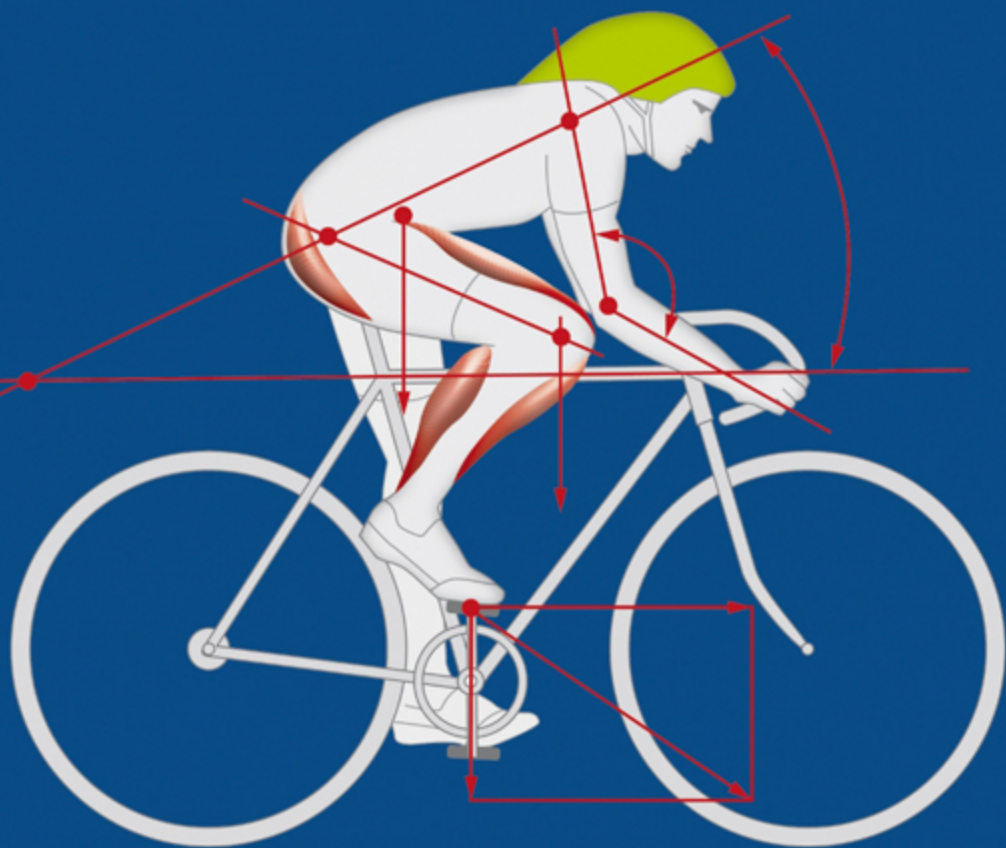


MICHAEL GRESSMANN

# FAHRRADPHYSIK UND BIOMECHANIK

TECHNIK | FORMELN | GESETZE



## Inhalt

### I Bewegung

- 8 Geschwindigkeit
- 12 Kreisbewegung, Drehbewegung
- 14 Winkelgeschwindigkeit
- 15 Abrollbewegung
- 18 Bezugssysteme
- 20 Beschleunigung
- 22 Anhalteweg
- 24 Beschleunigte Kreisbewegung

### II Kräfte und Momente

- 26 Fahrwiderstände
- 27 Trägheitskraft
- 30 Arbeit
- 30 Energie
- 32 Leistung
- 33 Wirkungsgrad
- 34 Drehmoment, Dreharbeit, Drehleistung
- 36 Rotatorischer Beschleunigungswiderstand und Drehenergie
- 40 Steigungswiderstand
- 42 Energieerhaltungssatz
- 46 Steigungsleistung
- 48 Haftreibung, Gleitreibung
- 55 Fahrwiderstand
- 55 Rollwiderstand
- 57 Walkwiderstand
- 59 Abrollwiderstand
- 64 Fahrbahnwiderstand
- 64 Rollwiderstandsleistung
- 65 Reibungswiderstand der drehenden Teile
- 66 Schwingungs- und Dämpfungswiderstand

- 68 Luftwiderstand
- 73 Luftwiderstandsleistung
- 76 Reibungs- oder Zähigkeitswiderstand
- 78 Windschattenfahren
- 79 Luftwiderstand der Laufräder
- 81 Einfluss der Luftdichte auf den Luftwiderstand
- 85 Fahren in der Kurve
- 90 Reibungskräfte in der Kurve
- 93 Kurventechnik
- 95 Überhöhte Fahrbahn
- 96 Das Fahrrad im Gleichgewicht
- 97 Drehimpuls und Drehenergie
- 101 Das Rad als Kreisel
- 110 Das Einleiten der Kurve
- 111 Physik der Speiche
- 117 Seitensteifigkeit der Laufräder

### III Lenkgeometrie

- 118 Nachlauf, Lenkkopfwinkel und Versatz
- 124 Vorderradabsenkung, Sturz und Lenkwinkel
- 125 Radstand
- 126 Schräglaufwinkel, Untersteuern, Übersteuern
- 129 Raddurchmesser
- 131 Flattern und Pendeln

### IV Bremsen

- 134 Grundlagen
- 139 Radlastverlagerung
- 143 Bremsen in der Kurve
- 145 Überschlagen
- 147 Kraftverlauf im Bremskörper einer Seitenzugbremse
- 150 Cantileverbremse
- 151 V-Bremse

- 151 Hydraulische Felgenbremse
- 152 Felgen- oder Scheibenbremse?

## **V Kraftübertragung**

- 154 Antriebsmaschine Mensch
- 159 Verhältnis der Drehzahlen
- 159 Verhältnis der Drehmomente
- 160 Verhältnis der Zähnezahlen
- 162 Verhältnis der Kräfte
- 164 Verhältnis der Wege
- 165 Entfaltung
- 166 Entfaltungsschritt
- 166 Stufensprung, Gangsprung
- 167 Übersetzungsbereich
- 168 Kapazität
- 168 Überschneidung
- 169 Wirkungsgrad Fahrradgetriebe
- 169 Auslegung einer Kettenschaltung
- 171 Arithmetische Stufung
- 173 Geometrisch lineare Stufung
- 175 Geometrisch progressive Stufung
- 176 Geometrisch degressive Stufung
- 176 Ergonomische Stufung
- 183 Harte und weiche Gänge
- 185 Der runde Tritt
- 189 Die vier Phasen
- 193 Asymmetrisches Kettenblatt

## **VI Muskeln**

- 195 Muskeleinsatz beim Pedalieren
- 197 Die beteiligten Muskeln
- 199 1 Bewegung im Hüftgelenk
- 204 2 Bewegung im Kniegelenk
- 207 Einschub: Das Knie
- 211 3 Bewegung im Fußgelenk
- 214 Pedalstellung
- 217 Muskeln des Oberkörpers

- 218 Einschub: Herz und Kreislauf
- 219 Muskelwirkungsgrad
- 220 Energie- und Leistungsbilanz
- 224 Trittfrequenz

## **VII Fahrtechniken**

- 227 Fahren in der Ebene
- 227 Bergabfahren
- 228 Bergauffahrt
- 228 Wiegetritt

## **VIII Anpassung und Bikefitting**

- 232 Sitzposition
- 234 1 Körpermaße
- 236 2 Fahrradmaße
- 236 Rahmenhöhe und Sitzrohrlänge
- 238 Rahmen- und Oberrohrlänge
- 240 Stack to Reach
- 241 Tretkurbellänge
- 242 Drei Positionsmaße
- 242 Sitzhöhe
- 244 Sattelneigung
- 244 Sattelstellung
- 245 Sitzbreite, Sattelbreite
- 246 Schwerpunktmethod
- 247 Sitzlänge
- 249 Überhöhung, Lenkerhöhe
- 250 Lenkerbreite
- 251 Pedale und Fußstellung

## **IX Anlage**

- 254 Anlage: Folienmodell
- 258 Anlage cwA-Wert
- 259 Anlage Bremsweg
- 260 Literaturauswahl
- 261 Sachwortverzeichnis

## **Vorwort**

Das Fahrrad – so wie wir es heute kennen – hat die letzten zwölf Jahrzehnte überstanden, ohne dass wesentliche Baugruppen verändert werden mussten. Verbesserungen sind aber weiterhin möglich: Erhöhung der Fahrleistung durch Senkung der Fahrwiderstände, ergonomische Anpassung des Antriebsmechanismus an den Menschen, höherer Fahrkomfort durch schwingungsdämpfende Bauelemente, Wetterschutz, Erhöhung der aktiven und passiven Sicherheit und nicht zuletzt der Einsatz umweltverträglicher Werkstoffe.

Fast jeder von uns kann Radfahren und mit dem Rad umgehen. Aber haben wir damit schon das Radfahren verstanden? Je mehr wir uns mit der angeblich so einfachen und überschaubaren Technik des Radfahrens beschäftigen, desto komplizierter erscheinen uns die Zusammenhänge. Warum müssen wir zum Beispiel Schlangenlinien fahren, um das Gleichgewicht zu halten? Was passiert tatsächlich, wenn wir uns in die Kurve legen? Unter welchen Umständen verliert das Vorderrad beim Bergauffahren den Bodenkontakt und wann dreht das Hinterrad durch? Bei welcher Bremsverzögerung "gehen wir über den Lenker"? Wer ist bergab schneller: ein leichter oder ein schwerer Fahrer bei sonst gleichen Bedingungen? Warum lernen Kinder Radfahren leichter, wenn sie schneller fahren?

Das Fahrrad ist nicht nur ein Verkehrsmittel, sondern auch ein ausgezeichnetes Sportgerät. Aus dem Zusammenspiel zwischen Mensch und Maschine ergeben sich viele neue Fragen. Welche Fahrweise ist ökonomischer (gleiche Fahrgeschwindigkeit vorausgesetzt): kleine Übersetzung und hohe Kurbeldrehzahl oder große Übersetzung und geringe Drehzahl? Wie kann ich meine Dauerleistung messen? Wie finde ich meine günstigste Sitzposition? Und für Sportler und Nichtsportler gleichermaßen wichtig ist das Verständnis des "Runden Tritts".

Auf diese und viele andere Fragen will das Buch eine Antwort geben und damit einen Beitrag leisten, das nur anscheinend so einfache Fahrradfahren besser verständlich zu machen. Dabei wird das Fahrrad berechtigterweise vom Niveau eines primitiven Gebrauchsgegenstandes, wie es der Begriff "Drahtesel" unterstellt, auf den Platz gehoben, der ihm zukommt: den einer großartigen Schöpfung menschlichen Erfindergeistes. Es waren viele Handwerker und Tüftler, die das Fahrrad immer weiter verbesserten, so dass wir heute sagen können: Es gibt keine Maschine, die die Muskelkraft auf Wegen und Straßen besser ausnutzt und intelligenter einsetzt als das Fahrrad.

## **Vorwort zur 12. Auflage**

Die "Fahrradphysik und Biomechanik" hat eine weite Verbreitung gefunden und viele Rezensionen und Leserbriefe zeigen das große Interesse an Themen rund um das Fahrrad. Die Neuauflage nimmt nützliche Anregungen aus der Korrespondenz mit den Lesern auf, beantwortet viele neue Fragen und vertieft das Thema „bikefitting“.

Inzwischen hat sich eine neue Fahrrad-Bauart etabliert: Das elektrisch unterstützte Fahrrad, bekannt unter dem Namen „Pedelec“. Wer sich über die Technik und die physikalischen Hintergründe genauer informieren will, sei auf das Buch Fachwissen E-Bike (Verlag Europa Lehrmittel) verwiesen.

Noch ein Hinweis: Wenn im Buch die Rede vom Leser oder Radfahrer ist, ist auch immer die weibliche Form gemeint.

## I Bewegung

### Geschwindigkeit

Arbeits erleichterung, Bequemlichkeit und das Streben nach Perfektion sind die Triebfedern der meisten Entdeckungen und Erfindungen. Auch auf viele Teile des Fahrrades und das Rad selbst treffen die Wünsche zu, bei der Fortbewegung Energie zu sparen und Strecken in kürzerer Zeit zu überwinden.

Während ein Fußgänger mit einer Leistung von ungefähr  $P = 50$  Watt in einer Stunde 5 km zurücklegt ( $v = 5$  km/h oder 1,4 m/s), erreicht ein Radfahrer mit einem normalen Stadtrad bei gleicher Leistung eine Geschwindigkeit von ca. 20 km/h oder 5,6 m/s. Unter "Leistung" versteht man in der Physik und Technik das Produkt aus Kraft x Geschwindigkeit. Der vierfache Geschwindigkeitszuwachs resultiert aus der Kraftersparnis, denn die Leistung ist in beiden Fällen die gleiche: 50 Watt.

$$F_F \cdot v_F = F_R \cdot v_R \quad (F \text{ für Fußgänger, } R \text{ für Radfahrer})$$

$$\frac{F_F}{F_R} = \frac{v_R}{v_F} = \frac{20}{5} = 4 : 1$$

Der Radfahrer sitzt im Sattel und erspart so den Beinmuskeln, den Körper zu unterstützen. Sein Körpergewicht wird von den beiden Laufrädern aufgenommen. Es wird **nicht** wie beim Fußgänger von der Stützmuskulatur in einer aufrechten Position gehalten und dauernd auf und ab bewegt. Beim Gehen und Laufen wird sehr viel isometrische Arbeit verrichtet, die sich in keiner äußeren Wirkung zeigt und damit für die Fortbewegung verloren ist.

Hinzu kommen noch andere Vorteile: Die Hubarbeit der Beine ist beim Radfahren geringer. Außerdem verursachen beim Gehen und Laufen die unelastischen Stöße der Füße gegen den Boden Schwingungen, die zum Teil als Wärme verloren gehen.

Blieben wir bei der physikalischen Größe "Geschwindigkeit". Auf dem Tachometer – dem Bordcomputer beim Fahrrad – lesen wir während der Fahrt die Momentangeschwindigkeit  $v$  ab. Der Rechner teilt die zurückgelegte Strecke (z. B. 30 Radumdrehungen von je 2,2 m,  $s = 66$  m)<sup>1</sup> durch die dafür benötigte Zeitspanne (z. B.  $t = 10$  Sekunden) und zeigt das Ergebnis an:

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Strecke}}{\text{Zeit}} \quad v = \frac{s}{t} = \frac{66 \text{ m}}{10 \text{ s}} = 6,6 \text{ m/s} \quad \text{oder} \quad v \approx 24 \text{ km/h}$$

Die Momentangeschwindigkeit ist umso genauer, je kürzer die Dauer der Messzeit ist. Manche Computer speichern die Höchstgeschwindigkeit, die man auf Knopfdruck ablesen kann.

Von Interesse ist noch die mittlere Geschwindigkeit  $v_m$ . Sie errechnet sich aus einer größeren Wegstrecke und der dafür benötigten Zeitspanne – auch wenn wir zwischendurch bummeln oder sprinten.

$$\text{Mittlere Geschwindigkeit} = \frac{\text{Gesamtweg}}{\text{Gesamtzeit}} \quad v_m = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}$$

Dabei ist  $s_1$  der in der Zeit  $t_1$  und  $s_2$  der in der Zeit  $t_2$  zurückgelegte Weg.

<sup>1</sup> Im Folgenden rechnen wir mit einem 28"-Rad 32 – 622 und einem Reifenumfang von 2,2 m. Der Raddurchmesser beträgt dann 2,2 m : 3,14 = 0,7 m und der Radradius 0,35 m.

Ein Beispiel: Um 10.05 Uhr fährt der Radfahrer am Kilometerstein 18 vorbei und um 11.35 Uhr am Kilometerstein 42. Seine mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  beträgt dann:

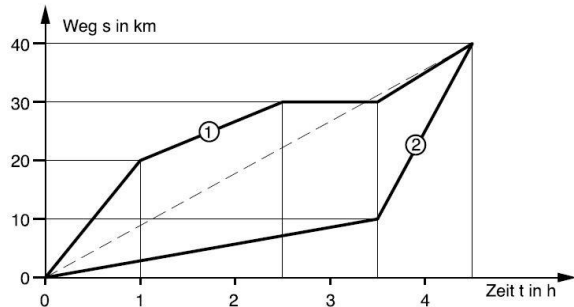
$$v_m = \frac{42 \text{ km} - 18 \text{ km}}{11.35 \text{ h} - 10.05 \text{ h}} = \frac{24 \text{ km}}{1,5 \text{ h}} = 16 \text{ km/h}$$

Dem Weg-Zeit-Diagramm (Bild 1) von zwei Radfahrern entnehmen wir mehrere Aussagen:

- Die Momentangeschwindigkeiten  $v$  der drei Etappen von Radfahrer 1 und der zwei Etappen von Radfahrer 2. Die Steigung der Geraden sagt etwas über die Geschwindigkeit aus: Je flacher sie verläuft, desto geringer ist die Geschwindigkeit. Bei der Pause von Radfahrer 1 ist die Steigung Null und demnach ist hier auch die Geschwindigkeit Null.
- Die Dauer der Pause von Radfahrer 1. Die Zeit läuft zwar weiter, er legt aber keine Strecke zurück. Viele Fahrradcomputer unterbrechen im Stillstand die Zeiterfassung.
- Die mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  als Gesamtweg geteilt durch die Gesamtzeit als gestrichelte Linie.

Bild 1

Weg-Zeit-Diagramm  
(s/t-Diagramm)  
von zwei Radfahrern



Der Fahrer 1 absolviert die erste Etappe mit der Geschwindigkeit  $v = 20 \text{ km/h}$ , der Fahrer 2 fährt erst in der letzten Stunde mit  $v = 30 \text{ km/h}$ . Die mittlere Geschwindigkeit beider Fahrer ist die gleiche:

$$V_m = \frac{40 \text{ km}}{4,5 \text{ h}} = 8,9 \text{ km/h}$$

Fahrer 2 kann diese Durchschnittsgeschwindigkeit direkt von seinem Computer ablesen, Fahrer 1 dagegen liest einen größeren Wert ab:  $v_m = 40 \text{ km} : 3,5 \text{ h} = 11,4 \text{ km/h}$ . Die Uhr in seinem Rechner hat sich eine Pause gegönnt.

Während der Fahrt zeigt der Fahrradcomputer ständig die „Momentangeschwindigkeit“ an. Ein Impulsgeber (Reed-Kontakt) zählt die Radumdrehungen  $n$ , der Rechner multipliziert mit dem einprogrammierten Raddurchmesser  $d$  und der Zahl  $\pi$  und bestimmt so die zurückgelegte Strecke  $s$ :

$$s = d \cdot \pi \cdot n$$

Anschließend teilt der Rechner das Produkt durch die dafür benötigte Zeit und das Ergebnis erscheint im Display. Für ganz Genaue: Ich habe die Momentangeschwindigkeit in Anführungszeichen gesetzt. In Wirklichkeit ist es die Durchschnittsgeschwindigkeit bezogen auf mindestens einen Radumlauf. Die meisten Fahrradcomputer zeigen auch nach Bedarf Durchschnittsgeschwindigkeiten über längere Zeiträume hinweg an.

Der Begriff "Durchschnittsgeschwindigkeit" ist nicht so einfach zu verstehen, wie es den Anschein hat. Dazu ein Beispiel: Ein Radfahrer fährt die  $s = 40$  Kilometer lange Strecke von Adorf nach Behausen mit einer Geschwindigkeit von  $v_1 = 30$  km/h. Auf dem Rückweg nach Adorf ist er müde geworden und fährt nur noch mit einer Geschwindigkeit von  $v_2 = 10$  km/h. Wie groß ist jetzt seine Durchschnittsgeschwindigkeit  $v_m$ ?

Ein (oberflächlicher) Betrachter rechnet den arithmetischen Mittelwert aus:

$$v_m = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{30 \text{ km/h} + 10 \text{ km/h}}{2} = 20 \text{ km/h}$$

Aber nach genauer Überlegung merken wir, dass die Rechnung so nicht stimmt. Tatsächlich ist die Durchschnittsgeschwindigkeit kleiner! Warum? Nun, für den Hinweg benötigt der Radfahrer eine wesentlich kürzere Zeit als für den genauso langen Rückweg. Nur wenn beide Zeitspannen gleich lang sind, können wir mit dem arithmetischen Mittelwert rechnen.

Wie groß ist die korrekte Durchschnittsgeschwindigkeit? Dazu rechnen wir zuerst die Zeitspannen für die Hin- und Rückfahrt aus:

$$t_1 = \frac{s_1}{v_1} = \frac{40 \text{ km}}{30 \text{ km/h}} = 1,33 \text{ h} \quad t_2 = \frac{s_2}{v_2} = \frac{40 \text{ km}}{10 \text{ km/h}} = 4 \text{ h}$$

Der Rückweg dauert dreimal so lange:  $t = t_1 + t_2 = 1,33 \text{ h} + 4 \text{ h} = 5,33 \text{ h}$

$$\text{Durchschnittsgeschwindigkeit: } v_m = \frac{s_1 + s_2}{t} = \frac{80 \text{ km}}{5,33 \text{ h}} = 15 \text{ km/h}$$

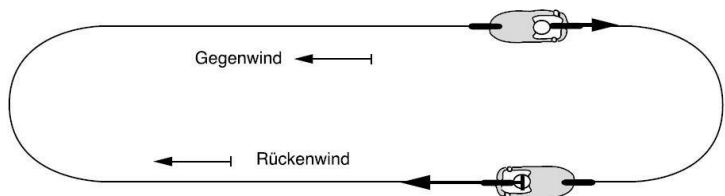
Geschwindigkeiten sind gewichtete Größen. Für Durchschnittsgeschwindigkeiten bestimmt man das harmonische Mittel – falls die zurückgelegten Wege gleich lang sind:

$$v_m = \frac{2 \cdot v_1 \cdot v_2}{v_1 + v_2} = \frac{2 \cdot 30 \text{ km/h} \cdot 10 \text{ km/h}}{30 \text{ km/h} + 10 \text{ km/h}} = 15 \text{ km/h} \quad \text{und kommt auf das gleiche Ergebnis.}$$

Jetzt können wir verstehen, warum bei Rundstreckenrennen die gefahrenen Zeiten immer schlechter sind, wenn ein gleichmäßiger Wind weht. Auch wenn der Geschwindigkeitsgewinn auf der Rückenwindgeraden den Geschwindigkeitsverlust auf der Gegenwindgeraden voll ausgleicht, sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit, denn für die gleich langen Teilstrecken braucht der Fahrer unterschiedliche Zeitspannen (Bild 2).

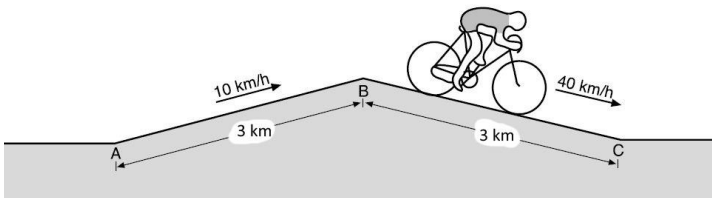
Bild 2

Zeitverlust beim Rundstreckenrennen



So ist auch zu verstehen, dass sich ein Zeitverlust beim Bergauffahren nicht mit dem Zeitgewinn bei der Bergabfahrt kompensieren lässt. Ein Radfahrer, der die 3 km lange Steigung von A nach B mit einer mittleren Geschwindigkeit von 10 km/h fährt und die gleich lange Strecke von B nach C bergab mit 40 km/h, benötigt eine wesentlich längere Zeit als der Fahrer, der die gesamte Strecke mit einer gleichmäßigen mittleren Geschwindigkeit von 30 km/h fährt (Bild 3).

Bild 3: Zeitbedarf beim Bergauf/Bergabfahren



Zeitbedarf bei gleichmäßigen 30 km/h:  $t = \frac{6 \text{ km}}{30 \text{ km/h}} = 0,2 \text{ h} = 12 \text{ min}$

Zeitbedarf beim Bergauf/Bergabfahren:

$$t = \frac{3 \text{ km}}{10 \text{ km/h}} + \frac{3 \text{ km}}{40 \text{ km/h}} = \frac{15 \text{ km}}{40 \text{ km/h}} = 0,375 \text{ h} = 22,5 \text{ min}$$

Geschwindigkeiten sind sog. "Vektoren" und lassen sich gut als Pfeile darstellen. Der Pfeil gibt die Richtung des bewegten Körpers an und die Pfeillänge macht eine Aussage über den Betrag (oder die Größe) der Geschwindigkeit. In Bild 2 zeigen die dünnen Pfeile die Windrichtung an: von rechts nach links (oder von Ost nach West, wenn man das Buch in Nordrichtung hält). Und der Betrag der Windgeschwindigkeit? Wir legen einen Maßstab fest: z.B. entspricht  $1 \text{ cm} \hat{=} 2 \text{ m/s}$ . Dann weht der Wind mit  $v = 2 \text{ m/s} \cdot 1,5 = 3 \text{ m/s}$ .

Wir unterscheiden zwischen gleichförmiger und ungleichförmiger Bewegung. Bei der gleichförmigen Bewegung ändern sich weder die Richtung noch der Betrag der Geschwindigkeit. Eine einmal angestoßene Kugel bewegt sich auf einer horizontalen Bahn anfangs gleichförmig – der Trägheit folgend. Aber dann wird die Kugel langsamer, weil Reibungskräfte sie abbremsen.

Wenn äußere Kräfte auf einen Körper einwirken, ist die Bewegung nicht mehr gleichförmig (Bild 4, I). Dann ist sie entweder beschleunigt (Bild 4, II), verzögert (Bild 4, III) oder es ändert sich die Bewegungsrichtung. Doch davon später mehr.

Bild 4

Gleichförmige (I)  
und ungleichförmige (II, III)  
Bewegung

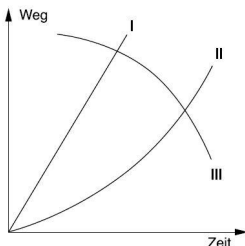


Bild 5 Isaak Newton





"Jeder Körper verharrt im Zustand der gleichförmigen, geradlinigen Bewegung, solange er nicht durch äußere Kräfte gezwungen wird, seinen Bewegungszustand zu ändern."

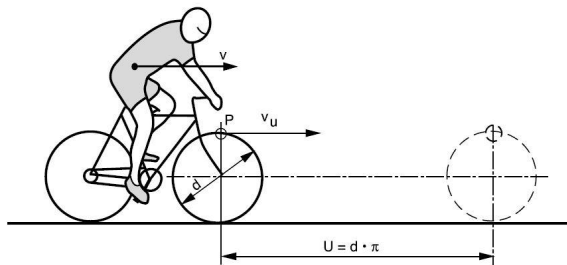
Dieses Zitat von Isaac Newton (Bild 5) zieht sich als roter Faden durch die Fahrradphysik.

### Kreisbewegung, Drehbewegung <sup>2</sup>

Bisher haben wir nur von Körpern gesprochen, die sich auf einer geradlinigen Bahn bewegen. Beim Radfahren spielt die kreisförmige Bewegung eine weitere wichtige Rolle. Auch hier betrachten wir zunächst nur die gleichförmige Kreisbewegung, bei der der Geschwindigkeitsbetrag gleich bleibt (die Bewegungsrichtung ändert sich ständig – deshalb ist jede Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung, wie später gezeigt wird).

Der Radfahrer in Bild 6 fährt mit einer Fahrgeschwindigkeit von  $v = 36 \text{ km/h}$  ( $10 \text{ m/s}$ ) auf einer geraden Straße. Mit welcher Umfangsgeschwindigkeit  $v_u$  bewegt sich ein Punkt P auf dem Reifenumfang? Wie groß ist die Drehzahl  $n$  des 28"-Rades?

**Bild 6** Der Punkt P auf dem Radumfang bewegt sich mit der Umfangsgeschwindigkeit  $v_u$ , die gleich der Fahrgeschwindigkeit  $v$  ist. Bei einer Umdrehung legt der Punkt P den Weg des Radumfangs zurück:  $U = d \cdot \pi$ . Den gleichen Weg legt dann auch der Radfahrer zurück.



Wenn der Reifen auf der Fahrbahn nicht gleitet, sondern schlupffrei abrollt <sup>3</sup>, muss die Umfangsgeschwindigkeit gleich der Fahrgeschwindigkeit sein:  $v = v_u$ . In einer Sekunde legt sowohl der Radfahrer als auch der Punkt P auf dem Reifen eine Strecke von 10 Metern zurück. Beträgt der Radumfang eines Rades  $U = 2,2 \text{ m}$ , dann dreht sich das Rad pro Sekunde

$$\text{Zahl der Umdrehungen} = \frac{\text{zurückgelegte Strecke}}{\text{Radumfang}} \quad z = \frac{s}{U} = \frac{10 \text{ m}}{2,2 \text{ m}} = 4,55 \text{ mal.}$$

In einer Minute dreht sich das Rad dann 60mal so oft:  $n = 60 \cdot 4,55 = 273 \text{ mal.}$

<sup>2</sup> Bei einem sich um eine Achse drehenden Rad spricht man von einer Drehbewegung. Bei einer Kreisbewegung ist der Radius groß gegenüber dem bewegten Körper, wie z. B. bei einem Radfahrer, der eine Kurve fährt. Daneben gibt es noch die Abrollbewegung (siehe Seite 16).

<sup>3</sup> Tatsächlich ist immer ein kleiner Schlupf notwendig, damit Antriebskräfte wirken können.

Die Formel zur Berechnung der Drehzahl lautet:  $n = \frac{\text{Fahrgeschwindigkeit } v}{\text{Radumfang } U} \quad n = \frac{v}{d \cdot \pi}$

Setzen wir die Fahrgeschwindigkeit  $v$  in km/h und den Radumfang  $U$  in m ein, müssen wir noch mit 16,7 multiplizieren, damit für die Drehzahl die gebräuchliche Einheit in  $n =$  Umdrehungen pro Minute ( $U/\text{min}$  bzw.  $1/\text{min}$  oder  $\text{min}^{-1}$ ) oder in  $f =$  Umdrehungen pro Sekunde für die Frequenz ( $\text{s}^{-1}$ ) herauskommt:

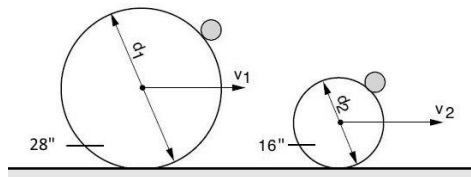
$$n = \frac{16,7 \cdot v}{d \cdot \pi} = \frac{16,7 \cdot 36}{0,7 \cdot 3,14} \approx 273 \text{ 1/min} = 273 \text{ min}^{-1} \quad \text{oder} \quad f \approx 4,6 \text{ s}^{-1}$$

Probe:  $n = \frac{36\,000 \text{ m}}{0,7 \text{ m} \cdot 3,14 \cdot 60 \text{ min}} \approx 273 \text{ min}^{-1}$

Ein Beispiel: Vater und Sohn radeln mit gleicher Geschwindigkeit nebeneinander her. Der Vater benutzt ein Herrenrad mit großen 28"-Rädern, der Sohn ein Kinderfahrrad mit 16"-Rädern (Bild 7). Beide Fahrräder haben den gleichen Dynamotyp (Seitendynamo) <sup>4</sup> und die gleiche Glühlampe. Welche Lampe leuchtet heller?

Bild 7

Welche Lampe leuchtet heller?



Beide Lampen leuchten gleich hell. Wenn die Fahrräder die gleiche Fahrgeschwindigkeit haben, muss auch die Umfangsgeschwindigkeit der Laufräder gleich sein:

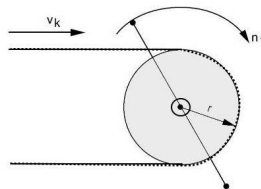
$$v_1 = v_2 \quad d_1 \cdot \pi \cdot n_1 = d_2 \cdot \pi \cdot n_2 \quad \rightarrow \quad n_2 = \frac{d_1}{d_2} n_1$$

Weil  $d_1$  um den Faktor  $28"/16" = 1,75$  mal größer als  $d_2$  ist, muss die Drehzahl des kleineren Rades auch 1,75 mal größer sein. Über die höhere Drehzahl des kleinen Rades wird so die gleiche Umfangsgeschwindigkeit erzielt. Der von den Speichen verursachte Luftwiderstand ist bei beiden Radgrößen dagegen unterschiedlich groß (siehe Seite 79).

Jetzt rechnen wir aus, mit welcher Geschwindigkeit  $v_k$  sich die Kette bewegt, wenn der Radfahrer mit einer Trittfrequenz von  $n_1 = 90 \text{ U/min}$  (bzw.  $n_1 = 90 \text{ 1/min}$ ) in die Pedale tritt. Der (Teilkreis)Radius des 52-Kettenblattes soll  $r = 105 \text{ mm}$  betragen (Bild 8).

Bild 8

Geschwindigkeit der Fahrradkette (bezogen auf das Fahrrad als Bezugssystem)



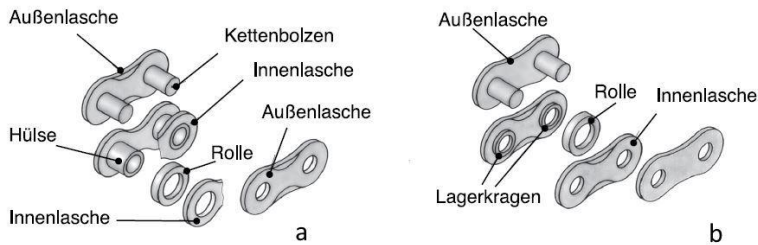
<sup>4</sup> Anders stellt sich die Situation bei einem Nabendynamo dar, dessen Leistung von der Radgröße abhängt.

Der Kurbel-Kettentrieb wandelt eine kreisförmige Bewegung (Rotation) in eine geradlinige Bewegung (Translation) um. Die Trittfrequenz des Fahrers ist gleich der Drehzahl des Kettenblattes. Die Länge des Kurbelarmes spielt hier keine Rolle.

$$v_k = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n = 2 \cdot 0,105 \text{ m} \cdot 3,14 \cdot 90 \frac{1}{\text{min}} \approx 60 \text{ m/min} \approx 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

In diesem Beispiel läuft die Kette mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s oder 3,6 km/h um und ist an jedem Punkt gleich groß. Der Geschwindigkeitsunterschied zwischen den auf den Hülsten drehbaren Rollen einer Rollenkette (Bild 9 a), die ja vor der Berührung mit den Zahnflanken des Kettenblattes in Ruhe sind, ist ein Grund für den Verschleiß. Eine Weiterentwicklung der klassischen Rollenkette als Schaltungskette ist die Lagerkragenkette (Bild 9 b).

Bild 9 a) Rollenkette, Hülsenkette b) Lagerkragenkette



### Winkelgeschwindigkeit

In der Technik verwendet man statt der Drehzahl  $n$  oft die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ . Warum? Bei einem gleichmäßig drehenden Rad haben die achsenfernen Punkte eine höhere Umfangsgeschwindigkeit als die achsennahen.

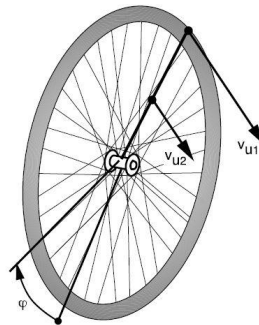
Die Formel  $v_u = 2 \cdot r \cdot \pi$  sagt, dass mit größerem Radius auch die Geschwindigkeit steigt. Die einzelnen Speichennippel eines schnell drehenden Rades können wir kaum noch unterscheiden, während sich bei der gleichen Drehzahl die Speichenbögen im Nabenflansch vergleichsweise langsam bewegen.

Bild 10

Je größer der Radius  $r$ , desto größer ist auch die Umfangsgeschwindigkeit  $v_u$

$$v_{u1} > v_{u2}$$

Die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  (für  $\omega$  lies omega) dagegen ist bei der gleichförmigen Kreisbewegung konstant.



Jede Strecke vom Radmittelpunkt M zu einem beliebigen Punkt P eines drehenden Rades (siehe Bild 10) überstreicht in der gleichen Zeitspanne  $t$  den gleichen Winkel  $\varphi$ . Die Formeln für die geradlinige und der kreisförmigen Bewegung sind einander ähnlich:

$$v = \frac{s}{t} \quad \text{entspricht} \quad \omega = \frac{\varphi}{t} \quad \text{mit dem Winkel } \varphi \text{ im Bogenmaß.}$$

Betrachten wir einen vollen Umlauf in der Zeit  $T$ , so überstreicht jeder Radpunkt einen Winkel von  $\varphi = 360^\circ$ . Bei einem Kreis mit dem Radius  $r = 1$  (z. B.  $r = 1$  m oder  $r = 1$  cm ..) legt der Radpunkt dabei den Weg  $s = 2 \cdot l \cdot \pi = 2 \cdot \pi$  zurück. Für die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  erhalten wir dann die einfache Formel:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad \text{mit der Einheit } 1/\text{s} \text{ oder } \text{s}^{-1}$$

Zwischen der geradlinigen und der kreisförmigen Bewegung besteht der Zusammenhang:

Umfangsgeschwindigkeit = Winkelgeschwindigkeit mal Radius:  $v_u = \omega \cdot r$

$$\text{Beweis: } \omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{2 \pi \cdot r}{T \cdot r} = \frac{v}{r} \quad \text{wegen} \quad v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

Man bezeichnet  $\frac{1}{T}$  auch als Drehfrequenz  $n$ .

$$\text{Damit ergibt sich mit } \omega = \frac{2 \cdot \pi}{1/n} \text{ für die Winkelgeschwindigkeit } \omega: \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

Rechnet man mit einer Drehzahl  $n$  in Umdrehungen pro Minute oder 1/min (bzw.  $\text{min}^{-1}$ ), so ergibt sich:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad \text{bzw.} \quad \omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$$

Eselsbrücke: "Pi mal n durch dreißig, ist Omega, das weiß ich."

Wie groß ist die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  der 28"-Laufräder des mit  $v = 36$  km/h (= 10 m/s) dahinrollenden Radfahrers? Die Raddrehzahl beträgt (siehe Seite 13)  $n = 273$  U/min.

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 273}{30} = 28,6 \frac{1}{s} \quad \text{oder } 28,6 \text{ s}^{-1}$$

Mit den Begriffen "Winkelgeschwindigkeit" und "Winkelbeschleunigung" können wir die Zentralkräfte in der Kurvenfahrt, die Trägheitskräfte der rotierenden Teile und die wichtigen Kreiselvorgänge besser verständlich machen. Wir werden uns später damit beschäftigen.

### Abrollbewegung

Wir müssen gut unterscheiden zwischen der Drehbewegung des Rades um die Drehachse (oder Radachse  $x - x$ , siehe Bild 11) und dem Abrollen auf der Fahrbahn. Beim Abrollen verhält sich das Rad völlig anders: Die Achse ist nicht mehr raumfest, sondern bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $v$  in Fahrtrichtung. Das Rad dreht sich dabei um die Abrollachse  $y - y$  (Bild 11 a).

Aber aufgepasst! Boden und Rad bewegen sich nicht gegeneinander wie ein Klotz, den man über eine Unterlage zieht. Eine solche gegenseitige Bewegung nennt man "Gleiten".

**Sachwortverzeichnis****A**

Abbremsung	138
Abrollen	12, 15, 17
Abrollwiderstandszahl	60
Ackermannwinkel	126
Adhäsion	59
american position	233, 245
Anhalteweg	22
Antagonist	198
Antriebskraft	26
Aquaplaning	53, 63
Arbeit	30
Arithmetische Stufung	171
Arthrose	209
Asymmetrisches Kettenblatt	193
Äußere Kräfte	26

**B**

Barometrische Höhenformel	83
Beschleunigte Kreisbewegung	24
Beschleunigung	20
Beschleunigungsarbeit	30
Bezugssystem	18
biceps femoris	201, 209
Bikefitting	232
Biomechanisches Optimum	188
Blutdruck	226
Bogenmaß	15
Boyle-Mariottesches Gesetz	82
Bremsen	134
Bremskraft	135
Bremsverzögerung	136, 140
Bremsweg	22, 136, 259
Bremszeit	22

**C**

Cantileverbremse	151
Carnot'scher Wirkungsgrad	221
Coulomb	49
$c_w$ -Wert	258
$c_w$ -Wert	71

**D**

Dämpfung	66
Dauerleistung	32
Degressive Stufung	176
Dreharbeit	34

Drehbewegung	12
Drehfrequenz	15
Drehimpuls	97
Drehleistung	34
Drehmoment	34, 98
Drehmomentwandler (Getriebe)	155
Drehzahl	13
Druckphase	190
Druckspeiche	115
Druckwiderstand	68
Durchschnittsgeschwindigkeit	8
Dynamische Arbeit	96

**E**

Energie	30
Energiebilanz	220
Energieerhaltungssatz	42
Entfaltung	165
Entfernung (Gangschaltung)	165
Ergonomische Stufung	176

**F**

Fading	137
Fahrbahnwiderstand	64
Fahrradmaße	236
Fahrwiderstand	26, 55
Flaschenzug	164
Flattern	119, 131
Frequenz	13
Fußstellung	251

**G**

Galilei	29
Gefederte Masse	130
Gesamtübersetzung	167
Gesamtumsatz	221
Gesäßmuskel	200
Geschwindigkeit	8
Gewichtskraft	29
Gleichförmige Bewegung	11
Gleichgewicht	96
Gleitreibung	48
Goldene Regel der Mechanik	40, 163
Größter Gang	46, 165
Grundgesetz der Dynamik	28, 38
Grundumsatz	220

<b>H</b>		Mindestbremswirkung	136
Haftreibung	48	Mindestverzögerungen	24
Hangabtriebskraft	40	Momentangeschwindigkeit	8
Hangig-Off-Technik	94	Momentanpol	16
Harte Gänge	183	Muskeleinsatz	190, 195
Herz	218	Muskelmotor	156
Horizontalposition	244		
Hubarbeit	40	<b>N</b>	
Hubphase	190	Nachlauf	118
Hüftgelenk	199	Nachlauf-Hebelarm	119
Hydraulische Felgenbremse	151	Newton	11
Hydrodynamisches		Normalbeschleunigung	25
Paradoxon	70	Normalleistung	33, 46
Hysterese (Speiche)	66		
		<b>O</b>	
<b>I</b>		Oberrohrlänge	238
Impuls	85, 96		
Induzierter Widerstand	68	<b>P</b>	
Innenbeinlänge	235	Pedalstellung	214
Isometrische Kontraktion	196	Pendeln	133
		Periodendauer	38
<b>K</b>		Physikalisches Optimum	187
Kammischer Kreis	143	Prandtl	77
Kapazität	168	Präzession	103
Kettenschaltung	169	Profil	63
Kippmoment	104	Progressive Stufung	175
Kleinster Gang	46, 165		
Knie	193, 204	<b>Q</b>	
Kniescheibe	206	Quadriceps	204
Körpermaße	235	Querwiderstand	69
Kraftschlussbeiwert	50		
Kreisbewegung	12	<b>R</b>	
Kreisel	101	Radialbeschleunigung	24
Kreiselmoment	104	Radialkraft	195
Kurzleistung	32	Radialspeichung	114
		Radlast	56
<b>L</b>		Radlastverlagerung	139
Laminare Strömung	77	Radstand	125
Latsch	57	Rahmenhöhe	236
Leistung	8, 32	Rahmenlänge	238
Leistungsumsatz	220	Reaktionsweg	22
Lenkerbreite	250	Reibungswiderstand	65, 78
Lenkereinschlagwinkel	124	Reichweite	241
Lenkerhöhe	232, 249	Reifendruck	56
Lenkgeometrie	118	Resonanz	132
Lenkkopfwinkel	118, 121	Rollkurve	16
Lineare Stufung	173	Rollwiderstand	55, 64
Luftdichte	73, 81	Rollwinkel	104
Luftwiderstand	68	Rotation	14, 30
		Rückenwind	74
<b>M</b>		Rückstellmoment	119, 128
Massenträgheitsmoment	37	Ruhelänge	197
Meniskus	208	Runder Tritt	185

**S**

Sattelbreite	252
Sattelhöhe	232
Sattelleigung	244
Sattelstellung	232, 244
Scheibenbremse	152
Scheibenrad	113
Schlupf	12, 51, 142
Schräglagenwinkel	89
Schräglaufwinkel	126
Schubphase	189
Schwerpunktabenkung	124
Schwerpunktmethode	227, 246
Schwingungswiderstand	66
Schwungmoment	36
Seitenführungskraft	89, 144
Seitenkraft	119
Seitensteifigkeit	117
Seitenzugbremse	147
Sitzbreite	252
Sitzhöhe	212, 232
Sitzlänge	247
Sitzposition	216, 232
Sitzrohrlänge	236
Spannung (Muskel)	225
Speiche, Speichenrad	111
Spurpunkt	119
Spurversatz	126
stack to reach	240
Standsicherheit	145
Statische Arbeit	196
Staudruck	71
Steigungsleistung	46
Steigungswiderstand	40
Stufensprung	166
Sturz	120
Synergist	198
Systempedal	253

**T**

Tangentialbeschleunigung	24, 25
Tangentialkraft	
(Runder Tritt)	185
Tangentialspeichen	114
Teilung (Zahnrad)	160
Trägheitskraft	27
Translation	30
Tretkurbellänge	241
Trittfrequenz	224
Turbulente Strömung	77

**U**

Überhöhung (Lenker)	95, 217
Überschlagen	145
Überschneidung	168
Übersetzung (Bremse)	149
Übersetzung ins Langsame	161
Übersetzung ins Schnelle	161
Übersetzungsformel	
(Getriebe)	159, 161
Übersteuern	127
UCI	244
Umfangsgeschwindigkeit	12, 14
Ungefederte Masse	130
Ungleichförmige Bewegung	12
Untersteuern	127

**V**

V-Bremse	151
Verbrennungsmotor	156
Versatz	118, 120
Verzögerung	21
Vordehnung	201, 228
Vorspannung	111

**W**

Wadenmuskel	211
Walkwiderstand	55, 57
Weiche Gänge	183
Wiegetritt	228
Windschatten	68, 78
Winkelbeschleunigung	25
Winkelgeschwindigkeit	14
Wirkungsgrad (Getriebe)	169
Wirkungsgrad (Kette)	65
Wirkungsgrad (Muskel)	219

**Z**

Zähigkeitswiderstand	68
Zähnezahl	160
Zentrifugalkraft, Fliehkraft	85
Zentripetalkraft	24, 85
Zugphase	190
Zugspannung	112
Zugspeiche	115
Zykloide	16