

# Fahrradfahren, Laufen, Autofahren

## Ein interessanter Vergleich im Unterricht

Hans Joachim Schlichting\*

*Man verliert die meiste Zeit damit,  
daß man Zeit gewinnen will*

John Steinbeck

### 1. Einleitung

In zwei vorangegangenen Aufsätzen in dieser Zeitschrift /6 und 7/ wurde die Energetik des Fahrradfahrens für typische Situationen erarbeitet. Im folgenden sollen einige der dort gewonnenen Ergebnisse in einen größeren Zusammenhang gestellt werden: Es wird untersucht, welcher Stellenwert dem Fahrradfahren zukommt, wenn man es hinsichtlich der (energetischen) Transportkosten mit anderen Fortbewegungsarten für repräsentative Situationen vergleicht.

Da ein solcher Vergleich global nur sehr undifferenziert erfolgen kann, werden detaillierte Aussagen nur für

- das Laufen bzw. Gehen als Vertreter der natürlichen Fortbewegungsarten ohne technische Hilfsmittel und
- das Autofahren als Vertreter der motorisierten Fortbewegung

gemacht. Die Ergebnisse lassen sich in der Regel aber sehr einfach auf andere Fortbewegungsarten übertragen. Die Beschränkung auf die (energetischen) Transportkosten vernachlässigt zwar andere Vergleichsaspekte. Sie ist jedoch weniger einschneidend als es zunächst den Anschein hat, weil Energie in vielen Fällen als Äquivalent für Kosten schlechthin angesehen werden kann.

Eine weitere Beschränkung besteht darin, daß ein Vergleich der Transportkosten je zweier Fortbewegungsarten nur innerhalb des begrenzten Geschwindigkeitsbereiches erfolgen kann, der von beiden geteilt wird. Schließlich werden die Vergleiche der Einfachheit halber auf die Standardsituation der Windstille bezogen. Der Einfluß von Wind läßt sich jedoch im Sinne von /7/ berücksichtigen.

### 2. Transportkosten

Damit man so verschiedene Transportsysteme wie Mensch ' Fahrrad und Auto hinsichtlich ihres spezifischen Energieverbrauches vergleichen kann, füh-

ren wir die im folgenden mit Transportkosten bezeichnete Größe

$$\epsilon = E_{in} / s = P_{in} / V \quad (1a)$$

ein, welche den Quotienten aus Energieinput  $E_{in}$  und zurückgelegter Strecke  $s$  bzw. den aus Leistungsinput  $P_{in}$  und eingenommener Geschwindigkeit  $v$  darstellt. Für viele Probleme - z. B. wenn sich die Massen  $m$  der transportierten Güter unterscheiden - ist es interessant, die Transportkosten auf die Einheitsmasse zu beziehen, d. h. die spezifischen Transportkosten

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon / m \quad (1b)$$

zu betrachten. In der Literatur /z. B. 4/ ist es vielfach üblich, für  $m$  die Gesamtmasse aus Transportsystem und transportierten Gütern einzusetzen. Wir halten es für angemessen, unter  $m$  die reine Nutzmasse zu verstehen. In diesem Fall würden sich - wie es sinnvoll ist - die Transportkosten eines Autos, das statt einer Person zwei Personen transportiert in etwa halbieren, während sie sich bei Bezug auf die Gesamtmasse kaum verändern würden. Ein schweres Auto, das eine Person transportiert und insgesamt mehr Energie verbraucht als ein leichtes, hätte auf jeden Fall höhere spezifische Transportkosten während sich bei  $m$  als Gesamtmasse eventuell sogar geringere Transportkosten ergäben.

Leistungsinput  $P_{in}$  (Energieinput  $E_{in}$  ist die verkürzte Bezeichnung für die eingangsseitige Leistung (Energieaufnahme z. B. in Form von Kraftstoff oder Nahrung) des betrachteten Systems (Läufer, Radler, Auto).  $P_{in}$  hängt mit dem Leistungsausput  $P_{out}$ , der entsprechenden ausgangsseitigen Größe, folgendermaßen zusammen:

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

wobei  $\eta$  den Wirkungsgrad des Systems und  $P_{GU}$  die Grundumsatzrate bezeichnet, die für die Aufrechterhaltung der Systemfunktionen unabhängig von der Fortbewegung (also auch in Ruhe oder beim Auto im Leerlauf) aufzubringen ist. (Entsprechendes gilt für  $E_{in}$ , und  $E_{out}$ ).

### 2.1. Laufen und Radfahren

Der Leistungsoutput  $P_{out}(R)$  für das Fahrradfahren wurde in einer früheren Arbeit /6/ berechnet:

$$P_{out}(R) = mf\upsilon + \frac{1}{2} \cdot \rho c_w A \upsilon^3. \quad (3)$$

Dabei ist  $m = m_R + m_M$  die sich aus Fahrrad ( $m_R$ ) und Fahrer ( $m_M$ ) zusammensetzende Gesamtmasse,  $f$  der Rollreibungskoeffizient,  $c_w$  der Widerstandsbeiwert,  $\rho$  die Dichte der Luft und  $A$  die Frontfläche (die benutzten Werte sind in **Tabelle 1** zusammengestellt).

Aus (3) läßt sich gemäß Glg. (2)  $P_{in}(R)$  berechnen. Dabei haben wir den Muskelwirkungsgrad  $\eta$  näherungsweise konstant gleich 0,25, die Grundumsatzrate  $P_{GU}$  gleich 85 W gesetzt (vgl. **Bild 1**).

Aufgrund von biomechanischen Messungen /3/ ergibt sich für das Laufen bei mittleren Geschwindigkeiten ein Leistungsinput

$$P_{in}(L) = \alpha m \upsilon + P_{GU}, \quad (4)$$

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

Bei hohen Geschwindigkeiten (Sprint), die aller-

spezifischen Leistungsinput  $\tilde{P}_{in} = P_{in} / m$  von 5,2 W/kg gegenüber 7,6 W/kg beim Laufen. Ein 70 kg schwerer Mensch müßte beim Gehen knapp 400 W aufbringen, was in etwa seinem Dauerleistungsvermögen entspricht, während er beim Laufen knapp 550 W zu leisten hätte, was er nur schwerlich dauernd vermag. In Bild 1 wurde der Leistungsinput  $P_{in}$  eines 70 kg schweren Menschen beim Laufen, Gehen und Radfahren (skaliert auf der rechten Seite der Ordinate) und der spezifische Leistungsinput  $\tilde{P}_{in} = P_{in} / m$  (skaliert auf der linken Seite der Ordinate) als Funktion der Geschwindigkeit  $\upsilon$  aufgetragen ( $m$  = Masse des zu transportierenden Guts, also in diesem Fall des Menschen). Es fällt sofort auf, wieviel günstiger das Radfahren gegenüber Laufen und Gehen ist, besonders bei höheren Geschwindigkeiten, obwohl im Falle des Radfahrens neben der eigenen Masse noch die Masse des Rads mittransportiert werden muß: Bei der optimalen Gehgeschwindigkeit, die natürlich von der optimalen Radfahrgeschwindigkeit abweicht, ist der Leistungsinput beim Radfahren noch wesentlich kleiner als die Hälfte der beim Laufen bzw. Gehen aufzubringenden Leistung.

Die Überlegenheit des Radfahrens wird noch deutlicher, wenn man die Transportkosten beider Fort-

Benutzte Zahlenwerte	Fahrrad	Auto
Leergewicht	15 kg	750 kg
Gesamtgewicht (m)	85 kg	820 kg
Frontfläche (A)	0,5 m <sup>2</sup>	1,8 m <sup>2</sup>
C <sub>w</sub> -Wert	0,85	0,42
Rollwiderstandskoeffizient (f)	0,05 N/kg	0,33 N/kg
Dichte der Luft ( $\rho$ )	1,29 kg/m <sup>3</sup>	
max. Leistungsoutput	je nach Fahrdauer zwischen 75 W (dauernd) und 200 W (1 Stunde) variierend	51 kW
Kraftstoffverbrauch (Leistungsinput) auf 10 km	bei { 20 km/h 28g Schokolade (660 kJ) 30 km/h 44g " (1040 kJ) Stadtverkehr 42 g " (1000 kJ)	bei { 90 km/h 0,63 l (20790kJ) 120 km/h 0,9 l Benzin(29700kJ) Stadtverkehr 1,1 l (36300kJ)

Tabelle 1: Zusammenstellung der im Text benutzten Zahlenwerte.

dings für die Fortbewegung uninteressant sind, da sie nur kurzzeitig aufrechtzuerhalten sind, wächst  $P_{in}(R)$  stärker als linear mit  $\upsilon$ . Bei kleinen Geschwindigkeiten ( $\upsilon \leq 8 \text{ km/h}$ ) ist die Technik des Gehens derjenigen des Laufens energetisch überlegen. Dabei spielt das Pendeln der Beine in der Nähe der Eigenfrequenz der Beine eine wichtige Rolle. Die energetisch optimale Geschwindigkeit liegt bei etwa 5,5 km/h (vgl. Bild 1). Sie erfordert einen

bewegungsarten miteinander vergleicht. In Bild 2 wurden daher gemäß Glg. (1) aus  $P_{in}(R)$  und  $P_{in}(L)$  die Transportkosten beim Laufen, Gehen und Radfahren als Funktion der Geschwindigkeit aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist, daß das Gehen bei einer Geschwindigkeit von 5,5 km/h, das Radfahren bei einer Geschwindigkeit von 12,5 km/h energetisch am günstigsten ist. Vergleicht man diese minimalen Transportkosten miteinander, die beim Gehen etwa  $3,5 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{km})$  (bzw. für einen 70 kg

schweren Menschen 240 kJ/km), beim Radfahren jedoch nur etwa  $0,7kJ/(kg \cdot km)$  (bzw. für einen 70 kg schweren Radfahrer 50 kJ/km) betragen, so ergibt sich:

Das Radfahren ist energetisch etwa fünfmal so günstig wie das Gehen und erlaubt dabei eine doppelt so große Geschwindigkeit.

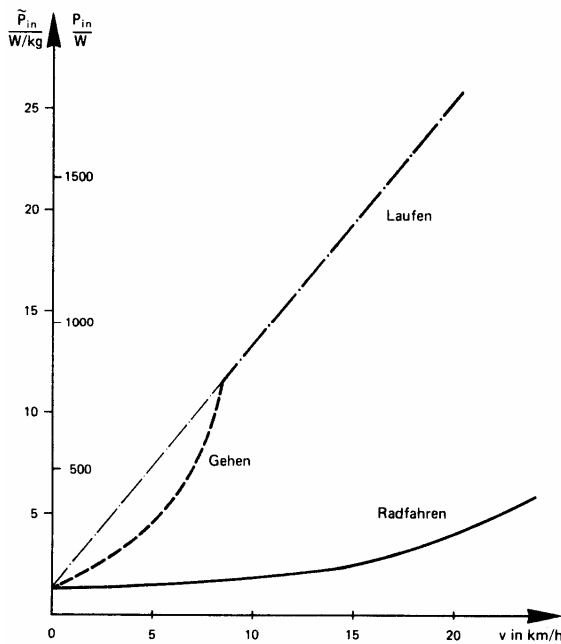


Bild 1: Leistungsinput eine 70 kg schweren Menschen beim Laufen, Gehen und radfahren (skaliert auf der rechten Seite der Ordinate) sowie spezifischer Leistungsinput (skaliert auf der linken Seite der Ordinate) als Funktion der Geschwindigkeit

Bei anderen Geschwindigkeiten und im Vergleich zum Laufen ist 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 jeweils die Muskeln eingesetzt werden. Beim Laufen und Gehen wird sehr viel isometrische Arbeit verrichtet; d.h. es wird Energie aufgewandt, die sich in keiner äußeren Wirkung zeigt und damit für die Fortbewegung verloren ist: Die Beinmuskeln müssen den gesamten Körper in einer aufrechten Position halten, den Körper heben und senken sowie die Schenkel beschleunigen und verzögern. Demgegenüber spart der Radfahrer diese Energie weitgehend ein: Der Körper nimmt eine sitzende Position ein. Nur die Knie und Schenkel bewegen sich hin und her, die Füße kreisen mit konstantem Tempo. Aber selbst die mit diesen Bewegungen verbundenen Beschleunigungen und Verzögerungen werden sehr effektiv durchgeführt. So braucht etwa das jeweils sich hochbewegende Bein nicht gehoben zu wer-

den, sondern es wird durch das sich herunterbewegende Bein hochgedrückt (vgl. /10/).

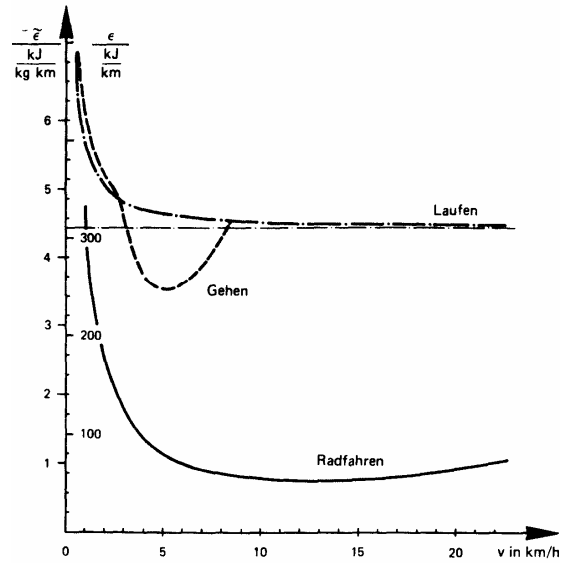


Bild 2: Transportkosten eines 70 kg schweren Menschen beim Laufen, Gehen und Radfahren (skaliert auf der rechten Seite der Ordinate) sowie spezifische Transportkosten (skaliert auf der linken Seite der Ordinate) als Funktion der Geschwindigkeit

Dieser rein energetisch begründete Vergleich vernachlässigt gegebenenfalls jedoch wesentliche Aspekte: So ist der Radfahrer beispielsweise auf relativ ebene Fahrbahnen angewiesen und in seinen Bewegungsmöglichkeiten auf diese beschränkt. Dies sind künstliche Bedingungen, die erst mit der Technisierung der Welt geschaffen werden konnten. Unter natürlichen Verhältnissen, also z.B. in sehr unebenem oder bergigem Gelände, bei weichem Untergrund, ist das Laufen bzw. Gehen vorteilhafter.

## 2.2. Radfahren und Autofahren

Im Unterschied zur Fortbewegungsart des Laufens und Radfahrens ist für das Autofahren eine externe, vom menschlichen Metabolismus unabhängige Energiequelle erforderlich. Ein energetischer Vergleich kann dennoch sinnvoll und aufschlußreich sein, wenn man bedenkt, daß das Auto in den meisten Fällen zur Beförderung **einer** Person benutzt wird, also zu einem Zweck, der sehr häufig (siehe unten) auch mit dem Fahrrad erfüllt werden könnte.

Der Leistungsoutput  $P_{out}$  (A) beim Autofahren läßt sich wie beim Radfahren durch die Formel (3) beschreiben (entsprechende Daten siehe Tabelle 1). Der Leistungsinput  $P_{in}$  (A) hängt mit  $P_{out}$  (A) ebenfalls gemäß Formel (2) zusammen, wenn auch die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Wirkungs-

grades (der zwischen 15 und 25 % liegt) hier stärker ins Gewicht fällt als beim Fahrrad /vgl.8, S. 142ff./ (siehe Bild 3). Ein detaillierter energetischer Vergleich scheint gleichwohl nicht sinnvoll zu sein, da die mit beiden Fahrzeugen erreichbaren Geschwindigkeiten ( $v < 40$  km/h) in einen für die Geschwindigkeitsabhängigkeit von  $P_{in}$  (A) untypischen Bereich fällt. Es ließe sich hier allenfalls die pauschale Feststellung treffen, daß die Transportkosten in diesem Bereich beim Autofahren etwa 20 mal so hoch sind wie beim Fahrradfahren.

Man wird angesichts dieser Aussage dem Einwand begegnen müssen, daß ein solcher Vergleich unzulässig sei, weil das Auto für Geschwindigkeiten gemacht ist, die mit dem Fahrrad grundsätzlich nicht zu erreichen sind.

Dieser Einwand trifft für Überlandfahrten, etwa wenn man von Köln nach München fährt, tatsächlich zu. (Hier wäre allenfalls eine Diskussion von Auto versus Bahn sinnvoll.) Solche Überlandfahrten sind aber gemessen an allen mit dem Auto unternommenen Fahrten in der Minderzahl. Selbst Wege, die kürzer als 3 km sind, werden noch zu etwa 39 % mit dem Auto zurückgelegt /11, S. 15/. Betrachtet man die Tür-zu-Tür-Reisezeiten im

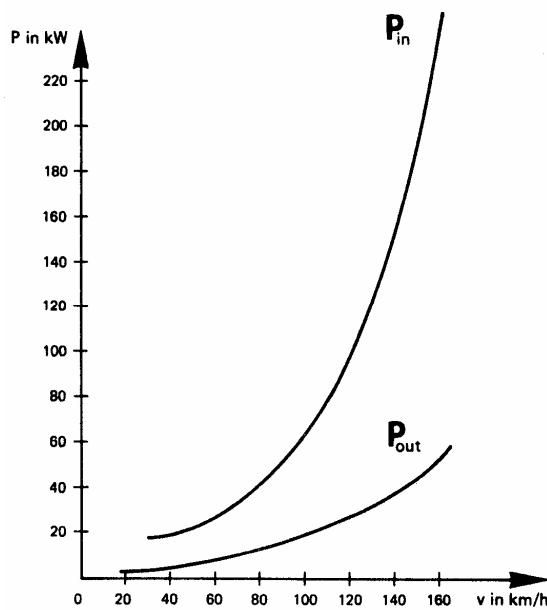


Bild 3: Leistungsinput und Leistungsoutput beim Auto (gemäß Tabelle 1)

Stadtverkehr (Bild 4), so fallen die Durchschnittsgeschwindigkeiten von Fahrten mit dem Auto und dem Fahrrad noch bis zu Entfernungen von 9 km in einen vergleichbaren Bereich, so daß ein energetischer Vergleich zwischen beiden Fahrzeugen für den Stadtverkehr sinnvoll erscheint. Die niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten  $\bar{v}_D$  von etwa 17

km/h kommen vor allem durch Wartezeiten an Kreuzungen und Ampeln, Staus u.ä. zustande. Wegen der dadurch bedingten Häufigkeit von Beschleunigungs-Bremsvorgängen und Haltezeiten mit laufendem Motor ist der Energieverbrauch im Stadtverkehr wesentlich höher als bei einer ungehinderten Fahrt. Für das von uns herangezogene Vergleichsauto (siehe Tabelle 1) ergibt sich ein Benzinverbrauch von 111 auf 100 km. Daraus errechnen sich /z. B. 8, Tab. 7/ Transportkosten von  $\epsilon_A = 3630$  kJ/km. Für das Fahrradfahren erhält man demgegenüber Transportkosten von

$$\epsilon_F = \frac{1}{\mu} \frac{P_{out}(F) + P_{GU}}{\bar{v}_D} \approx 100 \frac{kJ}{km} \quad 5)$$

(Bei der Berechnung von  $P_{out}(F)$  wurde eine Geschwindigkeit von  $v \geq \bar{v}_D$  eingesetzt, um das Zustandekommen von  $\bar{v}_D$  trotz Bremsen etc. zu rechtfertigen. Es wurde der geschätzte Wert  $v = 25$  km/h eingesetzt).

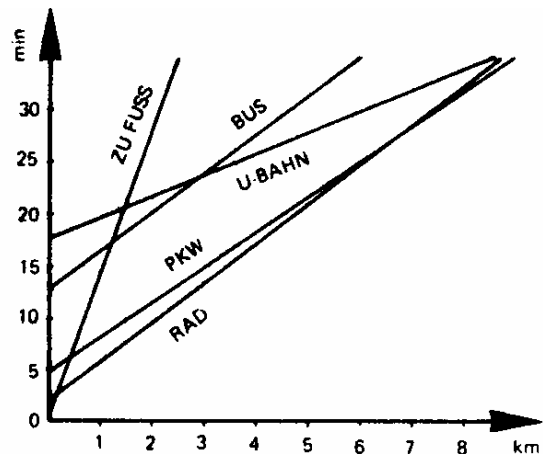


Bild 4: Tür-zu-Tür-Reisezeit im Stadtverkehr /1/

Damit liegen die Transportkosten des Autos um den Faktor 36 höher als diejenigen des Fahrrads.

Auch die massenspezifischen Transportkosten unterscheiden sich um diesen Faktor, denn die Nutzmasse ist in beiden Fällen dieselbe. Mit anderen Worten:

Bei der Fortbewegung mit dem Auto wird der größte Anteil der Energie für den an sich nutzlosen Transport des Transportmittels benötigt.

Der Vergleich fällt noch sehr viel ungünstiger für die Benutzung des Autos als Personenbeförderungsmittel in der Stadt aus, wenn man nicht nur die Energie des verbrauchten Kraftstoffs zugrundelegt, sondern auch noch die Energieäquivalente für

Öl, Wartung, Reparaturen und vor allem für die Herstellung berücksichtigt. Allein für die Herstellung des Autos kommen durchschnittlich noch etwa 146 Mio kJ an Energie hinzu /5/, die auf die mit dem Auto gefahrenen Kilometer umzulegen sind; entsprechende Überlegungen gelten natürlich auch für das Fahrrad, allerdings nehmen sich entsprechende Kosten sehr viel kleiner aus.

Schließlich sei auch noch erwähnt, daß das Auto die Umwelt durch Lärm, Landschaftsverbrauch, Abgase u.ä. belastet, wofür es beim Fahrrad keine Entsprechung gibt.

### 3. Konsequenzen

Der Vergleich zwischen den drei exemplarisch ausgewählten Transportarten dürfte deutlich gemacht haben, daß dem Auto im Stadtverkehr eine Rolle zu kommt, die von den Transportkosten und damit zusammenhängender Größen her gesehen für den Transport von einer oder sehr weniger Personen nicht gerechtfertigt erscheint. Der häufig genannte Vorteil einer größeren durchschnittlichen Fortbewegungsgeschwindigkeit ist zumindest für den durchschnittlichen Stadtverkehr nicht gegeben. Neben den bereits genannten Gründen seien aus der Fülle weiterer Argumente /vgl. z.B. 5 und 9/ noch die beiden folgenden genannt:

- Die ohnehin schon sehr niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit (siehe oben) verringert sich weiter erheblich, wenn man außerdem die Zeiten in Rechnung stellt, die der durchschnittliche Autofahrer für Anschaffung, Unterhalt des Autos usw. entweder direkt oder durch Arbeit für das dazu nötige Geld aufwenden muß.
- Durch Bau von Schnellstraßen, Umgehungsstraßen u.ä. läßt sich der Verkehr zwar auf bestimmten Strecken und zu bestimmten Zeiten beschleunigen, die durchschnittliche tägliche Fahrzeit wird dadurch aber in der Regel sogar noch erhöht /5, S. 60/. Einer der Gründe dafür dürfte durch den Teufelskreis bedingt sein (siehe Bild 5), in den man durch eine die Mobilität scheinbar verbessernde Erhöhung des Fahrzeugverkehrs gerät /9, S. 44/.

Insgesamt ergibt sich dadurch ein Zeitraub durch den Verkehr, den Ivan Illich einmal folgendermaßen beschrieben hat:

"Der typische amerikanische arbeitende Mann wendet 1600 Stunden auf, um sich 7500 Meilen fortzubewegen: das sind weniger als fünf Meilen pro Stunde. In Ländern, in denen eine Transportindustrie fehlt, schaffen die Menschen dieselbe Geschwindigkeit und bewegen sich dabei, wohin sie wollen - und sie wenden für den Verkehr nicht 28

%, sondern nur 3 % bis 8 % ihres gesellschaftlichen Zeitbudgets auf. Der Verkehr in den reichen Ländern unterscheidet sich vom Verkehr in den armen Ländern nicht dadurch, daß für die Mehrheit mehr Kilometer auf die Stunde der einzelnen Lebenszeit entfallen, sondern dadurch, daß mehr Stunden mit dem Zwangskonsum der großen Energiemengen verbracht werden, welche die Transportindustrie "abpackt" und ungleich verteilt" /2, S. 27/.

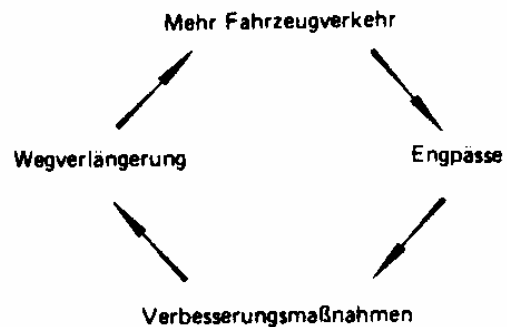


Bild 5: Positiv rückgekoppelter, sich aufschaukelnder Regelkreis (Teufelskreis /9/), der sich durch die Mobilität scheinbar steigernde Maßnahmen ergibt. Die absoluten Fahrzeiten werden in der Regel nicht herabgesetzt, sondern erhöht

Bei dieser Einschätzung sind die Lärm- und Abgasbelastungen, der Landschaftsverbrauch durch Parkplätze und Straßen u.ä. noch nicht einmal berücksichtigt. Die Chancen für einen größeren Fußgänger- und vor allem Radfahreranteil am Nahverkehr stünden insofern nicht schlecht, als über 70 % aller Wege unter 6 km liegen und noch über 55 % aller Wege unter 3 km Länge liegen /11/, Entfernungen, die für einen gesunden Menschen problemlos mit dem Rad zu bewältigen wären.

Einer der Gründe dafür, daß viele Menschen das Fahrrad trotz dessen Vorzüge im Keller lassen, dürfte in den Gefahren zu sehen sein, denen sich Radfahrer im Straßenverkehr aussetzen: Die vor Unfällen und - wie viele glauben - vor Abgasen wenigstens teilweise schützende Blechhülle ist ihnen mehr wert. Andererseits würde eine Zunahme des Fahrradverkehrs zu einem Abbau eben dieser Gefahren führen.

Zum Schluß wird anhand von **Bild 6** ein Transportkostenvergleich mit Tieren und technischen Systemen gegeben. Neben der Fortbewegung auf dem Lande werden dort auch Fliegen und Schwimmen als Fortbewegungsarten berücksichtigt. Auch hier zeigt sich die eindeutige Überlegenheit des Fahrrads, wenn man einmal von modernen Massentransportmitteln wie Eisenbahnzügen und ähnlichem absieht.

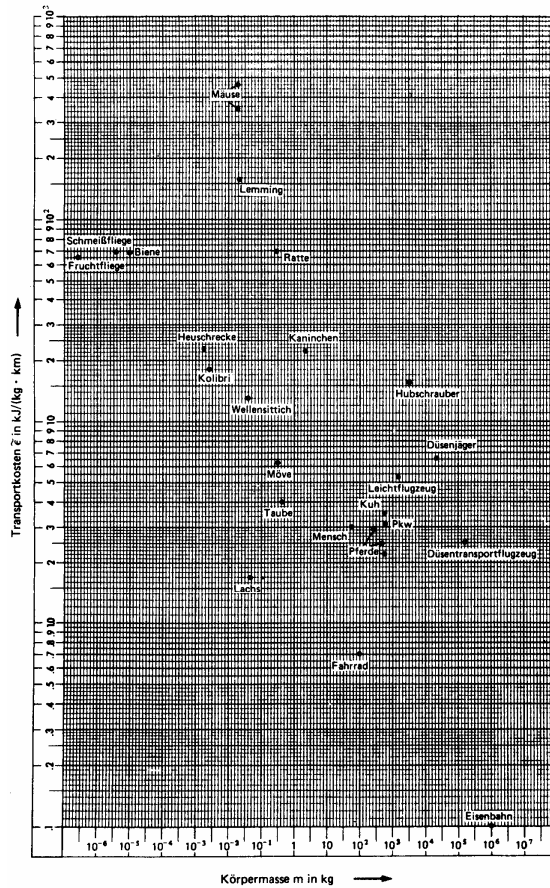


Bild 6: Massenspezifische Transportkosten für verschiedene Bewegungen und verschiedene Objekte. Im Unterschied zum Vorschlag im Text wurde hier auf die Gesamtmasse und nicht auf die transportierte Nutzmasse bezogen, die im Falle transportierter Menschen nur die Masse der Menschen umfaßte.  
/4/

### Literatur:

- /1/ Fikke, M.; Monheim, H.; Otto, K.: Das Fahrrad in der Stadt. Berlin: Umweltamt 1980.
- /2/ Illich, I.: Die sogenannte Energiekrise oder Die Lähmung der Gesellschaft. Reinbek: Rowohlt 1977.
- /3/ Margaria, R.; Cerretelli, P.; Aghemo, P.; Sassi, G.: Energy costi of running. Journal of Applied Physiology 18 (1963), S.367.
- /4/ Nachtigall, W.: Flugmaschine Fliege. In: Dittfurth, H. (Hrsg.): mannheimer forum. Mannheim: Boehringer 1981/82.
- /5/ Robert, J.: Mythen der Geschwindigkeitsindustrie. in: Duve, F. (Hrsg.): Technologie und Politik 14. Reinbek: Rowohlt 1979.

/6/ Schlichting, H.J.; Backhaus, U.: Physik des Alltags am Beispiel der Energetik des Fahrrads. technic-didact 8 (1983) Nr. 1, S. 27

/7/ Schlichting, H.J.; Nobbe, R.: Untersuchungen zur Energetik des Fahrrads. technic-didact 8 (1983) Nr. 4, S. 225.

/8/ Schlichting, H.J.: Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt. Heidelberg: Quelle & Meyer 1983

/9/ Tebbe, J.: Was Ist Verkehr. In: Duve, R. (Hrsg.): a.a.O./10/ Wilson, SS.: Bicycles Technology. Scientific American 228 (1973) Nr. 3, S.81.

/11/ Zu Fuß In die Zukunft. Wirtschaftswoche 33 (1979) Nr. 24, S. 46.