

Das Fahrrad als alltägliches Verkehrsmittel Zweirädrige Energiesparbüchse

H. JOACHIM SCHLICHTING | WILFRIED SUHR

Im Stadtverkehr ist das Fahrrad ein geradezu genial energieparendes Transportmittel. Das zeigt der Vergleich mit den Beinen, also der alternativen Fortbewegungsart mit Körperfunktion. Besonders schlecht schneidet jedoch das Auto ab.

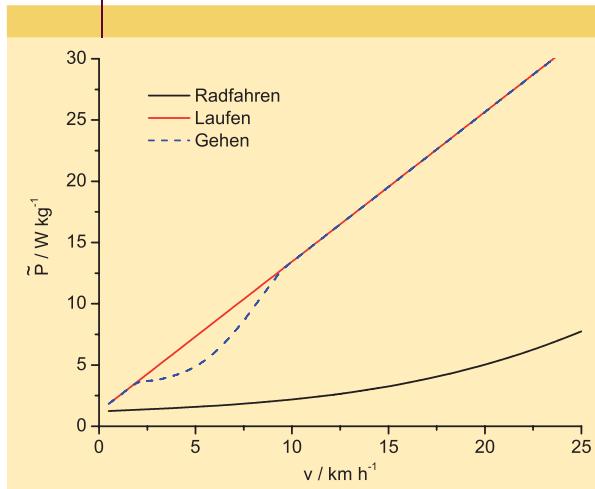
In diesem Beitrag wollen wir das Fahrrad als alltagstaugliches Fortbewegungs- und Transportmittel betrachten. Dazu vergleichen wir es mit dem Gehen zu Fuß auf der einen und dem motorisierten Transport auf der anderen Seite. Um subjektive Sichtweisen auszuschalten, beschränken wir uns auf die energetischen Transportkosten dieser unterschiedlichen Fortbewegungsarten. Energie kann ohnehin in vielen Fällen sehr gut als Äquivalent für Kosten angesehen werden.

Damit wir so verschiedene Transportsysteme wie Mensch, Fahrrad und Auto hinsichtlich ihres spezifischen Energieverbrauches vergleichen können, führen wir die Größe

$$\varepsilon = E_{\text{in}}/s = P_{\text{in}}/v \quad (1a)$$

ein, die wir Transportkosten nennen. Sie ist der Quotient aus Energieinput E_{in} und damit zurückgelegter Strecke s oder

ABB. 1 LEISTUNGSEINPUT ZU FUSS UND PER RAD



Spezifischer Leistungseinput eines 70 kg schweren Menschen beim Laufen, Gehen und Radfahren als Funktion der Geschwindigkeit.

aus Leistungseinput P_{in} und Transportgeschwindigkeit v [1]. Dabei nehmen wir im Folgenden ebene Strecken und Windstille an. Der Einfluss von Wind und Steigungen kann nach den in [2] angestellten Überlegungen in die Berechnungen einbezogen werden.

Für viele Probleme – etwa wenn sich die Massen der transportierten Personen oder Güter unterscheiden – ist es interessant, die Transportkosten auf die Einheitsmasse zu beziehen, also die spezifischen Transportkosten

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon/m_N \quad (1b)$$

zu betrachten. Dabei verstehen wir unter m_N die reine Nutzmasse, die hier derjenigen der transportierten Person entsprechen soll, und nicht die insgesamt transportierte Masse. Bei einem Auto, das statt einer Person zwei Personen transportiert, halbieren sich folglich die Transportkosten in etwa, während sie sich auf die Gesamtmasse bezogen kaum verändern würden. Bei einem schweren Auto, das eine Person transportiert und insgesamt mehr Energie verbraucht als ein leichtes, wären die spezifischen Transportkosten in jedem Fall höher. Dagegen könnten die auf seine Gesamtmasse bezogenen Transportkosten sogar geringer als beim leichten Auto sein.

Der Leistungseinput P_{in} ist die verkürzte Bezeichnung für die vom System Läufer, Radler oder Auto insgesamt aufgenommene Leistung in Form von Kraftstoff oder Nahrung. P_{in} hängt mit dem Leistungsoutput P_{out} , der zur Überwindung der diversen Widerstandskräfte abgegebenen mechanischen Leistung, folgendermaßen zusammen:

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}}/\eta + P_{\text{GU}}, \quad (2)$$

wobei η den Wirkungsgrad des Systems bezeichnet. Die Grundumsatzrate P_{GU} ist für die Aufrechterhaltung der Systemfunktionen unabhängig von der Fortbewegung aufzubringen: Beim Körper wäre es das Ruhen, beim Auto der Leerlauf.

Fünfmal effizienter als Gehen

Der Leistungsoutput $P_{\text{out},R}$ für das Fahrradfahren beträgt:

$$P_{\text{out},R} = \mu m g v + \varrho c_w A v^3/2 \quad (3)$$

[1]. Dabei ist $m = m_R + m_N$ die sich aus Fahrrad (m_R) und Nutzmasse (m_N , hier der Mensch) zusammensetzende Ge-



samtmasse, μ der Rollreibungskoeffizient, g die Erdbeschleunigung, c_w der Luftwiderstandsbeiwert, ϱ die Dichte der Luft und A die Stirnfläche.

Im Folgenden setzen wir nun für das Fahrrad die Werte aus Tabelle 1 ein und errechnen $P_{in,R}$ mit den Gleichungen (2) und (3). Dabei setzen wir den Muskelwirkungsgrad η näherungsweise konstant gleich 0,25 und die Grundumsatzrate P_{GU} gleich 85 W [1]. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis für das Fahrradfahren in der schwarzen Kurve, normiert auf den spezifischen Leistungsinput $\bar{P}_{in} = P_{in}/m_N$ (mit $m_N = 70 \text{ kg}$).

Für das Laufen ergibt sich aufgrund von biomechanischen Messungen [3] bei mittleren Geschwindigkeiten ein Leistungsinput

$$P_{in,L} = a m_N v + P_{GU} \quad (4)$$

mit $a = 4,4 \text{ kJ/(kg km)}$.

Abbildung 1 zeigt das Ergebnis, wieder normiert auf \bar{P}_{in} , für einen 70 kg schweren Menschen (rote Kurve). Übrigens wächst beim Laufen mit hohen Geschwindigkeiten jenseits etwa 25 km/h, also Sprinten, $P_{in,L}$ sogar stärker als linear mit v an. Bei kleinen Gehgeschwindigkeiten $v \leq 8 \text{ km/h}$ zeigt Abbildung 1, dass die Technik des Gehens der des Lauflens energetisch überlegen ist (blaue Kurve). Dabei spielt das Pendeln der Beine in der Nähe ihrer Eigenfrequenz eine wichtige Rolle [4]. Die energetisch optimale Geschwindigkeit liegt für einen Durchschnittserwachsenen bei etwa 5,5 km/h. Sie erfordert einen spezifischen Leistungsinput von 5,2 W/kg gegenüber 7,94 W/kg beim Laufen. Ein 70 kg schwerer Mensch müsste beim Gehen etwa 360 W aufbringen, was seinem Dauerleistungsvermögen entspricht. Beim Laufen mit derselben Geschwindigkeit hätte er hingegen etwa 560 W zu leisten, was oberhalb der durchschnittlichen Dauerleistung liegt.

Beim Betrachten von Abbildung 1 fällt sofort auf, wie viel günstiger das Radfahren gegenüber dem Laufen und Gehen ist. Das gilt besonders für höhere Geschwindigkeiten, obwohl der Radfahrer zusätzlich noch die Masse des Rads mittransportieren muss: Bei der optimalen Gehgeschwindigkeit, die natürlich nicht der optimalen Radfahrgeschwindigkeit entspricht, ist der Leistungsinput immer noch mehr als doppelt so groß wie beim Radfahren.

Die Überlegenheit des Radfahrens wird noch deutlicher, wenn man die Transportkosten beider Fortbewegungsarten miteinander vergleicht. Abbildung 2 zeigt die nach Gleichung (1) aus $P_{in,R}$ und $P_{in,L}$ berechneten spezifischen Transportkosten beim Laufen, Gehen und Radfahren als Funktion der Geschwindigkeit: Danach sind das Gehen bei einer Geschwindigkeit von 5,5 km/h und das Radfahren bei einer Geschwindigkeit von 12,5 km/h energetisch am günstigsten. Vergleicht man diese minimalen Transportkosten miteinander, die beim Gehen spezifisch etwa 3,4 kJ/(kg km) (für einen 70 kg schweren Menschen 240 kJ/km), beim Radfahren jedoch nur etwa 0,7 kJ/(kg km) (also 50 kJ/km) betragen, so ergibt sich: Das Radfahren ist energetisch etwa

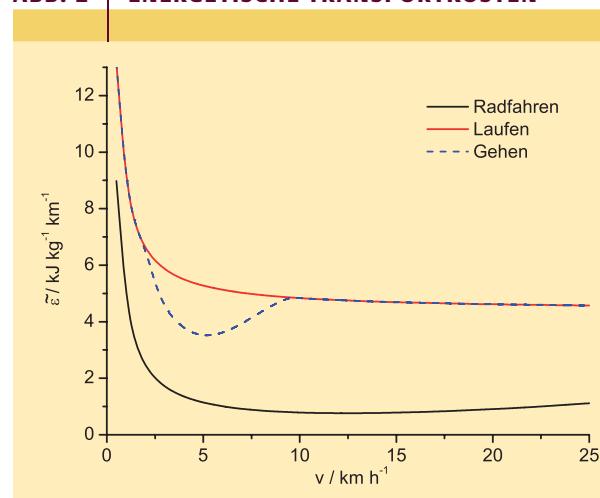


fünfmal so günstig wie das Gehen und erlaubt dabei eine doppelt so hohe Geschwindigkeit. Bei anderen Geschwindigkeiten und im Vergleich zum Laufen zeigt sich die Überlegenheit des Fahrrads noch eindrucksvoller. Warum ist das Radfahren so viel effektiver als das Laufen und Gehen?

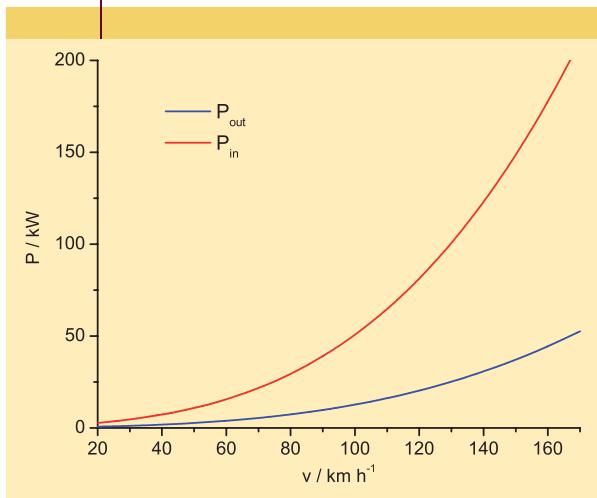
Der wesentliche Unterschied beruht auf der Art und Weise, wie wir jeweils unsere Muskeln einsetzen. Beim Laufen und Gehen müssen wir sehr viel isometrische Arbeit verrichten: Die Beinmuskeln müssen den gesamten Körper in einer aufrechten Position halten, seinen Schwerpunkt heben und senken sowie die Beine beschleunigen und verzögern. Dieser Energieaufwand ist für die Fortbewegung verloren. Als Radfahrer sparen wir einen Großteil dieser Energie ein, denn unser Körper nimmt eine sitzende Position ein. Nur die Knie und Schenkel bewegen sich auf und ab, die Füße kreisen mit konstantem Tempo. Aber selbst die mit diesen

Das Rad ist in vielen Ländern immer noch die erste Wahl, um schnell ans Ziel zu gelangen – auch mit viel Gepäck
(Foto: K.-U. Gerhardt/Pixolio.de).

ABB. 2 | ENERGETISCHE TRANSPORTKOSTEN



Spezifische energetische Transportkosten eines 70 kg schweren Menschen beim Laufen, Gehen und Radfahren als Funktion der Geschwindigkeit.

ABB. 3 | AUTOFAHREN

Leistungsinput und Leistungsoutput beim Auto, hier einem Kleinwagen (Tabelle 1), mit einer Person. Die dem biologischen Grundumsatz entsprechende Leerlaufleistung als zusätzlicher Energieverbraucher ist hier nicht berücksichtigt.

Bewegungen verbundenen Beschleunigungen und Verzögerungen werden sehr effektiv durchgeführt. Zum Beispiel drückt das gerade nach unten „kurbelnde“ Bein das anzuhebende Bein nach oben: Dieses Ausnutzen der Gravitation entlastet vom Energieaufwand des aktiven Beinanhebens, der beim Gehen und Laufen unvermeidbar ist.

Trotzdem ist das Fahrrad ein noch relativ junges Transportmittel. Es kann seine Überlegenheit gegenüber dem Gehen erst ausspielen, seitdem es moderne Straßen mit festen und ebenen Belägen gibt. Im unwegsamen Gelände bleiben die eigenen Beine das wesentlich effizientere Transportmittel.

24-mal effizienter als Autofahren

Das Autofahren unterscheidet sich vom Laufen und Radfahren vor allem, weil es eine externe Energiequelle braucht, die vom menschlichen Metabolismus unabhängig ist. Dennoch ist ein energetischer Vergleich aufschlussreich,

denn schließlich sitzt im Stadtverkehr meist nur eine Person im Auto, genau wie auf dem Fahrrad.

Beim Autofahren lässt sich der Leistungsoutput $P_{\text{out},A}$ wie beim Radfahren durch Gleichung (3) beschreiben. Die Daten für unsere Abschätzungen liefert wieder Tabelle 1. Der Leistungsinput $P_{\text{in},A}$ hängt ebenfalls gemäß Gleichung (2) mit $P_{\text{out},A}$ zusammen. Allerdings fällt hier die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Wirkungsgrades, der zwischen 25 % und 32 % liegt, beim Auto stärker ins Gewicht als beim Fahrrad (Abbildung 3). Ein detaillierter energetischer Vergleich scheint gleichwohl nicht sinnvoll zu sein, weil die mit beiden Fahrzeugen in der Stadt gefahrenen Geschwindigkeiten in einen Bereich fallen, der für die Geschwindigkeitsabhängigkeit von $P_{\text{in},A}$ untypisch ist. Wir können nur pauschal feststellen, dass die Transportkosten in diesem Bereich beim Autofahren mehr als zwanzigmal so hoch sind wie beim Fahrradfahren.

Unsere Betrachtung ist trotzdem sinnvoll, denn Studien zeigen, dass etwa die Hälfte der in der Stadt mit dem PKW zurückgelegten Wege kürzer als 5 km ist. Selbst Wege unter 3 km werden noch zu etwa 38 % mit dem Auto zurückgelegt [5]. Nach Schätzungen ließen sich in Ballungsgebieten bis zu 30 % der Pkw-Fahrten auf den Radverkehr verlagern, wenn das Radwegenetz so gut ausgebaut wird wie zum Beispiel in Münster, wo 32 % aller Wege erradelt werden [5].

Für das von uns herangezogene, recht sparsame Vergleichsauto (Tabelle 1) dagegen ergeben sich für Stadtfahrten Transportkosten von 2,4 MJ/km. Der im Vergleich zu Überlandfahrten hohe Wert ist vor allem durch häufiges Beschleunigen, Bremsen und viele Haltezeiten mit laufendem Motor bedingt. Um mit einem Fahrrad in der Stadt Durchschnittsgeschwindigkeiten von 15 km/h zu erreichen, muss der Radler allerdings höhere Spitzengeschwindigkeiten fahren. Durch diese Dauerleistung wird sein Energieinput nicht auf den Grundumsatz zurückgehen, sobald er an einer Ampel steht. Also nehmen wir der Einfachheit halber an, dass der Radler sich durchgehend mit einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit fortbewegt. Diesen Wert können wir nach zahlreichen Testfahrten zu $v = 25$ km/h abschätzen.

TAB. 1 | VERGLEICHSZAHLEN

	Fahrrad	Kleinwagen
Leergewicht	15 kg	850 kg
Gewicht des Fahrers	70 kg	70 kg
Frontfläche	0,5 m ²	2,35 m ²
c _w -Wert	0,85	0,32
Rollwiderstands-koeffizient	0,005	0,012
max. Leistungsoutput	Je nach Fahrtzeit zwischen 75 W (dauernd) und 200 W (1 Stunde) variierend	40 kW
Kraftstoffverbrauch auf 10 km	bei 20 km/h ≈ 28 g Schokolade (660 kJ) bei 30 km/h ≈ 44 g Schokolade (1040 kJ) Ø Stadt ≈ 42 g Schokolade (1000 kJ)	bei 90 km/h 0,49 l (16 MJ) bei 120 km/h 0,68 l (23 MJ) Ø Stadt 0,79 l (26 MJ)



zen. Damit ergeben sich Transportkosten von 100 kJ/km: Die Transportkosten des Autos liegen also um den Faktor 24 höher als diejenigen des Fahrrads. Auch die massenspezifischen Transportkosten unterscheiden sich um diesen Faktor, denn die Nutzmasse ist in beiden Fällen dieselbe.

Der Vergleich fällt noch sehr viel ungünstiger für die Nutzung des Autos als Personentransportmittel in der Stadt aus, wenn wir nicht nur die Energie des verbrauchten Kraftstoffs zugrunde legen. Eigentlich müssten wir auch noch die Energieäquivalente für Öl, Wartung, Reparaturen und vor allem für die Herstellung berücksichtigen und auf die gefahrenen Kilometer umrechnen. Natürlich müssten wir das entsprechend für das Fahrrad tun, doch bei ihm wären diese Kosten sehr viel geringer.

Unser Vergleich zeigt, dass dem Auto im Stadtverkehr eine ungerechtfertigte Rolle zukommt: Seine energetischen Kosten für den Transport von einer oder sehr wenigen Personen sind viel zu hoch. Selbst die durchschnittliche Fortbewegungsgeschwindigkeit des Fahrrads im durchschnittlichen Stadtverkehr wird vom Auto nicht erreicht, wie Untersuchungen zeigen [5]. Das Fahrrad glänzt sogar durch geringere energetische Transportkosten als die natürlichen Fortbewegungsarten des Gehens und Laufens. Es ist die günstigste Transportart überhaupt.

Zusammenfassung

Vergleicht man die energetischen Transportkosten von Laufen, Fahrrad- und Autofahren im Stadtverkehr, dann schneidet das Rad am besten ab. Im Vergleich zum Gehen ist Radfahren energetisch etwa fünfmal günstiger. Dabei erlaubt es eine mehr als doppelt so hohe Geschwindigkeit. Das Autofahren ist in der Stadt sogar rund 24-mal ungünstiger als Radeln, falls es sich um eine Person in einem Kleinwagen handelt.

Stichworte

Gehen, Laufen, Radfahren, Autofahren, Stadtverkehr, energetische Transportkosten.

Literatur

- [1] H. J. Schlichting, W. Suhr, Physik in unserer Zeit **2007**, *38* (4), 188.
- [2] W. Suhr, H. J. Schlichting, Physik in unserer Zeit **2007**, *38* (6), 294.
- [3] R. Margaria et al., J. Appl. Physiology **1963**, *18*, 367.
- [4] B. Rodewald, H. J. Schlichting, Praxis der Naturwissenschaften – Physik **1988**, *37* (5), 12.
- [5] www.umweltbundesamt.de/verkehr/verkehrstraeg/fussfahrad/texte/foerdnmiv.htm

Die Autoren



Hans-Joachim Schlichting ist Inhaber des Lehrstuhls für Didaktik der Physik an der Universität Münster und Mitbegründer der Rubrik „Spielwiese“.



Wilfried Suhr studierte Physik an der Universität Oldenburg, wo er 1992 über ein Thema der Wissenschaftsforschung promovierte. Gegenwärtig ist er als Mitarbeiter am Institut für Didaktik der Physik der Universität Münster in der Lehrerbildung tätig.

Anschrift

Prof. Dr. H. Joachim Schlichting, Dr. Wilfried Suhr, Institut für Didaktik der Physik, Universität Münster, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149 Münster.
schlichting@uni-muenster.de