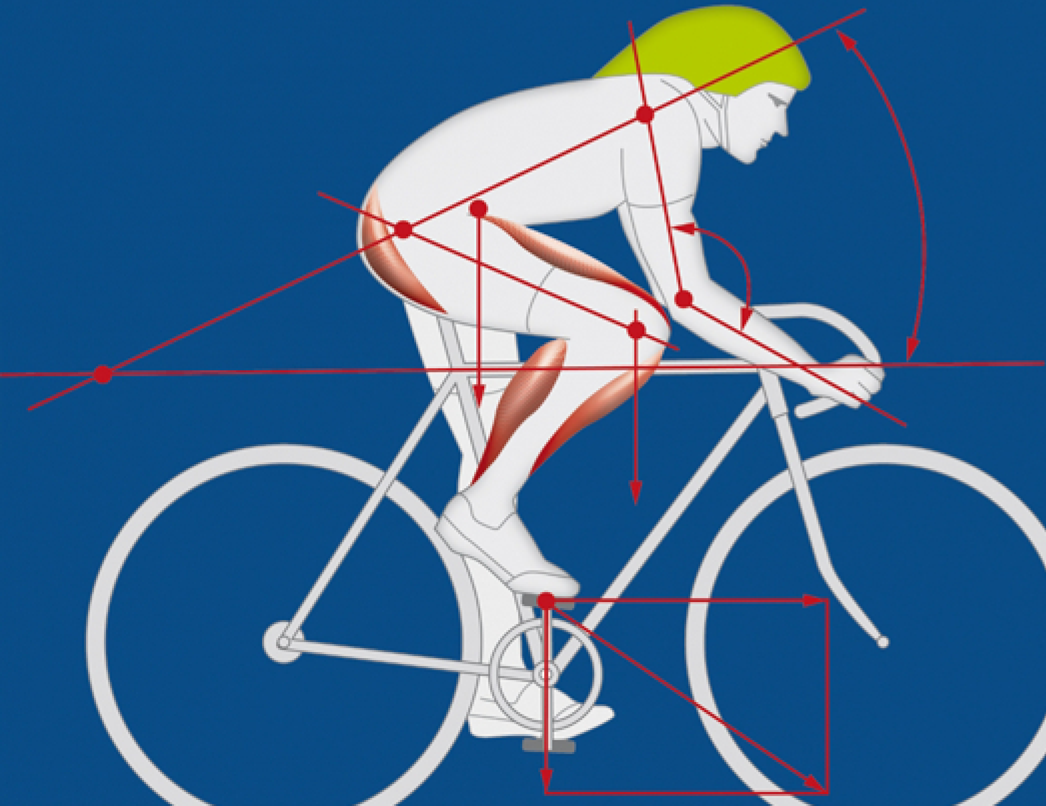
TOUR

MICHAEL GRESSMANN

FAHRRADPHYSIK UND BIOMECHANIK

TECHNIK | FORMELN | GESETZE



DELIUS KLASING

Inhalt

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

Arbeitserleichterung, 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.

$F_F \cdot v_F = F_R \cdot v_R$ ($_F$ für Fußgänger, $_R$ 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.

Bleiben 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) [1] durch die dafür benötigte Zeitspanne (z. B. t = 10 Sekunden) und zeigt das Ergebnis an:

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

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.

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

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

[1] 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:

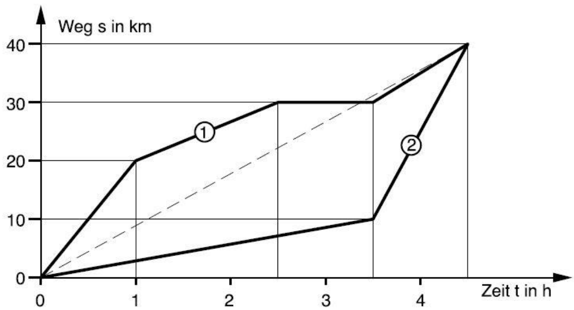
$$v_m = \frac{42\,km - 18\,km}{11.35\,h - 10.05\,h} = \frac{24\,km}{1{,}5\,h} = 16\ km/h$$

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 km/h, der Fahrer 2 fährt erst in der letzten Stunde mit *v* = 30 km/h. Die mittlere Geschwindigkeit beider Fahrer ist die gleiche:

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

Fahrer 2 kann diese Durchschnittsgeschwindigkeit direkt von seinem Computer ablesen, Fahrer 1 dagegen liest einen größeren Wert ab: $v_m = 40\ km : 3{,}5\ h = 11{,}4\ km/h$. 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 π 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:

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

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:

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

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

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

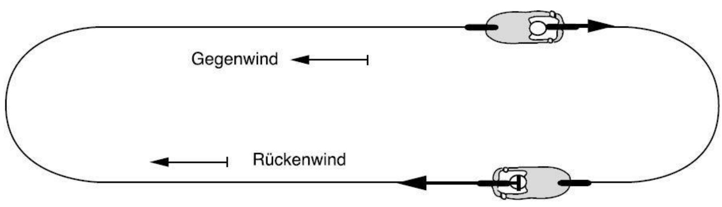
Geschwindigkeiten sind gewichtete Größen. Für Durchschnittsgeschwindigkeiten bestimmt man das harmonische Mittel – falls die zurückgelegten Wege gleich lang sind:

$v_m = \frac{2 \cdot v_1 \cdot v_2}{v_1 + v_2} = \frac{2 \cdot 30\,km/h \cdot 10\,km/h}{30\,km/h + 10\,km/h} = 15\,km/h$ 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).

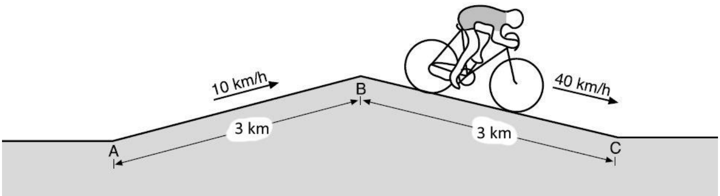
Bild 2

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: $t = \dfrac{6\ km}{30\ km/h} = 0{,}2\ h = 12\ min$

Zeitbedarf beim Bergauf/Bergabfahren:

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

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 cm ≙ 2 m/s. Dann weht der Wind mit $v = 2\ m/s \cdot 1{,}5 = 3\ m/s$.

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

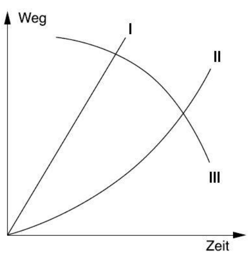


Bild 5 Isaak Newton

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

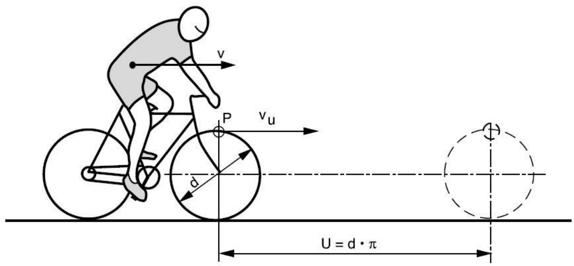
Dieses Zitat von Isaac Newton (Bild 5) zieht sich als roter Faden durch die Fahrradphysik.

Kreisbewegung, Drehbewegung [2]

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 km/h (10 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 [3], 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 m, dann dreht sich das Rad pro Sekunde

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

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

[2] 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).

[3] Tatsächlich ist immer ein kleiner Schlupf notwendig, damit Antriebskräfte wirken können.

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

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/min bzw. 1/min oder min^{-1}) oder in f = Umdrehungen pro Sekunde für die Frequenz (s^{-1}) herauskommt:

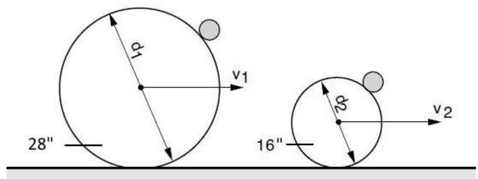
$$n = \frac{16{,}7 \cdot v}{d \cdot \pi} = \frac{16{,}7 \cdot 36}{0{,}7 \cdot 3{,}14} \approx 273\ 1/min = 273\ min^{-1} \quad \text{oder} \quad f \approx 4{,}6\ s^{-1}$$

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

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) [4] 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:

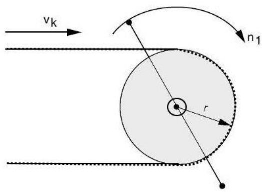
$$v_1 = v_2 \qquad d_1 \cdot \pi \cdot n_1 = d_2 \cdot \pi \cdot n_2 \qquad \rightarrow \ n_2 = \frac{d_1}{d_2} n_1$$

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 U/min (bzw. n_1 = 90 1/min) in die Pedale tritt. Der (Teilkreis)Radius des 52-Kettenblattes soll r = 105 mm betragen (Bild 8).

Bild 8

Geschwindigkeit der Fahrradkette (bezogen auf das Fahrrad als Bezugssystem)



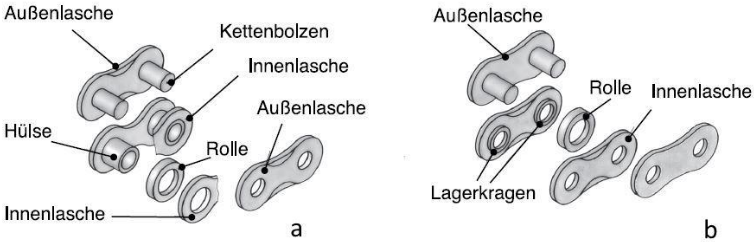
4 Anders stellt sich die Situation bei einem Nabendynamo dar, dessen Leistung von der Radgröße abhängt.

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.

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

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 Hülsen 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 ω. Warum? Bei einem gleichmäßig drehenden Rad haben die achsenfernen Punkte eine höhere Umfangsgeschwindigkeit als die achsennahen.

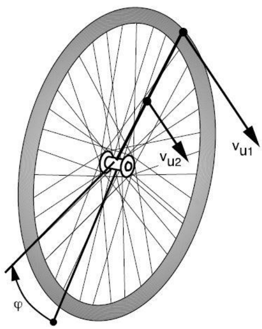
Die Formel $v_u = 2 \cdot r \cdot \pi$ sagt, dass mit größerem Radius auch die Geschwindigkeit steigt. Die einzelnen Speichennippel eines schnell drehenden Rades können wir kaum noch unterscheiden, während sich bei der gleichen Drehzahl die Speichenbögen im Nabenflansch vergleichsweise langsam bewegen.

Bild 10

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

$v_{u1} > v_{u2}$

Die Winkelgeschwindigkeit ω (für ω 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 φ. Die Formeln für die geradlinige und der kreisförmigen Bewegung sind einander ähnlich:

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

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

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

Zwischen der geradlinigen und der kreisförmigen Bewegung besteht der Zusammenhang:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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