

Der Sturz über den Lenker

Zur Problematik des Bremsens beim Radfahren

Hans Joachim Schlichting

1. Einleitung

Die Gleichgewichtsproblematik des Fahrrads läßt sich je nach der Drehachse, um die sich das aus der Gleichgewichtslage ausgelenkte Fahrrad drehen kann, in drei Abschnitte einteilen. Die Drehung um eine Achse durch das Fahrrad senkrecht zur Erdoberfläche spielt jedoch keine wesentliche Rolle und kann daher vernachlässigt werden. Die Drehung um eine Achse längs durch das Rad (in Fahrtrichtung) wurde unter der Thematik "Zur Gleichgewichtsproblematik beim Radfahren" in einer vorangegangenen Arbeit in dieser Zeitschrift behandelt /1/. Die Drehung um eine Achse quer durch das Rad (senkrecht zur Fahrtrichtung) soll in der vorliegenden Arbeit skizziert werden. Sie betrifft die Wirkung von Drehmomenten, die durch Bremsmechanismen zustande kommen. Wie schon in /1/ beschränken wir uns im weiteren auf qualitative Argumente und einige quantitative Abschätzungen.

2. Stationäres Gleichgewicht

Im stationären Gleichgewicht, also in Ruhe oder in gleichförmiger Bewegung, verschwindet die Summe

a) aller am Fahrrad angreifenden Kräfte

$$\sum_i \vec{F}_i = 0$$

b) aller am Fahrrad wirksamen Drehmomente

$$\sum_j \vec{D}_j = 0.$$

Zu (a) (im Zustand der Ruhe):

Außer der im Schwerpunkt S vereinigt gedachten Gewichtskraft \vec{F}_G (siehe **Bild 1**) wirken in den Berührungspunkten V und H des Fahrrads mit der Erde der jeweiligen Last entsprechende entgegengesetzt gerichtete Reaktionskräfte \vec{F}_V und \vec{F}_H . Für die Beträge der Kräfte gilt:

$$F_G = F_V + F_H \quad (1)$$

Zu b):

Die Drehachse gehe durch den Schwerpunkt S, welcher im Abstand h oberhalb der Erdoberfläche liege. S besitze außerdem den Abstand a bzw. b

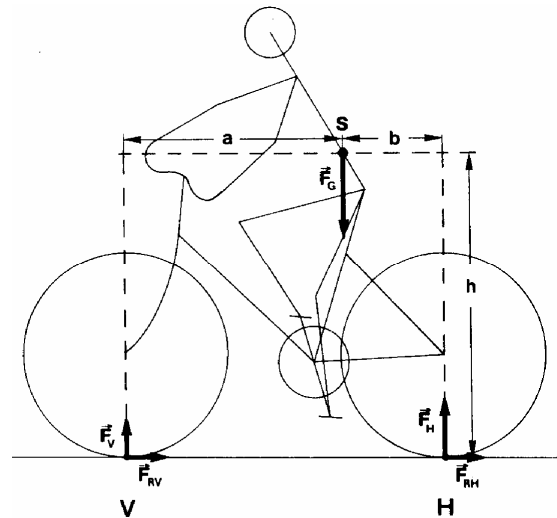


Bild 1: Schematische Darstellung eines bremsenden Fahrradfahrers von den Senkrechten zur Erdoberfläche durch die Berührungspunkte V und H (vgl. **Bild 1**). Damit ergibt sich für die Beträge der Drehmomente die Identität:

$$F_V \cdot a = F_H \cdot b. \quad (2)$$

Aus den Gleichungen (1) und (2) ermittelt man die folgende Gewichtsverteilung:

$$F_V = (b/a + b) \cdot F_G, \quad (3)$$

$$F_H = (a/a + b) \cdot F_G. \quad (4)$$

Da normalerweise $a > b$, liegt die Hauptlast auf dem Hinterrad, was sich z. B. in der Tatsache ausdrückt, daß der hintere Reifen stärker aufgepumpt werden muß.

Im vorliegenden Beispiel (vgl. **Tabelle 1**) verteilt sich die Gesamtlast $FG = 834 \text{ N}$ so, daß auf dem Vorderrad $F_V = 335 \text{ N}$, also etwa 40 %, und auf dem Hinterrad $F_H = 499 \text{ N}$, also etwa 60 % des Gesamtgewichts lasten.

Diese Situation ändert sich auch bei gleichförmiger Bewegung nicht, wenn man die verschiedenen auf

das Fahrrad wirkenden Widerstände vernachlässigt. Berücksichtigt man jedoch beispielsweise den Luftwiderstand F_L (vgl- z. B. 121), so greift ein zusätzliches Drehmoment im sogenannten Druckpunkt P an (in dem die gesamte Luftkraft vereinigt gedacht werden kann). Liegt P oberhalb von S, was in der Regel der Fall ist, so kommt es zu einer zusätzlichen Verminderung der Last auf dem Vorderrad und einer Erhöhung der Last auf dem Hinterrad. Ähnliche Wirkungen treten bei starken Beschleunigungen auf, die im Extremfall zu einem Abheben des Vorderrads führen können, wie man beispielsweise beim sportlichen Anfahren von Motorradfahrern beobachten kann.

Tabelle 1: Übersicht der benutzten Zahlenwerte

Vorderradabstand zum Schwerpunkt	a = 0,65 m
Hinterradabstand zum Schwerpunkt	b = 0,42 m
Schwerpunkthöhe	h = 1,15 m
Gesamtmasse	m = 85 kg

3. Bremsen

Bremsen sind Vorrichtungen, mit denen auf das fahrende Rad eine verzögernde Kraft F_R ausgeübt wird, um die Fahrgeschwindigkeit herabzusetzen. Das Bremsen setzt sich aus zwei Reibungsvorgängen zusammen:

- a) Durch mehr oder weniger starkes Aneinanderpressen zweier stark reibender Flächen in der Nabe oder an den Felgen wird die Umlaufgeschwindigkeit der Laufräder vermindert.
- b) Auf diese Weise wird ein Reibungsvorgang zwischen den Laufrädern und dem Untergrund an den Berührstellen V und/oder H hervorgerufen, wodurch es überhaupt erst zu der gewünschten Verzögerung kommen kann.

Sieht man von einer herabgesetzten Funktionsfähigkeit (z. B. der Felgenbremse bei Nässe) ab, so ist es i.a. problemlos, der gewünschten Verzögerung entsprechende Gleitreibungskräfte in der Nabe oder an der Felge zu entwickeln, da man sowohl Materialien mit hohem Gleitreibungskoeffizienten verwenden und unter Ausnutzung von Hebeln hohe Anpreßkräfte entwickeln kann. Demgegenüber ist man bei der Reibung zwischen Laufrädern und Untergrund auf den jeweils herrschenden Reibungskoeffizienten zwischen Reifen und Untergrund und einer Kraft angewiesen, die niemals größer als das Gesamtgewicht des Fahrrads sein kann.

Demzufolge hat man die durch Betätigung entsprechender Hebel ausgeübte Bremskraft F_R so einzurichten, daß sie nicht größer wird als die Haftrei-

bungskraft zwischen Laufrädern und Straße. Anderenfalls kommt es zum Blockieren der Räder und damit zum Gleiten des Fahrrads auf der Straße. Da der Gleitreibungskoeffizient aber kleiner als der Haftreibungskoeffizient ist, hat dieser Gleitreibungsvorgang jedoch eine geringere verzögernde Wirkung. Er sollte deshalb vermieden werden. Außerdem läßt sich ein gleitendes Fahrrad nur schwer beherrschen.

Neben der Güte des Reibungskoeffizienten ist ein anderes Phänomen entscheidend für die durch Bremsen erreichbare Verzögerung: Mit der parallel zur Fahrbahn an der Berührstelle zwischen Reifen und Fahrbahn angreifenden Bremskraft F_R wird zusätzlich ein Drehmoment vom Betrage $F_R \cdot h$ ausgeübt (siehe **Bild 1**), so daß im Falle des Bremsens gilt:

$$F_V \cdot a = F_H \cdot b + F_R \cdot h \quad (5)$$

Dies führt zu einer Beeinflussung der Lastverteilung auf Vorder- und Hinterrad. Formt man nämlich Glg. (5) mit Hilfe von Glg. (1) um, so ergibt sich:

$$F_V = (F_G b + F_R h) / (a + b), \quad (6)$$

$$F_H = (F_G a - F_R h) / (a + b), \quad (7)$$

Im Grenzfall verschwindender Bremskraft F_R gehen diese Gleichungen in Glg. (3) und (4) über. Mit zunehmenden Werten von F_R verlagert sich das Gewicht zunehmend auf das Vorderrad, während das Gewicht auf dem Hinterrad in gleichem Maße abnimmt. Bremswirkung ist demnach nur solange zu erzielen, wie einerseits $F_H \geq 0$ und andererseits $F_V \leq F_G$. Wird der Grenzfall $F_R = 0$ und $F_V = F_G$ überschritten, so kommt es zu einer Drehung des gesamten Fahrrads um eine Achse durch V, also zum gefürchteten Überschlag über den Lenker.

Die durch das Bremsen bewirkte einseitige Gewichtsverlagerung nach vorn führt zu charakteristischen Unterschieden in der Bremswirkung zwischen Vorderrad- und Hinterradbremse.

3.1. Hinterradbremse

Erfahrungsgemäß gerät man beim Bremsen mit der Hinterradbremse sehr leicht mit dem Hinterrad ins Gleiten. Dies wird häufig als sehr wirkungsvoll angesehen, hat aber - wie bereits oben angesprochen - eine Herabsetzung der Bremswirkung zur Folge.

Die an der Felge oder in der Nabe entwickelte Reibungskraft F_R läßt sich nur so lange steigern, wie die Ungleichung

$$F_R \leq \mu \cdot F_H \quad (8)$$

erfüllt ist (μ = Haftreibungskoeffizient, F_H auf das Hinterrad wirkende Last).

Danach setzt der unerwünschte Gleitreibungsvorgang zwischen Hinterrad und Fahrbahn ein. Diese Grenze zwischen Haft- und Gleitreibung wird aber mit wachsender Bremskraft f herabgesetzt, weil gemäß Glg. (7) damit eine Gewichtsverlagerung nach vorn, d. h. eine Reduzierung von F_H verbunden ist. Die maximal zu erreichende Bremskraft läßt sich abschätzen, wenn man $F_{R,max} = \mu \cdot F_H$ in Glg. (7) einsetzt. Sie beträgt:

$$F_{R,max} = F_G \cdot \mu a / (a + b + \mu h). \quad (9)$$

In diesem Fall lastet auf dem Hinterrad

$$F_H = F_G \cdot a / (a + b + \mu h) \quad (10)$$

und auf dem Vorderrad

$$F_V = F_G \cdot (b + \mu h) / (a + b + \mu h) \quad (11)$$

Beispiele:

Bei extrem guter Fahrbahn und guten Reifen ($\mu = 0,8$) läßt sich eine Bremskraft F_R von maximal $0,26 \cdot F_G$, also 217 N, entwickeln. Bei mittleren Fahrbahn- und Reifeneigenschaften ($\mu = 0,4$) kann man nur noch mit maximal $0,17 F_R$ entsprechend 141 N bremsen.

3.2.Vorderradbremse

Auch bei einer Betätigung der Vorderradbremse ist die zu entwickelnde Bremskraft F_R begrenzt:

$$F_R \leq \mu F_V \quad (12)$$

Im Unterschied zur Hinterradbremse wird jedoch durch die gemäß Glg. (6) bewirkte Gewichtsverlagerung nach vorn, d. h. Vergrößerung von F_V , die Grenze zwischen Haft- und Gleitreibung heraufgesetzt. Die dadurch möglich werdende Bremskraft-erhöhung kann jedoch nicht beliebig gesteigert werden.

a) Bei nicht zu guter Fahrbahn ($\mu < a/h$; in unserem Beispiel $\mu < 0,57$) kann auch das Vorderradbremsen zum Rutschen führen. Deshalb darf gemäß

Glg. (12) und (6) die Bremskraft nur bis zu einem Wert

$$F_{R,max} = F_G \cdot \mu b / (a + b - \mu h) \quad (13)$$

gesteigert werden, d.h. die Gewichtsverlagerung darf nur erfolgen bis zu einer Lastzunahme auf dem Vorderrad von

$$F_V = F_G \cdot b / (a + b - \mu h) \quad (14)$$

und einer Lastabnahme auf dem Hinterrad von

$$F_H = F_G \cdot (a - \mu h) / (a + b - \mu h) \quad (15)$$

b) Bei guter Fahrbahn ($\mu \geq a/h$; in unserem Beispiel: $\mu \geq 0,57$) kann die Bremsverstärkung nicht bis zur Gleitgrenze (Glg. (12)) getrieben werden. Denn schon vorher, bei einem Wert

$$F_R = F_G \cdot a / h, \quad (16)$$

lastet das gesamte Gewicht auf dem Vorderrad ($F_V, F_G, F_H = 0$). Eine weitere Steigerung von F_R führt zu einer Drehung um den Punkt V und damit zum Überschlag über den Lenker.

Beispiele:

Bei schlechter Fahrbahn (z. B. Glätte; $\mu = 0,3 < a/h = 0,57$) läßt sich maximal eine Bremskraft von $0,28 \cdot F_G$, also 231 N, entwickeln. Dies ist immer noch besser, als mit der Hinterradbremse bei extrem guter Fahrbahn zu bremsen (vgl. obiges Beispiel). Bei extrem guter Fahrbahn ($\mu = 0,8 > a/h = 0,57$) gerät man überhaupt nicht mehr ins Rutschen. Allerdings darf man die Bremskraft nicht über einen Wert von $0,57 \cdot F_G$, also 471 N, hinaussteigern, weil man sich sonst überschlägt.

3.3. Vorder- und Hinterradbremse

Es bleibt die Frage zu klären, ob die gleichzeitige Betätigung beider Bremsen zu einer größeren Bremswirkung führt. Wie man sich leicht anhand der obigen Überlegungen klarmacht, ist für den Fall eines Haftreibungskoeffizienten $\mu \geq a/h$ keine Bremsverbesserung möglich. Denn die Benutzung der Vorderradbremse führt bis zu einer Lastabnahme $F_H = 0$, wodurch hinten überhaupt keine Bremskraft mehr entwickelt werden kann.

Lediglich für den Fall $\mu < a/h$ kann bei Benutzung beider Bremsen die Bremskraft bis zum Maximalwert

$$F_{R,max} = \mu F_G \quad (17)$$

gesteigert werden, der durch jede Bremse allein nicht erreicht werden kann.

Beispiel:

Bei einem Haftreibungskoeffizienten $\mu = 0,4$ erreicht man eine maximale Bremskraft von $0,4 \cdot F_G$ statt $0,28 \cdot F_G$ bzw. $0,17 \cdot F_G$ im Falle der Benutzung der Vorder- bzw. Hinterradbremse allein.

In der Praxis kann es jedoch durchaus ratsam sein, über diesen Spezialfall hinaus beide Bremsen zu benutzen, weil dadurch beispielsweise eine bessere Dosierung der Kräfte und ein günstigeres Gleichgewichtsverhalten möglich ist.

4. Bremswege

Welche negativen Beschleunigungen lassen sich maximal erreichen? Im obigen Beispiel des optimalen Einsatzes der Vorderradbremse ergibt sich unter Benutzung von Glg. (12), (15) und (16) eine maximale Beschleunigung

$$a_{B,\max} = F_{R,\max} / m = \mu g = (a/h) \cdot g \quad (18)$$

($g = 9,81 \text{ m/s}^2$, Erdbeschleunigung).

Vorausgesetzt die Bremskraft bleibt während des gesamten Bremsvorgangs konstant, dann läßt sich aus der kinetischen Energie E_{kin} des Fahrrads und der Bremskraft F_R der Bremsweg s abschätzen:

$$s = E_{kin} / F_R \geq mv^2 / 2\mu F_V, \quad (19)$$

Im optimalen Fall ergibt sich gemäß Glg. (18)

$$s_{\min} = mv^2 / 2\mu mg = hv^2 / 2ag = v^2 / 2a_{B,\max} \quad (20)$$

Bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h muß demnach beispielsweise ein Bremsweg von mindestens 6,3 m einkalkuliert werden. Bei Benutzung der Hinterradbremse muß in diesem Fall selbst unter optimalen Straßenverhältnissen mit einem gut doppelt so langen Bremsweg gerechnet werden.

5. Energiedissipation

Die eigentliche Aufgabe der Bremsen besteht darin, die kinetische Energie, die ein Fahrrad in einer bestimmten Gefahrensituation besitzt, in möglichst kurzer Zeit aufzunehmen und durch Abgabe an die Umgebung (Dissipation) "unschädlich" zu machen. Der bei Anwendung einer konstanten Bremskraft im Mittel durch die Bremsen aufzunehmende Energiefluß beträgt

$$P = mv^2 / 2t,$$

wobei die Zeitdauer t vom Bremsbeginn bis zum Stillstand des Fahrrads gemäß $t = v/a_{B,\max}$ berechnet werden kann.

Wird beispielsweise ein Fahrrad unter diesen Bedingungen von $v = 30 \text{ km/h}$ zum Stillstand gebracht, so muß die Bremse immerhin einen Energiefluß von

$$P = mva_{B,\max} / 2 = (mv/2) \cdot (a/h) \cdot g = 1,934 \text{ kW}$$

verkräften, was etwa der Leistung einer großen Herdplatte entspricht. Geht man jedoch zum Beispiel von einer Trommelbremse mit einem Bremsquerschnitt von 25 cm^2 aus, so treten Energieflußdichten von maximal 774 kW/m^2 auf, was nur etwa ein Zehntel der für Kraftfahrzeuge zugelassenen Werte ist [3,S.158]. Außerdem dauert der Bremsvorgang im obigen Beispiel nicht einmal zwei Sekunden.

Überhitzungsprobleme der Bremsen sind daher allenfalls bei Dauerbremsungen, z. B. bei Bergabfahrten, zu erwarten.

6. Schluß

Die angestellten Betrachtungen haben folgendes gezeigt:

- Vorderradbremmen sind wesentlich wirkungsvoller als Hinterradbremmen. Bei unkontrollierter Betätigung kann die Bremskraft sogar zu stark werden und zu einem Überschlag über den Lenker führen.
- Hinsichtlich des Wärmeaufnahmevermögens sind die Fahrradbremsen im allgemeinen ausreichend dimensioniert.

In der Praxis erweisen sich jedoch viele Bremsen als unzureichend:

- Bei feuchtem Wetter büßen vor allem Felgenbremsen häufig an Wirkungsfähigkeit ein. Leider sind in der Regel gerade die Wichtigen Vorderradbremmen von diesem witterungsanfälligen Typ.

Literatur

- /1/SCHLICHTING, H. J.: Zur Gleichgewichtsproblematik beim Fahrradfahren. In: technic-didact 9 (1984) 4, S. 257ff.
- /2/SCHLICHTING, H. J.; NOBBE, R.: Untersuchungen zur Energetik des Fahrrads. In: technic-didact 8 (1983) 4, S. 225ff.
- /3/WHITT, F. R.; WILSON, D.: Bicycling Science. Cambridge etc.: THE MIT Press 1974, p. 159.