt, der sich senkrecht unter der Radachse befindet, also „nachläuft“. Je flacher eine Vorderradgabel aufgehängt (z.B. beim Chopper) und je größer der Vorderraddurchmesser ist, umso größer wird auch der Nachlauf  $l_N$ .

Der **Lenkkopfwinkel**  $\varphi$  ist der Winkel zwischen der gedachten Linie durch die Lenkachse und der Senkrechten. Aber auch die Angabe des Winkels zwischen der Fahrbahnoberfläche und der gedachten Linie durch die Lenkachse ist zulässig.

Üblicherweise haben Motorräder ihre Radachse vor der Lenkachse, weshalb neben dem Lenkkopfwinkel auch der **Gabelbrückenversatz**  $l_G$  einen Einfluss auf die Größe des Nachlaufs hat. Dieser ist das Lot-Maß zwischen der in Bild 8 rot gekennzeichneten Lenkachse und der Mittellinie der Teleskopgabel, sofern die Radaufhängung mittig in dieser ohne zusätzlichen Versatz angebracht ist (heute übliche Aufhängung).

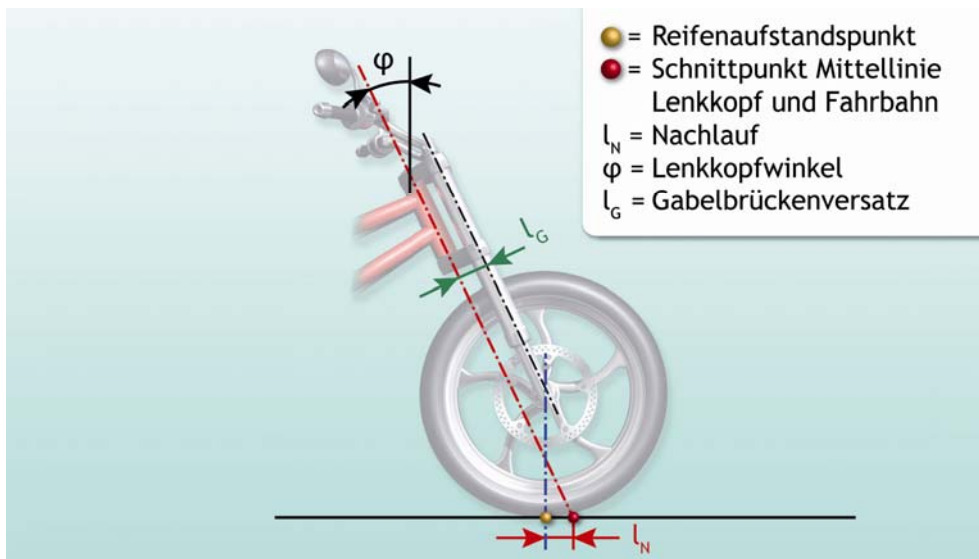


Bild 8: Einfluss von Lenkkopfwinkel und Gabelbrückenversatz auf den Nachlauf

Die Fahrwerksauslegung mit Nachlauf bewirkt, dass sich mit jedem Lenkausschlag  $\alpha$  (siehe Bild 9) der Reifenauflandpunkt auf einer Kreisbahn hinter dem und um den gedachten Schnittpunkt (Mittellinie des Lenkkopflagers und der Fahrbahn) bewegt. Der sich hierdurch ergebende Versatz zur Fahrzeuginnenachse bildet somit einen Hebelarm  $l$ , der seinerseits durch die im Reifenauflandpunkt angreifenden Kräfte ein Drehmoment um die Lenkachse erzeugt.

Wird der Lenker z.B. nach links eingeschlagen (der Reifenauflandpunkt verschiebt sich gegenüber der Fahrzeuginnenachse nach rechts), so erzeugen die im Reifenauflandpunkt wirkenden Brems- und/oder Rollwiderstandskräfte  $F_R$  (sie wirken entgegen der Fahrtrichtung!) ein rechtsdrehendes Moment um die Lenkachse; das sogenannte **Rückstellmoment**  $M_R$ . Einfacher gesagt: Der Lenker stellt sich wieder automatisch „zurück“ in die Geradeaus-Stellung.

$$M_R = F_R \cdot l$$

[Nm] (Gl. 6)

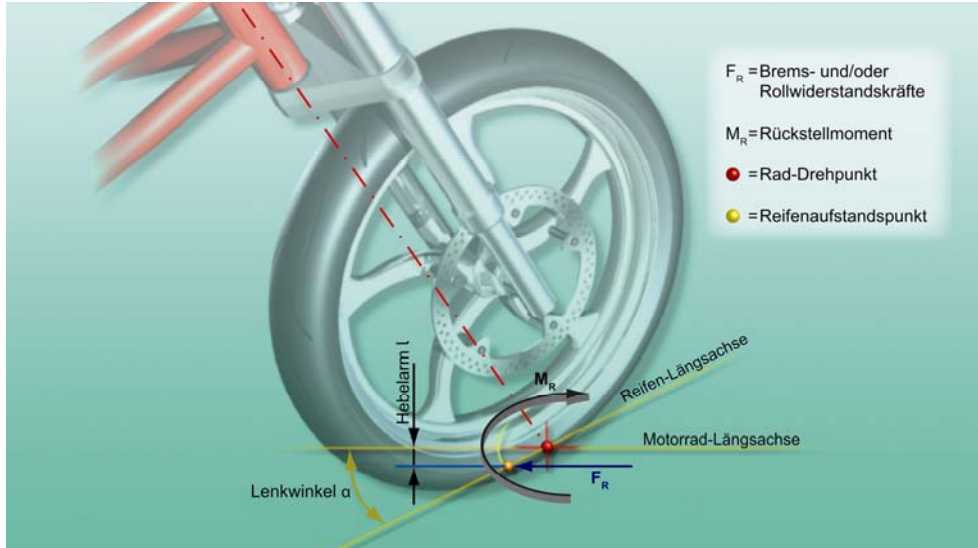


Bild 9: Geradeauslauf-Stabilisierung durch Rückstellmoment

Da mit zunehmendem Nachlauf  $l_N$  bei identischem Lenkwinkel  $\alpha$  der Hebelarm  $l$  größer wird, vergrößert sich auch das Rückstellmoment  $M_R$  und somit die Geradeauslauf-Stabilität. Diese Erscheinung lässt sich sehr gut bei Choppern mit großem Nachlauf erfahren, bei denen z.B. Wende- oder Ausweichmanöver – trotz breiter Lenker – mit sehr großer Kraftanstrengung am Lenker vollzogen werden müssen.

Aber auch die Vorderradlast hat einen Einfluss auf das Rückstellmoment, denn die Größe der Brems- und/oder Rollwiderstandskräfte  $F_R$  sind sowohl von der Normalkraft  $F_N$  als auch dem Kräfteschluss  $\mu$  anhängig (siehe Artikel „Grip“). Geringe Vorderradlasten erzeugen somit auch geringe Rückstellmomente. Diese Erkenntnis sollte vor allem bei der Beladung des Motorrads mit Gepäck und Sozia bedacht werden!

Geradeauslauf-Stabilität und Handlichkeit sind bekanntermaßen divergente Ziele. Von daher legt jeder Hersteller die geometrischen Fahrwerksmaße aufgrund von Erfahrungswerten und Versuchen fest. Folgende Bereiche von Lenkkopfwinkel und Nachlauf sind heutzutage in den verschiedenen Fahrzeugkategorien anzutreffen:

	Lenkkopfwinkel $\phi$ [Grad]*	Nachlauf $l_N$ [mm]
Chopper:	56 - 58	147 - 152
Tourer:	25 - 32	104 - 129
Naked Bike:	23 - 31	84 - 148
Sportler:	23 - 26	92 - 110

\* aus der Senkrechten gemessen

Anhand dieser Zahlenwerte ist tendenziell ersichtlich, dass mit zunehmender Fahrzeug-Agilität (Handlichkeit) sowohl der Lenkkopfwinkel als auch der Nachlauf abnehmen.

### **Wir fassen zusammen:**

Einspurfahrzeuge erfahren erst durch die Geschwindigkeit bzw. Dynamik eine Eigen-Stabilisierung. Im Stillstand oder bei sehr langsamer Fahrt sind sie labil oder besser gesagt: instabil! Diese Instabilität kann nur durch den Regler *Mensch* durch ständiges Ausbalancieren in ein labiles Gleichgewicht überführt werden.

Da die translatorische Massenträgheit (Bewegung in eine Richtung) bzw. der **Impuls  $p$**  neben der gefahrenen Geschwindigkeit von der Gesamtmasse des Motorrades samt Fahrer ( $m_M + m_F$ ) abhängt, ist es für Anfänger, unerfahrene und/oder körperlich „zierliche“ Piloten von Vorteil, ein Fahrzeug mit einem niedrigen Gewicht zu wählen. Dieses lässt sich deutlich einfacher als ein schweres Motorrad durch Kurven bewegen; auch gehen Ausweichmanöver viel leichter von der Hand – und dies ohne irgendwelche Abstriche bei der Geradeausstabilität! Hinzu kommt das vorteilhafte Handling im Stand oder bei sehr langsamer Fahrt. Überdenken sollten Sie diesen entscheidenden Vorteil in jedem Fall bei Ihrem nächsten Motorradkauf.