



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
Internet: www.ifz.de

Autor: Dr.-Ing. Achim Kuschefski

Stand: 01/2010

Zur Kurventechnik: „Druck auf die äußere Fußraste“ – Zwischen Märchen und Wahrheit

In Büchern und auch im Internet ist immer wieder davon zu lesen, dass man allein durch Druck auf die äußere Fußraste die „Haftreibung“ zwischen Reifen und Fahrbahn bzw. den Grip beim Durchfahren von Kurven und beim Herausbeschleunigen verbessern könnte. Leider werden bei diesem technischen Zusammenhang in der Regel Dinge miteinander verwechselt und somit völlig falsch interpretiert.

Dieser Artikel wurde durch mehrere Anfragen bei uns zum selbigen Thema initiiert und soll zur allgemeinen Aufklärung beitragen, aber auch die landläufigen (Fehl-)Interpretationen widerlegen.

Um der Sache auf den Grund zu gehen, müssen wir drei Sachverhalte voneinander getrennt betrachten. Zum einen ist es die Frage, ob der Fahrer alleinig durch Muskelkraft eine zusätzliche Kraft statisch erzeugen kann, ohne jedoch dabei seine Körperposition und damit andere Parameter zu verändern. Zum anderen muss geklärt werden, ob eventuell Bewegungen des Fahrers und somit dynamische Prozesse eine Rolle spielen. Und drittens: Welchen Einfluss haben die geometrischen Verhältnisse der Fußrasten beim „Druck auf die Raste“?

Zunächst sollten wir uns noch einmal klar machen, was Reibung, Kraftschlusspotential und Grip bedeuten.

Grundsätzlich gilt, dass das Kraftschlusspotential (Haftreibung) zwischen Reifen und Fahrbahn nur durch folgenden Zusammenhang bestimmt wird (Näheres siehe Artikel „Grip“):

$$\mu_{L,S} = \frac{F_{L,S}}{F_N} \quad (\text{Gl. 1}) \quad \text{oder umgeformt} \quad F_{L,S} = \mu_{L,S} \cdot F_N \quad (\text{Gl. 2})$$

Mit:

- μ als Kraftschlussbeiwert in L = Längsrichtung und S = Seitenrichtung [-]
- F als Reibkraft in L = Längs- und S = Seitenrichtung
[N = Newton = kg·m/s²]
- F_N als Radaufstandskraft (Normalkraft im Latsch) in der Vertikalen [N]

Schaut man auf die Gleichung 2, so wird klar, dass bei einer fest vorgegeben Reibpaarung (Reifen – Zwischenmedium – Fahrbahnbelag, $\mu = \text{konstant}$) die Reibkraft $F_{L,S}$ lediglich von der Normalkraft F_N abhängt, die sich ihrerseits errechnet zu:

$$F_N = m \cdot g \quad (\text{Gl. 3})$$

Mit:

m als Masse des Körpers [kg]

g als Gravitationsbeschleunigung = konstant = 9,81 [m/s²]

Da auch die Erdbeschleunigung konstant ist, ist die Reibkraft $F_{L,S}$ alleinig von der Variablen **m**, also der Masse des Körpers, abhängig.

$$F_{L,S} = m \cdot (\mu_{L,S} \cdot g) \quad (\text{Gl. 4})$$

Der Übersichtlichkeit halber wurden die Konstanten in Klammern gesetzt.

Ein Mathematiker würde sagen: Die Reibkraft **F** ist proportional zur Masse **m**. Proportional deshalb, weil alle Faktoren – außer die Masse **m** – in unserem betrachteten Fall konstante, nicht beeinflussbare Werte haben.

Obige Formeln zeigen, dass bei einem vorgegebenen Kraftschlusspotential μ_{\max} (maximaler Kraftschlussbeiwert bei einer Reifen-Fahrbahn-Kombination, z.B. $\mu = 0,8$ für eine griffige Landstraße) die Reibkraft **F** proportional mit der Radaufstandskraft F_N (Normalkraft) ansteigt.

Dieser Zusammenhang macht auch deutlich, dass schwere Motorräder (z.B. Tourer) genau so stark bremsen können wie leichtere, denn bei identischem μ steigt die mögliche Reibkraft **F** direkt mit der Radaufstandskraft F_N an. Vorausgesetzt: Das schwerere Motorrad hat eine entsprechend gute Bremsanlage und die gleiche Reifenqualität.

Betrachten wir nun die Kurvenfahrt, bei der sowohl Seitenführungskräfte als auch Längskräfte übertragen werden müssen.

Professor Kamm (Kammischer Kreis) ist es zu verdanken, dass er die Abhängigkeit zwischen den Längs- und Seitenführungskräften von Reifen untersucht und diese mit Hilfe der Mittelpunktsleichung des Kreises beschrieben hat.

Hierzu lautet die allgemeine Gleichung:

$$F_R^2 = F_S^2 + F_L^2 \quad (\text{Gl. 5}) \quad \text{oder umgeformt}$$

$$F_R = \sqrt{F_S^2 + F_L^2} \quad (\text{Gl. 6})$$



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
Internet: www.ifz.de

Autor: Dr.-Ing. Achim Kuschefski

Stand: 01/2010

Mit:

- F_R als Gesamtreibkraft [N]
- F_S als Seitenführungskraft [N]
- F_L als Längskraft (Bremsen/Beschleunigen) [N]

Gleichung 6 besagt, dass sich die Gesamtreibkraft F_R , die der in Gleichung 4 genannten Reibkraft $F_{L,S}$ entspricht, nach einer mathematischen Beziehung in eine Seitenführungs- und eine Längskraft aufteilt.

Je mehr Seiten- oder Querbeanspruchung durch Lenkausschlag und/oder Schräglage gefordert wird, umso geringer fällt der mögliche Längskraftschluss für Brems- oder Beschleunigungskräfte aus; – und umgekehrt.

Bezogen auf unsere Fragestellung heißt dies, dass in einer momentanen Schräglage mit einer daraus erforderlichen Seitenführungskraft F_S nur mehr Vortriebskraft (Beschleunigung) und damit nur mehr Reibkraft in Längsrichtung F_L erreicht werden kann, wenn auch mehr Gesamtreibkraft F_R zur Verfügung steht. Aber hierfür müsste man nach Gleichung 4 eine höhere Masse m erzeugen.

Hmm ... – oder eine zusätzliche Kraft, die die Normalkraft F_N erhöht.

Wie kann ich nun die Normalkraft bzw. den Grip erhöhen?
Durch eigene Muskelkraft? Durch Drücken auf die äußere Raste?

Einen anschaulichen Selbstversuch sollten Sie deshalb auf einer Personenwaage (Federwaage!) durchführen. Nehmen wir einmal an, dass Sie 80 kg in stehender Position auf die Waage bringen. Gehen Sie jetzt vorsichtig und langsam etwas in die Hocke und strengen dann Ihre Oberschenkel richtig stark an, so als wenn Sie unten Druck ausüben wollten; jedoch ohne sich zu bewegen!

Das Ergebnis wird wiederum 80 kg betragen. Ernüchterung?

Wir stellen fest: **Ohne eine Veränderung des Körperschwerpunktes lässt sich durch die alleinige Muskelkraft keine zusätzliche vertikale Kraft erzeugen.**

Doch wie können wir den Druck und damit den Grip erhöhen? Holen Sie sich hierzu einen Besenstiel oder eine Stange. Nun stellen Sie sich wieder auf die Waage; sie wird 81 kg zeigen, sofern Sie noch 80 kg und der Stiel 1 kg wiegen. Jetzt drücken Sie mit dem Stiel unter die Decke und können wahrscheinlich 90 oder vielleicht sogar 100 kg auf der Waage ablesen. Super, endlich Grip! Aber dieses Beispiel bedingt, dass Sie sich irgendwo nach oben abstützen müssen. Grip also nur im Tunnel oder kurzzeitig unter einem Laternenmast?

Ich denke, dass dieses ausführliche Beispiel gezeigt hat, dass wir statisch unsere eigene Körpermasse und damit die Gewichtskraft nicht alleinig durch Muskelanspannung ohne ein Gegenlager nach oben, welches auf dem Motorrad nicht existiert, erhöhen können.



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
Internet: www.ifz.de

Autor: Dr.-Ing. Achim Kuschefski

Stand: 01/2010

Doch nun zu einem weiteren Versuch. Stellen Sie sich hierzu wieder auf die Personenwaage.

Gehen Sie leicht in die Hocke, achten Sie auf die Anzeige, und beschleunigen nun Ihren Oberkörper durch Strecken der Beine nach oben. Mit anderen Worten: Sie kommen aus der Hocke wieder hoch. Konnten Sie in der Hocke noch 80 kg (obiges Beispiel) ablesen, so waren es beim Aufwärtsbeschleunigen wahrscheinlich 90, 100 oder mehr Kilogramm.

Grund: Wenn der eigene Körperschwerpunkt durch Muskelkraft nach oben beschleunigt wird (Dynamik), entsteht unter den Fußsohlen kurzzeitig (einige Millisekunden) eine höhere Kraft, als dies durch das Eigengewicht (Masse m) und die Erdbeschleunigung g zu erreichen ist.

Das heißt, dass neben dem Eigengewicht bzw. der Gewichtskraft ($F = m \cdot g = 80 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$) eine zusätzliche Kraft vom Betrag $F_a = m \cdot a$ durch die Aufwärts-Beschleunigung a aufgetreten ist.

In Summe lässt sich somit eine Gesamtkraft F_{ges} von

$$F_{\text{ges}} = m \cdot (g + a) \quad (\text{Gl. 7})$$

mit der Überlagerung zweier unterschiedlicher Beschleunigungen g und a ermitteln.

Super, endlich besserer Grip! – Aber leider nur für ein paar Millisekunden.

Im schlimmsten Fall würde diese eigene Körperbewegung zum Abspringen vom Motorrad und damit zur 100%-igen Gewichtsreduzierung durch den Fahrer führen. Jetzt haben wir ja oben festgestellt, dass nur durch das Aufbringen einer zusätzlichen Kraft auch eine Zunahme von Reibkräften möglich ist. Eine Abnahme ist damit kontraproduktiv! Ganz zu schweigen von der Tatsache, dass der Fahrer sein Fahrzeug verlassen würde. Ein schmerzlicher Verlust!

Aber stellen wir uns vor, wir würden unseren Körper nur so stark und so weit nach oben beschleunigen, dass wir gerade die Fußraste nicht verlassen; die Sitzbank mit dem Gesäß sehr wohl. Anders würde eine Beschleunigung des eigenen Körpers mit einer gewissen Auswirkung auf die Normalkraft auch nicht funktionieren.

Die körpereigene und durch Muskelkraft erzeugte Beschleunigung würde dann ebenfalls für ein paar Millisekunden zu einer erhöhten Normalkraft und zu mehr Grip führen. Aber wie immer im Leben hat auch dieses Phänomen eine „Kehrseite der Medaille“.

Denn nach dem Umkehrpunkt, bei dem der eigene Körperschwerpunkt im Hochpunkt (höchster erreichter Punkt) wieder in Richtung Erde fällt, reduziert sich die erreichte Normalkraft in der Fußraste und fällt sogar unter die normale Gewichtskraft.

Diesen Sachverhalt können Sie ebenfalls auf der Personenwaage nachvollziehen, indem Sie sich aus dem Stand durch Entspannen der Beinmuskeln einfach etwas nach unten fallen lassen. Der Körpermasseschwerpunkt wird dabei durch die Erdanziehung nach unten beschleunigt; die Reaktionskraft



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
Internet: www.ifz.de

Autor: Dr.-Ing. Achim Kuschefski

Stand: 01/2010

unter den Fußsohlen sinkt und die Waage zeigt während des „Fallenlassens“ einen geringeren Betrag an. In Abhängigkeit von der Wirksamkeit des „Fallenlassens“ sind es vielleicht 70, 60 oder sogar weniger Kilogramm, die die Waage anzeigt. In jedem Fall ist es weniger, als Sie statisch durch Ihr Körpergewicht auf die Waage bringen.

Diesen Effekt des Unterschreitens der eigenen Körperkraft kann man allerdings umgehen, indem der Fahrer aus seinem Hochpunkt wieder sehr langsam ohne merkliche Beschleunigung auf seine Sitzbank zurückkehrt. Aber dies würde dauern.

Hierin kann also nicht die Erklärung für die Erzeugung von mehr Grip liegen. Zumal diese Auf- und Abwärtsbewegung eines Fahrers, der diese Technik mit dem „Druck auf die äußere Raste“ praktiziert, deutlich sichtbar sein müsste.

Als dritte und letzte mögliche Erklärung wollen wir den Einfluss der außermittigen Fußrasten untersuchen.

Lassen Sie uns den Dingen etwas näher auf den Grund gehen.

Zu diesem Zweck habe ich für ein und dasselbe Motorrad in Abhängigkeit des Fahrstils „**Legen**“ und „**Drücken**“ die bei der Kurvenfahrt auftretenden Kräfte und die erforderliche Motorrad-Schräglage unter Berücksichtigung der Reifenbreite und der Einfederwege berechnet. Denn gerade beim Fahrstil „**Drücken**“ (Motocross oder Supermoto) wird die Fahrtechnik „Druck auf die Raste“ gerne angewendet.

Folgende Parameter wurden zugrunde gelegt:

Motorrad:

Masse **m**: 196 kg
Schwerpunktshöhe: 520 mm
Sitzhöhe: 845 mm
Reifenbreite: 180 mm
Hebelarm der Fußraste **a**: 250 mm

Fahrer:

Masse **m**: 80 kg
Größe: 1,8 m
Fahrstil „**Legen**“: in einer Flucht mit Motorradachse
Fahrstil „**Drücken**“: 200 mm Gesäßversatz und 8° seitliche Oberkörperneigung

Fahrzustand:

Kurvengeschwindigkeit **v**: 80 km/h
Kurvenradius **r**: 100 m.

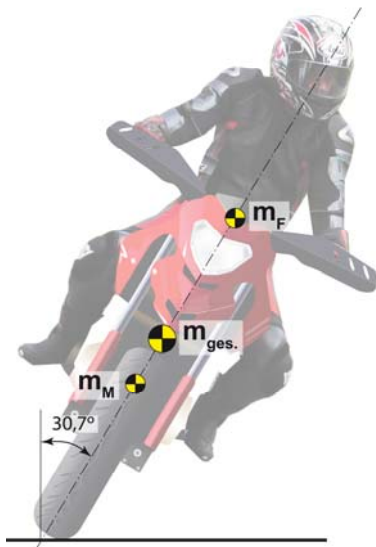


Bild 1: Schwerpunkte und erforderliche Motorrad-Schräglage beim Fahrstil „Legen“

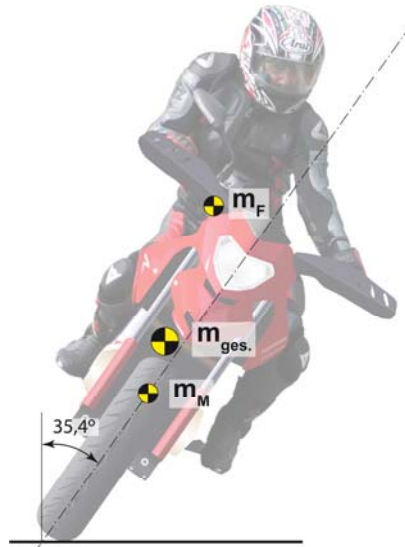


Bild 2: Schwerpunkte und erforderliche Motorrad-Schräglage beim Fahrstil „Drücken“

Wie man in den Abbildungen 1 und 2 erkennt, beträgt die tatsächliche Motorradschräglage im Fahrstil „Legen“ **30,7 Grad** und im Fahrstil „Drücken“ **35,4 Grad**.

Die Motorradschräglage errechnet sich aus 26,7 Grad für ein Fahrzeugmodell mit unendlich schmalen Reifen, aus +4,0 Grad zusätzlicher Schräglage unter Berücksichtigung der Reifenbreite und der Schwerpunkthöhe (nahezu unabhängig vom Fahrstil) sowie der Schräglagenbeeinflussung von 0,0 Grad („Legen“) bzw. +4,7 Grad („Drücken“) durch die Sitzposition.

Diese Gegenüberstellung veranschaulicht, dass der Fahrstil „Drücken“ nicht mehr Grip bieten kann als der Fahrstil „Legen“. Denn es ist durchaus denkbar, dass – je nach Reifentyp – mit zunehmender Schräglage eine Reduzierung der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche (Latsch) einhergeht. In diesem Fall würde der Grip sogar reduziert. Aber auch die Betrachtung des Extremfalles, wie z.B. dem der maximalen konstruktiven Schräglage bedingt durch die Reifenschulter (Grenze zwischen äußerster Lauffläche und Reifenflanke), zeigt uns, dass im Fahrstil „Drücken“ die Reifenhaftgrenze durch die notwendigerweise größere Motorrad-/Reifen-Schräglage früher erreicht werden würde als beim „Legen“.

Diese Tatsache machen sich Rennfahrer zunutze und fahren deshalb im „Hanging-off“, damit sie mit ihrem Fahrstil die erforderliche Motorrad-/Reifen-Schräglage reduzieren können und damit noch schneller durch die Kurven kommen. Würde der Fahrer wie im obigen Beispiel im Fahrstil „Drücken“ seine Körperhaltung in Richtung „Hanging-off“ verändern, so bräuhete das Motorrad entsprechend Abbildung 3 nur eine Schräglage von **26,0 Grad** einnehmen!

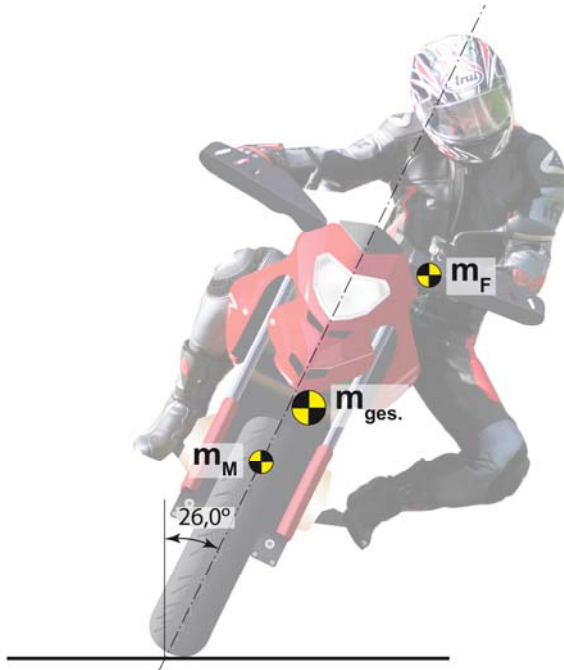


Bild 3: Schwerpunkte und erforderliche Motorrad-Schräglage beim Fahrstil „Hanging-off“

Unabhängig vom Fahrstil (siehe Abbildungen 4 und 5, nächste Seite) wirken im jeweiligen Gesamtschwerpunkt identische Zentrifugal- und Gewichtskräfte.

$$F_{FZ} = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (\text{Gl. 8})$$

$$F_{FG} = m \cdot g \quad (\text{Gl. 9})$$

Mit:

F_{FZ} als Zentrifugalkraft [N]

F_{FG} als Gewichtskraft [N]

m als Masse [kg]

v als Kurvengeschwindigkeit [m/s]

r als Kurvenradius [m]

g als Gravitationsbeschleunigung = konstant = 9,81 [m/s²]

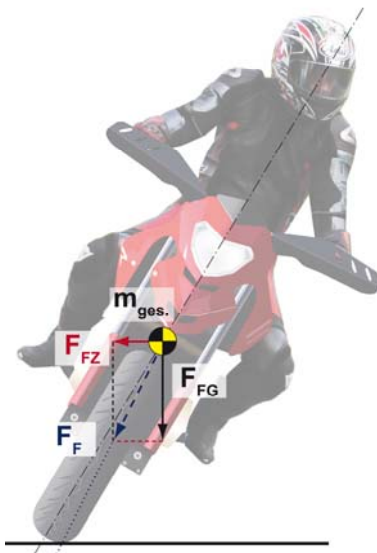


Bild 4: Kräfte beim Fahrstil „Legen“

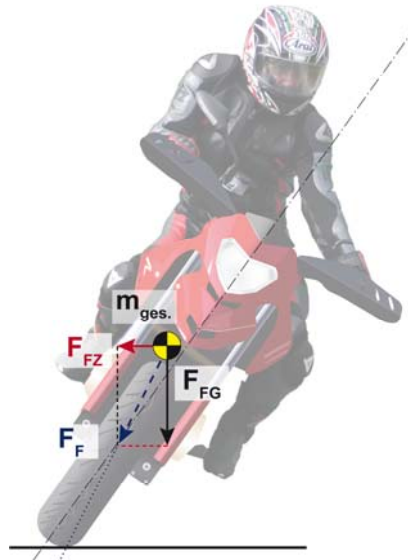


Bild 5: Kräfte beim Fahrstil „Drücken“

Die Zentrifugalkräfte F_{FZ} betragen bei diesem Beispiel (Gl. 8) **1.363 Newton**, die Gewichtskräfte F_{FG} (nach Gl. 9) **2.707 Newton**.

In der Mechanik lässt sich eine Kraft mit einer bestimmten Wirkrichtung in ein beliebiges Koordinatensystem zerlegen. Im Umkehrschluss können somit auch Kräfte, die in Richtung eines Koordinatensystems wirken, zusammengefasst werden. Für ein zweidimensionales, rechtwinkliges Koordinatensystem gilt Gleichung 10.

$$F_F = \sqrt{F_{FZ}^2 + F_{FG}^2} \quad (\text{Gl. 10})$$

Aus Gleichung 10 errechnet sich die resultierende Kraft F_F zu **3.031 Newton**.

Zur Erinnerung: Die resultierende Kraft F_F ersetzt die Einzelkräfte F_{FZ} und F_{FG} . Entweder man betrachtet die Einzelkräfte oder die resultierende Kraft, weshalb in Abbildung 4 und 5 die Resultierenden gestrichelt dargestellt wurden.

Bis hierhin haben wir also noch keinen „Grip-Vorteil“ beim Fahrstil „Drücken“ und durch den eventuellen Druck auf die kurvenäußere Fußraste gefunden.

Die Schwierigkeit bei allen auch heutigen Motorrad-Fahr-Simulationsprogrammen ist die realistische Abbildung eines Fahrer-Modells. Grundsätzlich muss man sich von der Vorstellung lösen, dass der Fahrer und das Fahrzeug stetig eine Einheit und damit stetig einen gemeinsamen, gleichbleibenden Gesamt-Schwerpunkt bilden. Allein durch die Änderung der

Fahrerhaltung oder durch die Ausübung von Kräften seitens des Fahrers ändern sich bereits grundlegende Parameter, die das Fahrmodell immens beeinflussen können. Man denke hier auch nur an die Schwingungsdämpfung (z.B. Pendeln) seitens eines versierten Fahrers. Bisweilen geht man auch hin und unterteilt den menschlichen Körperschwerpunkt in einen unteren und einen oberen Teil. Aber auch hier werden die Kraftereinleitungspunkte an Sitzbank, Fußrasten und Lenker nur ungenügend abgebildet. Denn die muskulären Kräfte und die daraus resultierende Variabilität der Kraftereinleitungspunkte sind individuell unterschiedlich und nur schwer abzubilden. Einen „Normfahrer“ gibt es bisher noch nicht!

Theoretisch ist es aber möglich, Fahrer und Fahrzeug – zwar als Ganzes –, aber entkoppelt zu betrachten. Unabhängig von der Körperhaltung des Fahrers erfährt sein Schwerpunkt bei 80 kg Masse, einem Kurvenradius von 100 Metern und einer Kurvengeschwindigkeit von 80 km/h (= 22,2 m/s) eine Zentrifugalkraft F_{FZF} von **395 Newton** (nach Gl. 8) und eine Gewichtskraft F_{FGF} von **785 Newton** (nach Gl. 9). Die resultierende Kraft F_{FF} beträgt dann **879 Newton** (Gl. 10).

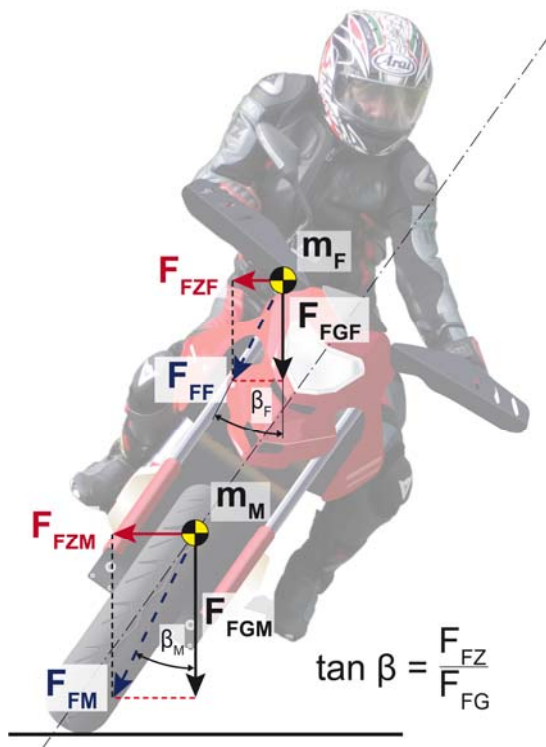


Bild 6: Der Winkel β am Beispiel des Fahrstils „Drücken“

Da der Winkel β zwischen der resultierenden Kraft und der Vertikalen (siehe Abbildung 6) lediglich vom Arcustangens des Verhältnisses der Einzelkräfte – Zentrifugalkraft F_{FZ} zu Gewichtskraft F_{FG} – abhängt, kürzt sich die Masse m entsprechend Gleichung 12 heraus.

$$\beta = \arctan \frac{F_{FZ}}{F_{FG}} \quad \text{(Gl. 11)}$$

oder

$$\beta = \arctan \frac{m \cdot v^2}{m \cdot g \cdot r} \quad \text{(Gl. 12)}$$

Damit sind die Richtungen beider resultierender Kräfte von Fahrer und Motorrad ($\beta_F = \beta_M$) bei ein und derselben Geschwindigkeit und Kurve immer identisch! D.h.: **Die Wirklinien beider resultierender Kräfte verlaufen parallel.** Denn die minimalen Unterschiede zwischen dem Kurvenradius des menschlichen Körperschwerpunktes und dem des Motorrades sind – bezogen auf einen Kurvenradius von 100 Metern – vernachlässigbar.

Unser theoretisches Ersatzmodell für Fahrer und Motorrad (siehe Abbildung 7) sähe nun so aus, dass wir die resultierende Kraft des Fahrers F_{FF} von **879 Newton** auf die Fußraste verlagern und uns dafür den Fahrer wegdenken.

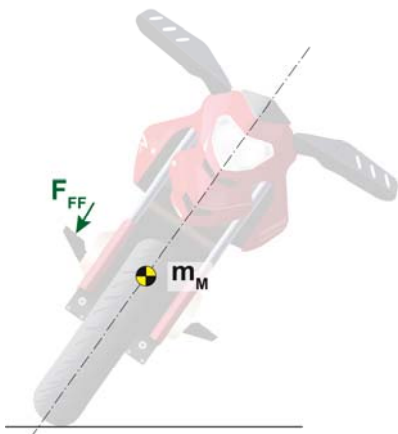


Bild 7: Ersatzmodell für „Druck auf die äußere Fußraste“

Die innere Körperspannung bzw. Muskelanspannung macht es möglich, dass der Fahrer in der Lage ist, diese Kraft durch Muskelkraft fast zu 100 Prozent auf die äußere Fußraste zu übertragen. 100 Prozent Kraftverlagerung wird zwar nicht zu realisieren sein, weil dies eine völlige Entkopplung von Sitzbank, Lenker und kurveninnerer Fußraste bedeuten würde.
Bemerkung: Da im Regelfall der Körperschwerpunkt vor der Fußraste liegt, entsteht zusätzlich zur Kraftverschiebung ein Drehmoment um die y-Achse (quer zur Motorradlängsachse). Dieses kann ebenfalls durch innere Körperanspannung oder über Abstützen am Lenker (gleichbedeutend mit einer Teilgewichtsverlagerung nach vorne) kompensiert werden.

Der Einfachheit halber nehmen wir für unseren theoretischen Fall eine 100-prozentige Kraftverlagerung an.

Neben der im Motorrad-Massenschwerpunkt wirkenden Zentrifugalkraft F_{FZM} von **968 Newton** wirkt die Gewichtskraft F_{FGM} von **1.923 Newton**. Daraus ergibt sich eine resultierende Kraft F_{FM} von **2.152 Newton** allein durch die Masse des Motorrads.

Darüber hinaus wirkt die resultierende Kraft F_{FF} des Fahrers von **879 Newton** auf die äußere Fußraste; wohlgemerkt parallel zur Resultierenden im Motorradschwerpunkt (siehe Gl. 12) und in unserem Beispiel mit einem Hebelarm a von 250 mm zur Fahrzeugachse.

Wer jemals das Fach „Mechanik“ im Unterricht hatte, wird wissen, dass diese äußere Kraft F_{FF} des Fahrers zwei Reaktionen hervorruft (siehe Abbildung 8).

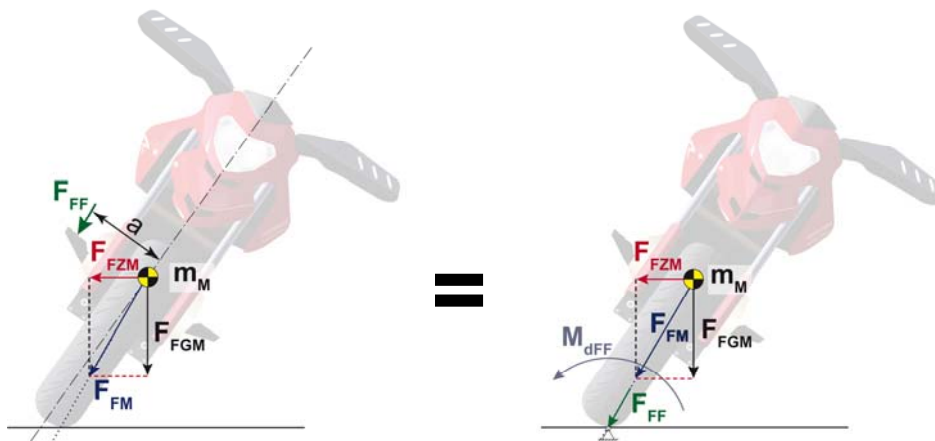


Bild 8: Kräfte am Ersatzmodell und deren Wirkung auf die Struktur

Zum einen ist es die Kraftverschiebung der äußeren Kraft F_{FF} des Fahrers in den Drehpunkt (hier Reifenauflandspunkt), zum anderen ein aus dem Hebelarm a herrührendes Drehmoment M_{dFF} um den Drehpunkt.

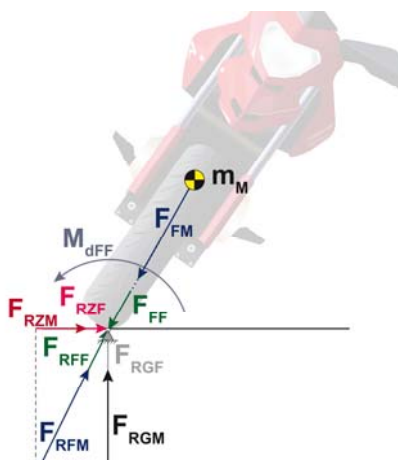


Bild 9: Aktions- und Reaktions-Kräfte in der Reifenkontaktfläche am Ersatzmodell

Wie Abbildung 9 veranschaulicht, sind die Reaktionskräfte in der Reifenkontaktfläche auch bei unserem Ersatzmodell (ohne Fahrer, aber mit Druck auf die kurvenäußere Fußraste) völlig identisch mit denen des Gesamtmodells „Fahrer und Motorrad“ (siehe Gl. 10). Die Addition der resultierenden Kräfte durch Fahrer F_{FF} und Motorrad F_{FM} ergibt nämlich den gleichen Betrag von $879 + 2.152 = 3.031$ Newton.

„Druck auf die kurvenäußere Fußraste“ kann gesamttechnisch gesehen also nicht mehr Auflage- oder Anpressdruck an den Reifen erzeugen. Was jedoch erzeugt wird, ist das bereits angesprochene Drehmoment M_{dFF} , welches entgegen der Fahrzeugneigung und somit unterstützend zur Zentrifugalkraft bzw. dem daraus resultierenden Drehmoment wirkt.

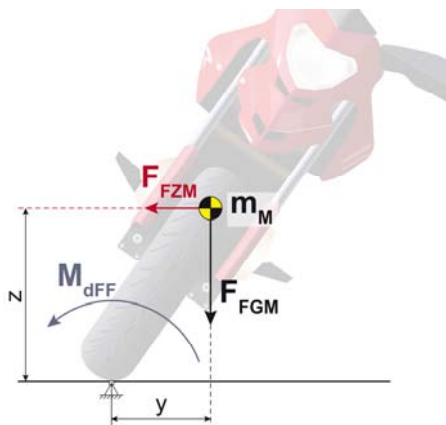


Bild 10: Am Ersatzmodell einwirkende Kräfte und Momente bei Kurvenfahrt

Wie Abbildung 10 zu entnehmen ist, wirken neben der Zentrifugalkraft F_{FZM} die Gewichtskraft F_{FGM} sowie das Drehmoment M_{dFF} .

Doch lassen Sie uns nun die wichtigste Forderung für eine stabile, gleichförmige Kurvenfahrt mit konstanter Schräglage betrachten. Diese ist nur unter folgender Voraussetzung möglich:

$$\Sigma M_{d, \text{rechts}} = \Sigma M_{d, \text{links}} \quad (\text{Gl. 13})$$

Gleichung 13 besagt nämlich, dass die Summe der rechtsdrehenden Momente mit der der linksdrehenden Momente identisch sein muss. Übertragen auf unser Modell heißt die Forderung nach Gleichung 13:

$$(F_{FGM} \cdot y) = (F_{FZM} \cdot z) + M_{dFF} \quad (\text{Gl. 14}) \quad \text{oder}$$

$$(F_{FGM} \cdot y) - (F_{FZM} \cdot z) - M_{dFF} = 0 \quad (\text{Gl. 15})$$

Das zusätzliche Drehmoment errechnet sich mit obigen Parametern zu:

$$M_{dFF} = F_{FF} \cdot a = 879 \text{ N} \cdot 250 \text{ mm} = 219,7 \text{ Nm}$$

Durch Iteration von Gleichung 15 mit den noch unbekanntenen Schwerpunkts-Hebelarmen y und z erhält man einen Schräglagen- bzw. Rollwinkel von **46,9 Grad**, damit obige Momenten-Gleichung erfüllt ist. Hier halten sich rechts-drehende Momente von **579,5 Nm** mit linksdrehenden die Waage.

Verglichen mit dem Schräglagenwinkel aus dem Gesamt-Modell „Fahrer und Motorrad“ im Fahrstil „Drücken“ von **35,4 Grad** erhöht sich der Schräglagenwinkel also zusätzlich um **11,5 Grad**. Und je geringer das Fahrzeuggewicht, umso eklatanter wird der Unterschied im Schräglagenwinkel. Die 11,5° an zusätzlicher Schräglage kann man sich auch so vorstellen, dass der Fahrer das Fahrzeug noch viel extremer drückt, als in der oben angenommenen Fahrerposition mit 200 mm Gesäßversatz und 8° seitliche Oberkörperneigung.

Zur Erklärung darf hier nicht unerwähnt bleiben, dass dieses theoretisch angenommene fahrerlose Motorrad mit obigen Parametern ohne Zusatzdrehmoment M_{dFF} für die Kurvenfahrt einen Schräglagenwinkel von **32,1 Grad** benötigen würde. Dieser setzt sich zusammen aus 26,7 Grad theoretischer Schräglage für ein Modell mit unendlich schmalem Reifen und 5,4 Grad zusätzlicher Schräglage für den Einfluss der Reifenbreite und der Schwerpunkthöhe.

Da die theoretische Schräglage für ein Berechnungs-Modell mit unendlich schmalem Reifen (Scheibe) nur von der Kurvengeschwindigkeit und dem Kurvenradius abhängt, ist dieser Winkel sowohl vom Fahrzeug als auch vom Fahrstil unabhängig. Erst der Einfluss der Reifenbreite und damit der der Höhe des Massenschwerpunktes macht die Unterschiede aus.

Nun ist bekannt, dass ein höherer Massenschwerpunkt eine geringere Schräglage bei sonstigen konstanten Parametern erfordert. Da sich in unserem fahrerlosen Ersatzmodell der Gesamtschwerpunkt alleinig aus dem Motorrad-Schwerpunkt zusammensetzt, wurde die Höhe des Gesamtschwerpunktes im Ersatzmodell also gegenüber dem Gesamt-Modell „Fahrer und Motorrad“ herabgesetzt. Dadurch war letztendlich mehr Schräglage von $5,4^\circ - 4,0^\circ = 1,4 \text{ Grad}$ erforderlich. Die weitere Differenz von $46,9^\circ - 32,1^\circ = 14,8^\circ$ **Schräglage** ist notwendig, um das Motorrad bei dem einwirkenden Drehmoment M_{dFF} (gleichzusetzen mit extremem „Drücken“) auf Kurs zu halten.

Dieses Ergebnis – eine Erhöhung des Schräglagenwinkels – war im Vorfeld schon klar, sollte aber hier nochmals aufgezeigt werden. Denn ein zusätzliches Moment (gleichzusetzen mit dem Fahrstil „Drücken“), welches das Motorrad aufrichten möchte, muss zwangsläufig durch zusätzliche Schräglage ausgeglichen werden. Als Vergleichsbeispiel braucht man sich nur vor Augen zu halten, dass bei heftigem Seitenwind, selbst bei Geradeausfahrt, Schräglage entgegen der Windrichtung vonnöten ist, um weiter geradeaus fahren zu können!

Bis hierher haben wir also immer noch keinen Vorteil in Bezug auf Grip; eher einen Nachteil durch die notwendig höhere Motorrad- und Reifenschräglage bei Kurvenfahrt. **Von daher lässt sich ableiten, dass der vielzitierte, statische Druck auf die äußere Fußraste bei dieser Betrachtungsweise eher zum Aufrichten des Motorrades genutzt werden kann bzw. genutzt wird. Dass hierdurch dann mehr Grip durch die größere Reifenaufstandsfläche zur Verfügung steht, versteht sich von selbst.**

Als letzten Punkt müssen wir noch untersuchen, inwieweit sich „Druck auf die kurvenäußere Fußraste“ in einer Veränderung der Radlasten widerspiegeln kann. Und dies insbesondere bei einem Beschleunigungsvorgang mit der Möglichkeit den Grip am Hinterrad zu steigern.

Entgegen der landläufigen Meinung ist Motorrad fahren kein statischer, sondern ein höchst dynamischer Prozess. Damit ist gemeint, dass sich in jeder Fahrsituation die Vorder- und Hinterradlasten anders verteilen. Obwohl der Schwerpunkt eines Motorrades fix ist (wenn man die minimalen Verschiebungen durch Fahrwerksbewegungen einmal außen vorlässt), kann der Gesamtschwerpunkt durch die Sitzposition des Fahrers oder durch Kräfteinleitungen verändert werden. Diese Veränderungen stehen im Gleichklang mit den jeweiligen Federwegen an Vorder- und Hinterrad, aber auch den Anpressdrücken in der jeweiligen Reifenkontaktfläche, dem so genannten „Latsch“. Dabei darf auch nicht vergessen werden, dass sich die Reifenkarkasse unter einer erhöhten Last weiter verformt und sich somit eine größere Kontaktfläche ausbildet, was letztendlich zu mehr Grip führt.

Um dieser Frage nachzugehen, wird das Fahrzeugmodell nicht von vorn oder hinten, sondern von der Seite betrachtet (siehe Abbildung 11).

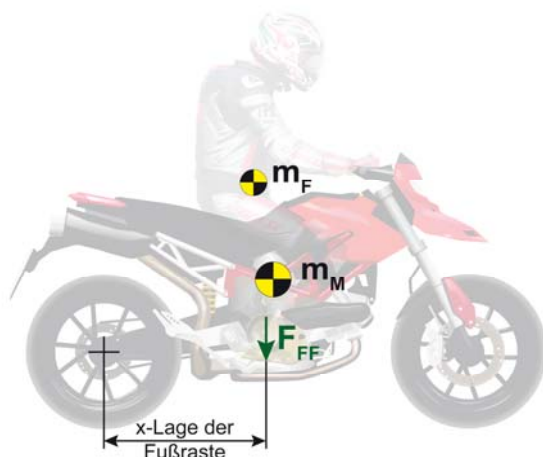


Bild 11: seitliches Ersatzmodell für „Druck auf die äußere Fußraste“

Darauf aufbauend wurden mit obigen Fahrer- und Fahrzeug-Daten für verschiedene realistische Fußrastenpositionen diverse Berechnungen durchgeführt. Und siehe da, die Ergebnisse zeigten eine **Veränderung der Hinterradlast um bis zu 5 Prozent** mit zunehmender Auswirkung, je weiter die Fußraste zurückliegt.



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
Internet: www.ifz.de

Autor: Dr.-Ing. Achim Kuschefski

Stand: 01/2010

In unserem konkreten Berechnungsbeispiel beträgt die Hinterradlast bei normal sitzendem Fahrer 53,6 Prozent vom Gesamtgewicht. Durch „Druck auf die Raste“ mit der originalen Fußrastenposition (585 mm vor dem Hinterrad) ergibt sich ein Wert von 54,9 Prozent (+1,3%).

Werden die Fußrasten um 100 Millimeter nach hinten verrückt, beträgt die Hinterradlast schon 56,9%, also eine Veränderung von +3,3%. Bei 150 Millimeter sind es schon 57,9% (+4,3%).

Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Fußraste hinter dem Körper-Massenschwerpunkt des Fahrers in seiner Sitzposition und der halben Motorradlänge liegt. Nur so kann „Druck auf die Fußraste“ eine Erhöhung der Hinterradlast bewirken.

Anmerkung: Um diesen Effekt der „Erhöhung der Hinterradlast“ zu erzielen, benötigt es allerdings keinen einseitigen Fußrastendruck. Hier hat der gleichmäßige Druck auf beide Fußrasten denselben Effekt!

Nun geben Procente nur relative Werte an, und hier auch noch in relativ kleinen Zahlen. Wenn man aber berücksichtigt, dass ein Prozent vom Gesamtgewicht schon 2,76 kg ausmachen, 4,3% damit nahezu 12 kg, kann man sich sehr wohl vorstellen, dass Druck auf die Rasten bei einem „slidenden“ und ausbrechenden Hinterrad hilfreich ist.

Nehmen wir einmal an, dass wir ein Kraftschlusspotential (max. Reibwert) von $\mu_{\max} = 0,8$ [-] zwischen Reifen und Fahrbahn haben. Im obigen Beispiel ist das Hinterrad in sitzender Fahrerposition („Drücken“ ohne Fußrastendruck) mit 53,6 Prozent der Massenverteilung belastet. Daraus ergibt sich ein senkrecht wirkender Gewichtskraftanteil von $F_{FG} = 1.450,4$ **Newton** (53,6% von 276 kg \cdot 9,81 m/s²) und ein seitlich wirkender Zentrifugalkraftanteil von $F_{FZ} = 730,1$ **Newton** (53,6% von 1.363 N).

Anmerkung: Es können leichte Rundungsdifferenzen beim Nachrechnen auftreten!

Da das mögliche Kraftschlusspotential μ_{\max} bei sonstigen konstanten Parametern alleinig von der Normalkraft (Kraftanteil, senkrecht zur Fahrbahnoberfläche) abhängt, errechnet sich $F_{R,\max}$ nach Gleichung 2 zu

$$F_{R,\max} = F_{FG} \cdot \mu = 1.450,4 \text{ N} \cdot 0,8 = 1.160,3 \text{ N}.$$

Diese Reibkraft muss man sich nun als die maximal mögliche Reibkraft in Längs- und Seitenrichtung nach der Beziehung aus Gleichung 6 (Kammischer Kreis, idealisiert) vorstellen.

Unser Modell ging bisher davon aus, dass der Reifen nur durch Seitenkräfte F_{FZ} – bedingt aus Schräglage – belastet wurde. Durch Umformen von Gleichung 5 können wir nun die maximal mögliche Reibkraft in Längsrichtung $F_{L,\max}$ berechnen.

$$F_L^2 = F_R^2 - F_S^2$$

(Gl. 16) oder umgeformt

$$F_L = \sqrt{F_R^2 - F_S^2}$$

(Gl. 17)

Übertragen wir nun die entsprechenden Kürzel und Zahlen in Gleichung 17, so ergibt sich folgende Rechnung:

$$F_{L,max} = \sqrt{(F_{R,max})^2 - (F_{FZ})^2} = \sqrt{1.160,3^2 - 730,1^2} = 901,8 \text{ N}$$

Das heißt, dass noch **901,8 Newton an Umfangskräfte in Längsrichtung durch z.B. Beschleunigen** übertragen werden können, bevor der Reifen durch- oder seitlich wegrutscht.

Machen wir nun die gleiche Berechnung mit Druck auf die Fußrasten, so ergibt sich ein anderes Bild:

Mit der Originalposition der Fußrasten lässt sich durch Druck auf sie am Hinterrad bis zu 54,9% der Massenverteilung erzielen. Der Gewichtskraftanteil beträgt dann **$F_{FG} = 1.486,5 \text{ Newton}$** (54,9% von $276 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$) und der Zentrifugalkraftanteil **$F_{FZ} = 748,3 \text{ Newton}$** (54,9% von 1.363 N).

Entsprechend Gleichung 17 ergibt sich eine maximal mögliche Reibkraft in Längsrichtung von

$$F_{L,max} = \sqrt{(F_{R,max})^2 - (F_{FZ})^2} = \sqrt{1.189,2^2 - 748,3^2} = 924,3 \text{ N}$$

Vergleichen wir nun die beiden Werte, so lässt sich durch Druck auf die Fußraste $924,3 \text{ N} - 901,8 \text{ N} = 22,5 \text{ Newton}$ an zusätzlicher Reibkraft in Längsrichtung erzeugen. Dies ist ein Zugewinn von immerhin plus **2,5 Prozent!** Wie sich die Kräfte im Kammschen Kreis darstellen, zeigt Bild 12.

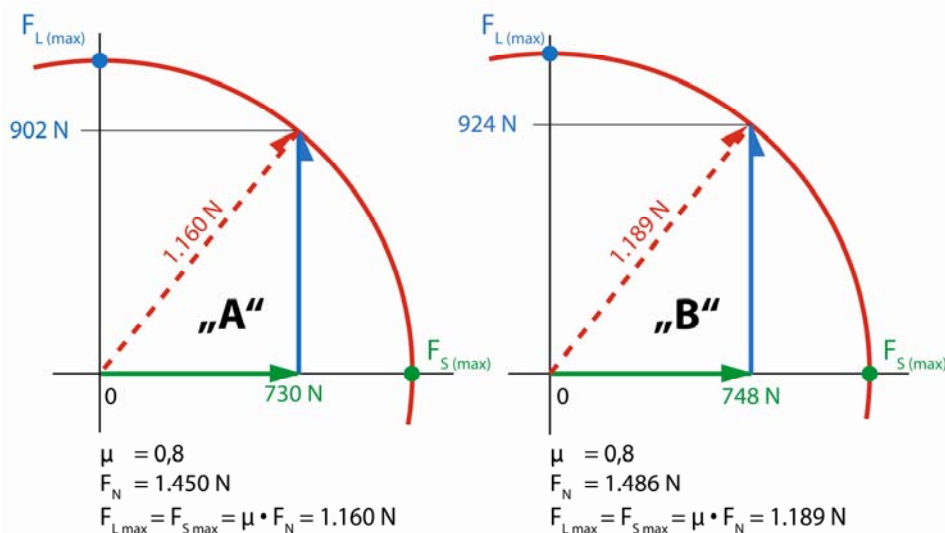


Bild 12: Die Kammschen Kreise des Hinterrades für A – „ohne Druck auf die Fußraste“ und für B – „mit Druck auf die Fußraste“

Doch Fragen wir einmal die Profis, denn die sollten es wissen!

Valentino Rossi, 9-facher Weltmeister:

In einem Interview /1/ nannte der Rennfahrer und mehrmalige Weltmeister „Feingefühl und artistisches Geschick“ als die wesentlichen Voraussetzungen, um eine 800ccm-MotoGP-Maschine im Grenzbereich „flott“ bewegen zu können. Hierbei spiele die eigene Gewichtsverlagerung auf Vorder- oder Hinterrad zur Erhöhung des jeweiligen Anpressdruckes und somit Reifen-Grips eine entscheidende Rolle.

So weit, so gut.

Jedoch irritiert mich folgende Äußerung in seinem Interview: >>„Sobald ich das Gas aufziehe, kontrolliere ich das Bike mit Körper und Fuß. Ich übe Druck auf die innere oder äußere Raste aus, um je nach Bedarf mehr oder weniger Grip zu bekommen.“<< Anmerkung: hier ist der Grip am Hinterrad gemeint!

Speziell der zweite Satz ist schwierig zu deuten. Meint er damit, dass Druck auf die innere Raste mehr Grip und Druck auf die äußere Raste weniger Grip bedeuten soll?

Oder: Ich übe Druck oder keinen auf die innere oder äußere Raste (egal welche!) aus, um je nach Bedarf mehr oder weniger Grip zu bekommen?

Oder: Ich übe Druck auf die innere oder äußere Raste aus, um damit die Motorradsschräglage zu steuern, um dann je nach Bedarf mehr oder weniger Grip zu bekommen?

Die erste Annahme halte ich für falsch, zumal der „ODER-Bezug“ von Haupt- und Nebensatz in Rossis Übersetzung irreführend ist. Die zweite Annahme ist meines Erachtens korrekt, aber auch die dritte würde der Wahrheit entsprechen.

Diese Interpretation wird untermauert durch die nachfolgenden Sätze des Interviews. >> „Wenn ich das Gas öffne, verlagert sich das Gewicht nach hinten und ich muss ungefähr so etwas machen, um das Bike aufzurichten, mehr Gummi auf den Boden zu bekommen und härter beschleunigen zu können“, erläutert Valentino und spielt vor, wie er das Motorrad aufrichtet und versucht, möglichst viel Grip zu erzeugen.<<

Wayne Rainey, mehrfacher 500ccm-Weltmeister /1/:

>>„Bei einer Rechtskurve nutzt du die rechte Seite um die Traktion zu spüren, die linke Seite, um die Traktion zu kontrollieren. Mit dem rechten Knie und der rechten Raste hast du ein gutes Gefühl für den Grip von hinten und wenn das Heck anfängt auszubrechen, lässt sich das Bike über die linke Raste kontrollieren.“<<

Kevin Schwantz, 500ccm-Weltmeister /1/:

>>„Du hängst also innen am Motorrad, verlagerst aber dein Gewicht auf die äußere Raste. So kannst du das Heck besser kontrollieren, wenn es doch mal ausbricht.“<<

/1/ Oxley, M.:
Sprechstunde,
PS, 9/2009



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
Internet: www.ifz.de

Autor: Dr.-Ing. Achim Kuschefski

Stand: 01/2010

Die Aussagen der Profis bestätigen noch einmal genau das, was wir zuvor in diesem Artikel physikalisch erarbeitet haben.

Das ganze Geheimnis liegt also darin, durch Druck auf die Fußraste mehr Gewicht auf das zu beschleunigende Hinterrad zu bekommen und gleichzeitig das Motorrad aufzurichten. Bei dem zuletzt Genannten wirkt allerdings nur der Druck auf die kurvenäußere Fußraste unterstützend.

Es darf aber nicht außer Betracht gelassen werden, dass die Wirksamkeit dieser beiden „Fahrhilfen“ von der geometrischen Anordnung der Fußrasten am Motorrad abhängt. Je weiter die Fußrasten nach hinten liegen, so wie dies z.B. bei Straßen-Rennmotorrädern der Fall ist, umso mehr Gewicht lässt sich durch „Druck auf die Raste“ auf das Hinterrad bringen. Genauso gut unterstützen weit abstehende Fußrasten das Aufrichtmoment.

Fazit:

- Durch statischen „Druck auf die kurvenäußere Fußraste“ kann im Gesamt-System „Fahrer – Fahrzeug“ – und hier im Speziellen in der Gesamt-Kontaktfläche von Vorder- und Hinterradreifen – nicht mehr Auflage- oder Anpressdruck an den Reifen erzeugt werden als ohne diese Technik.
- „Druck auf die kurvenäußere Fußraste“ kann also im Gesamtmodell (Vorder- und Hinterrad zusammen betrachtet) nicht mehr Grip bieten. Der Fußrastendruck bewirkt aber in Abhängigkeit von der Fußrastenposition eine andere Verteilung des Körpergewichtes auf das Vorder- oder Hinterrad als die sitzende Position. Hierdurch kann der Grip an dem entsprechenden Reifen gesteigert werden.
- Sofern die Motorrad-Balance, also die Gewichtsverteilung auf Vorder- und Hinterrad, serienmäßig gut konzipiert wurde, bringt der „Druck auf die Rasten“ während einer stationären Kurvenfahrt keinen zusätzlichen Grip und damit nicht mehr Schräglage. Neigt aber ein Motorrad während der Kurvenfahrt deutlich zum Übersteuern (Hinterrad rutscht deutlich früher weg als das Vorderrad), kann diesem durch „Druck auf die Rasten“ entgegengewirkt werden.
- "Druck auf die kurvenäußere Fußraste" ist bei Motocross- oder Supermoto-Maschinen im Fahrstil "Drücken" üblich. Da diese Maschinen in der Regel mit einem heraushängenden, kurveninneren Bein um die Kurve bewegt werden, vermittelt der Druck auf die äußere Fußraste – bedingt durch den Fahrstil "Drücken" – einen innigen Kontakt zum Motorrad.
- Darüber hinaus können driftende und ausbrechende Hinterräder durch mehr Druck – sofern die überwiegende Kraftverteilung auf das Hinterrad erfolgt – stabilisiert werden. Der Grund hierfür liegt in der proportionalen Abhängigkeit der möglichen Reibkraft von der Normalkraft (siehe Gl. 2) und der zusätzlichen Verformung der Reifenkarkasse (Latsch-Vergrößerung).



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
Internet: www.ifz.de

Autor: Dr.-Ing. Achim Kuschefski

Stand: 01/2010

- In Abhängigkeit des Motorradgewichtes und des Abstandes der Fußraste von der Fahrzeuglängsachse (Hebelarm) lässt sich das Motorrad durch "Druck auf die kurvenäußere Fußraste" in seiner seitlichen Neigung (Schräglage) kontrollieren bzw. steuern. Wenn dies möglich ist (z.B. bei Sandbahn- oder Eisspeedway-Maschinen mit weit abstehender Fußraste), bewirkt ein kurzzeitiges Aufrichten – einhergehend mit der Änderung des Kurvenradius bzw. der -bahn und mit der Folge, dass sich die Zentrifugalkräfte reduzieren – mehr Grip und somit ggf. eine Stabilisierung.
- Fußrasten mit einem geringen Hebelarm zur Fahrzeuglängsachse erschweren die Ausübung eines wirksamen Momentes. Probieren Sie es selbst an Ihrem Motorrad aus, ob Sie alleinig durch Druck auf eine Fußraste Ihr Fahrzeug in der Schräglage beeinflussen können. Dies hängt sehr vom Motorradtyp, von Ihrem Gewicht und von dem Gewichtsverhältnis (Motorrad/Fahrer) ab.
- Schlagartiger Druck auf die Fußraste, erzeugt durch Muskelkraft und mit einer zusätzlichen Körper-Beschleunigung vom Motorrad weg, kann unter Umständen bei einem in Schräglage wegrutschenden Motorrad hilfreich sein. Dieser kurzzeitige, für ein paar Millisekunden erzeugte zusätzliche Druck bietet eventuell die Möglichkeit, das Motorrad noch abfangen zu können. Diese Feststellung trifft für fahrphysikalische Grenzfälle zu; aber nicht für uns Straßenfahrer, die nicht im Drift, sondern auf einer stabilen Kurvenfahrt unterwegs sind.
- Straßenmotorräder und hier insbesondere Supersportler haben wegen ihrer Handlichkeit eher einen kurzen Radstand und neigen somit beim Beschleunigen am Kurvenausgang zu Wheelies. Von daher kann eine Gewichtsverlagerung nach vorne von mindestens ebenso großer Bedeutung sein, wie die Erhöhung des Grips am Hinterrad durch „Druck auf die äußere Fußraste“.

Allzeit gute Fahrt!

Ihr ifz-Team