

Physik des Alltags am Beispiel der Energetik des Fahrrads

H. J. Schlichting, U. Backhaus

1. Problemstellung

Neuere Untersuchungen bestätigen den Eindruck, daß der Physikunterricht zu den unbeliebtesten Fächern gehört (BORN et al. 1978). Einer der Hauptgründe dafür ist u. E. in der mangelhaften Berücksichtigung der spezifischen Differenz zwischen der Lebenswelt der Schüler und der wissenschaftlichen Welt zu sehen.

Diese Differenz kommt vor allem dadurch zustande, daß die physikalische Erfassung der Dinge weitgehend verlangt, sie "so zu beschreiben, wie wir sie nicht erfahren" (WEIZSÄCKER 1973, S. 107). Beispielsweise wird in der Physik häufig behauptet, alle Körper fielen gleich schnell, obwohl man ständig das Gegenteil erlebt. Physik treiben heißt daher nicht zuletzt, die Dinge zu verändern.

Anstatt diese Veränderung im Physikunterricht zu thematisieren und die Einsicht zu vermitteln, daß die Dinge durch die Veränderung in einer Hinsicht 'besser' werden, wird sie nicht selten unterschlagen: Indem physikalische Vorstellungen in der Regel an künstlichen, mit Hilfe von Lehrmitteln produzierten Phänomenen entwickelt werden, die oft nur dazu geschaffen wurden, jene Phänomene hervorzubringen, wird sofort eine veränderte Welt präsentiert. Möchte man jedoch erreichen, daß die Schüler einsehen, welchen Sinn es haben kann, die gewohnten Alltagsvorstellungen zugunsten der wissenschaftlichen Vorstellungen aufzugeben bzw. zu modifizieren, so muß mit ihnen zumindest an einzelnen Beispielen eine solche Veränderung der Sichtweise erarbeitet und nachgewiesen werden, was man dadurch gewonnen hat. Ein solches Beispiel kann u. E. die Behandlung des Fahrrads bzw. des Fahrradfahrens im Physikunterricht sein.

2. Entwicklung physikalisch-technischer Fragestellungen

Das Fahrrad ist für Schüler zunächst ein alltäglicher Gebrauchsgegenstand wie jeder andere. Beschreibungen des Fahrrads und des Fahrradfahrens erfolgen dementsprechend zumeist auf der Grundlage lebensweltlicher Begriffe: Ein Fahrrad ist beispielsweise gut, schnell, stabil, leicht laufend etc. Das Fahrradfahren wird etwa im Vergleich zur Fortbewegung mit anderen Verkehrsmitteln als anstrengend, unbequem, aber auch als kostengünstig, energiesparend, sportlich etc. eingeschätzt. Das Bedürfnis, diese Qualifizierungen zu hinterfragen, ist zunächst wenig ausgeprägt. Es läßt sich aber durch Fragen der folgenden Art erzeugen:

Wie entscheidet man einen Streit zwischen Schülern, in dem jeder sein eigenes Fahrrad besser bewertet als das der anderen?

Auf der Basis lebensweltlicher Vorstellungen wird das schwierig sein, ist aber wohl auch nicht sehr sinnvoll, weil ästhetische, emotionale u.ä. Urteile, über die oft keine Einigung erzielt werden kann, eine wesentliche Rolle spielen. Erst wenn man sich auf starke Einschränkungen einläßt, indem man objektiven Gesichtspunkten den Vorrang gibt, kann man eindeutige Antworten auf jene Fragen finden. Vereinbart man nämlich beispielsweise, ein Fahrrad dann schon als besser als ein anderes anzusehen, wenn der Energieaufwand zur Bewältigung einer vorgegebenen Aufgabe (z.B. Zurücklegung eines Weges in einer bestimmten Zeit) geringer ist, so bleiben damit andere Gütekriterien außerhalb der Betrachtung. Die eingegangene Beschränkung beinhaltet bereits einen ersten Schritt von lebensweltlichen Vorstellungen hin zu physikalischen. Indem die Schüler erkennen, daß dadurch eine objektive Antwort erreichbar ist, kann ihnen über das Beispiel des Fahrrads hinaus exemplarisch einsichtig gemacht werden, inwiefern lebensweltliche Vorstellungen solchen, die aus geplanter und konstruierter Erfahrung entstehen, unterlegen sein können: Der Sinn physikalischer Vorstellungen und Methoden wird hier sichtbar.

Diese Beschränkung reicht aber noch nicht aus. Sei der Herausarbeitung konkreter Verfahren zur Bestimmung der Energie muß die Reproduzierbarkeit im Vordergrund stehen. Das läßt sich nur dadurch erreichen, daß die zunächst unentwirrbar erscheinende Komplexität der zu berücksichtigenden Faktoren wie

Steigung, Wind, Reifendruck etc. auf ein überschaubares und praktisch handhabbares Maß reduziert wird. Die Schüler werden dabei schrittweise zu der Einsicht gebracht, daß man zunächst nur Ergebnisse über möglichst einfache und vor allem eigens für die Messung präparierte Standardsituationen erwarten kann; die mehr oder weniger starke Idealisierungen der Wirklichkeit darstellen: Zum Beispiel Windstille, hoher Reifendruck, ebene, harte Fahrbahn etc. Reale Situationen können dann durch Erfassung der Abweichungen von solchen Standardsituationen näherungsweise beschrieben werden. Im Unterschied zu den künstlichen, bereits im Hinblick auf Idealisierungen präparierten Objekten der Lehrmittelindustrie, die häufig keine Beziehungen zum Alltag erkennen lassen, kann im

vorliegenden Kontext exemplarisch der Sinn solcher Idealisierungen und damit ein typischer Aspekt physikalischen Vorgehens einsichtig gemacht werden.

Auf diese Weise läßt sich das lebensweltliche Ausgangsproblem schließlich, beispielsweise auf den Vergleich der Fahrräder bezüglich der folgenden beiden Punkte reduzieren, in denen zwar nur noch ein Aspekt des Ausgangsproblems erkennbar ist, der jetzt allerdings eine exakte wissenschaftliche Analyse ermöglicht:

(1) Energieabgabe pro Zeiteinheit (d.h. erforderliche Leistung) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.

Die Aufklärung dieses Sachverhalts ist Voraussetzung zur Beantwortung u.a. folgender Fragen:

- Welche Geschwindigkeiten lassen sich mit dem Fahrrad unter verschiedenen

Bedingungen erreichen?

- Durch welche Maßnahmen (z.B. konstruktive Verbesserungen des Fahrrads)

läßt sich die erforderliche Leistung vermindern?

(2) Energieabgabe pro zurückgelegter Strecke (d.h. aufzubringende Reibungskraft) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.

Daß sich beide Punkte physikalisch auf denselben Sachverhalt beziehen, wird von den Schülern an dieser Stelle i.a. noch nicht gesehen, wird sich jedoch in der späteren Diskussion herausstellen. Diese Problemstellung zielt auf Fragen der folgend Art ab:

- Welche 'Energiekosten' verursacht das Fahrradfahren?

- Wie effektiv ist die Fortbewegung mit dem Fahrrad, verglichen mit anderen Fortbewegungsarten (z.B. Laufen, Autofahren)?

3. Messungen zur Energetik des Radfahrens

Im Folgenden soll eine mögliche Sachstruktur zur Energetik des Radfahrens skizziert werden, wie sie sich aufgrund der Untersuchung der obigen Punkte ergeben könnte. Zu Beginn der Untersuchung ist es zweckmäßig, sich Klarheit über den Energiefluß beim Fahrradfahren zu verschaffen:

Der 'Motor' eines Fahrrads ist der Radler. Er betreibt das Fahrrad insbesondere durch Betätigung der Beinmuskeln, welche letztlich aufgrund der vom Organismus aufgenommenen Nahrungsmittel mit (chemischer) Energie versorgt werden. Obwohl demnach die Nahrungsmittel dem Kraftstoff des Autos entsprechen, läßt sich der Energieverbrauch beim Radfahren nicht ohne weiteres durch die zu-

geführten Nahrungsmittel messen¹. Aus diesen und anderen Gründen betrachtet man die mechanische Energie, die der Radler über die Pedalen auf das Fahrrad überträgt. Da man den Wirkungsgrad, mit dem der Organismus chemische Energie in mechanische Energie umsetzt mit guter Näherung kennt, läßt sich im Bedarfsfalle auch die 'Nahrungsmittelenergie' aus der mechanischen Energie berechnen.

Wie jeder Radfahrer weiß, ist die Übertragung von Energie auf das Fahrrad nicht notwendig mit einer Zunahme der **Fahrgeschwindigkeit** verbunden. Im Kontrast zum üblichen mechanischen Beispielkanon der Schulphysik ist nämlich i.a. selbst zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Geschwindigkeit (bzw. einer konstanten kinetischen Energie) Energie nötig: Da die kinetische Energie ständig durch Reibung (Luftwiderstand, Rollreibung der Laufräder) dissipiert, d.h. letztlich als Wärme an die Umgebung abgegeben wird, muß dieser Energieverlust durch eine entsprechende Zufuhr von (mechanischer) Energie ausgeglichen werden. Ansonsten käme das Fahrrad mehr oder weniger schnell zum Stehen. Bei gleichförmiger Bewegung geht die gesamte Energie, die der Radler aufbringt, über den Mechanismus der Reibung als wertlose Wärme an die Umgebung über.

Diese Erkenntnis bildet den Ausgangspunkt eines simplen Meßverfahrens: Da die Energie, die ein sich selbst überlassenes ausrollendes Fahrrad bei einer bestimmten Geschwindigkeit verliert, gleich der Energie sein muß, die zur Aufrechterhaltung dieser Geschwindigkeit aufgebracht werden muß, um eine (reibungsbedingte) Abbremsung zu vermeiden, kann man die zuzuführende Energie durch die dissipierte Energie bestimmen. Auf diese Weise läßt sich die Schwierigkeit umgehen, die mit einer direkten Messung der durch den Menschen auf das Fahrrad übertragenen Energie verbunden wäre.

Je nachdem, ob man an der durch den Radler aufzubringenden Leistung oder an der zu überwindenden Gesamtreibungskraft, die auf das Fahrrad wirkt, interessiert ist, wird man die Abnahme der kinetischen Energie pro Zeiteinheit oder pro Streckeneinheit bei der fraglichen Geschwindigkeit messen.

Dazu notiert man die Geschwindigkeit v_i , die das Fahrrad innerhalb zweckmäßig gewählter Zeitintervalle Δt_i oder Streckenabschnitte Δs_i durchläuft. Daraus läßt sich der jeweilige Verlust an kinetischer Energie

$$\Delta E_i = E(v_i) - E(v_i + 1)$$

¹ Eine indirekte Meßmethode besteht in der Bestimmtheit des Sauerstoffbedarfs, der proportional zur verbrauchten Energie ist.

und damit die mittlere Leistung

$$\bar{P}_i = \Delta E_i / \Delta t_i$$

oder die mittlere Gesamtreibungskraft

$$\bar{F}_i = \Delta E_i / \Delta s_i$$

bestimmen. Es liegt nahe, \bar{P}_i und \bar{F}_i näherungsweise als die Leistung bzw. Reibungskraft anzusehen, die bei der mittleren Geschwindigkeit $\bar{v}_i = \Delta s_i / \Delta t_i$ auftritt²:

$$P(\bar{v}_i) = \bar{P}_i \text{ bzw. } F(\bar{v}_i) = \bar{F}_i$$

Normalerweise genügt es, entweder $P(\bar{v}_i)$ oder $F(\bar{v}_i)$ zu bestimmen, da die beiden Größen über

$$P = F \cdot v \tag{1}$$

miteinander zusammenhängen

In der Praxis verfährt man zweckmäßigerweise folgendermaßen: Ausgestattet mit einem Tachometer und einer Stoppuhr bringt man das Fahrrad auf eine möglichst hohe Geschwindigkeit und läßt es ausrollen. Man merkt sich die Geschwindigkeitswerte, die der Tacho jeweils nach Verstreichen vorgegebener Zeitintervalle $\Delta t_i = i \cdot \Delta t$ anzeigt, bzw.

stoppt die Zeiten t_i , die vergehen, bis die Geschwindigkeit auf vorgegebene (gut ablesbare) Werte abgenommen hat und spricht z.B. die Meßergebnisse auf ein Diktiergerät.

Um evtl. doch noch vorhandene kleine Wind- und Steigungseinflüsse auszuschließen, wurden die Messungen in beiden Richtungen der gewählten Fahrbahn durchgeführt und die Meßwerte gemittelt. Die auf diese Weise gefundenen und in **Tabelle 1**

Tabelle 1: Meßwerte und Auswertung zum Ausrollversuch (ebene Asphaltstraße, hoher Reifendruck, Windstille, Gesamtmasse (Fahrrad und Radler) $m = 70$ kg, Tourenfahrerhaltung. Querschnittsfläche $A = 0,43$ m².)

v_i km/h	t s	$E(v_i)$ J	ΔE_i J	Δt_i s	V_i km/s	P_i W	F_i N
40	0	4320	1012	3,4	37,5	298	28,6
35	3,4	3308	878	4,4	32,5	200	22,2
30	7,8	2430	742	5,6	27,5	133	17,4
25	13,4	1688	608	7,4	22,5	82	13,4
20	20,8	1080	472	10,2	17,5	46	9,4
15	31,0	608	338	16,5	12,5	21	5,8
10	47,5	270					

² Da im ersten Falle keine Streckenabschnitte Δs_i gemessen werden, empfiehlt es sich, die mittlere Geschwindigkeit durch $\bar{v}_i = (v_i + v_{i+1})/2$ zu approximieren)

zusammengestellten Meßwerte beziehen sich auf die Standardsituation: Ebene Asphaltstraße, leicht laufendes Tourenrad, fest aufgepumpte Reifen, Windstille.

Die Geschwindigkeiten hätten natürlich auch durch Stoppen der Zeiten ' die das Fahrrad zum Durchlaufen vorgegebener Streckenabschnitte benötigt, bestimmt werden können. Diese Methode setzt allerdings die Mitarbeit eines ganzen Teams voraus und gestaltet sich i. a. relativ aufwendig. Zur Erreichung spezieller Lernziele (z.B. Erarbeitung der Kinematik am Beispiel des Fahrrads) kann diese Methode jedoch empfohlen werden (vgl. SCHLICHTING et al. 1981, S.79).

Der Graph in **Bild 1** wurde folgendermaßen gewonnen: Zunächst wurden die oben ermittelten

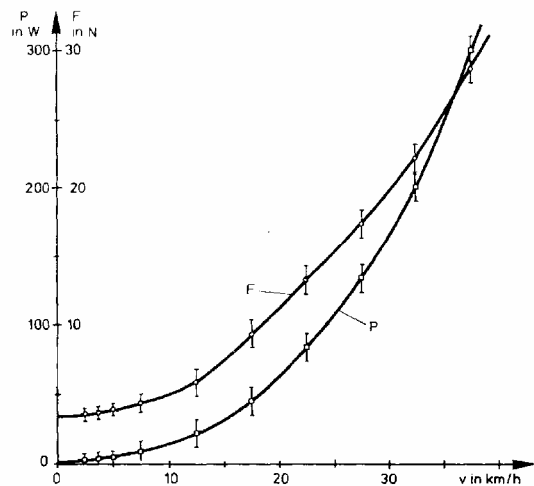


Bild 1: Grafische Darstellung der aus den experimentellen Werten für P und F ermittelten Kurven in Abhängigkeit von v

Punkte für \bar{P}_i und \bar{F}_i in Abhängigkeit von v aufgetragen. Um genaueren Aufschluß über das Verhalten des Fahrrads bei Geschwindigkeiten unter 10 km/h zu erhalten, wurden noch einige Meßpunkte dadurch bestimmt, daß das Fahrrad mit einer Federwaage möglichst gleichmäßig über eine vorgegebene Strecke gezogen und die dazu benötigte Zeit gemessen wurde. Unter der naheliegenden Voraussetzung, daß die Meßgrößen in den Bereichen zwischen je zwei gemessenen Werten nicht zu grundlegend verschiedenen Zahlenangaben führen würden, wurde eine glatte Kurve durch die Punkte gelegt, wobei der Graph von $P(v)$ für $v = 0$ offenbar den Wert 0, derjenige von $F(v)$ jedoch einen endlichen Wert (im vorliegenden Fall $F(0) = 3,5$ N) annimmt. Die Energetik eines jeden Fahrrads ist durch jeweils einen solchen Graphen charakterisiert. Vergleiche zwischen verschiedenen Fahrrädern (z.B. hinsichtlich der Leichtläufigkeit) laufen physikalisch gesehen auf Vergleiche entsprechen-

der Graphen hinaus. Dabei ist ein Fahrrad offenbar umso leichtläufiger, je flacher der jeweilige Graph ausfällt. Denkbar ist sogar, daß ein Fahrrad im niedrigen Geschwindigkeitsbereich besser als ein anderes 'ist, im hohen Geschwindigkeitsbereich dagegen schlechter (z.B. bei geänderter Körperhaltung), in diesem Fall schneiden sich die entsprechenden Graphen.

4. Modellvorstellungen zur Energetik

Die Diskussion der Meßwerte sollte u.a. mit dem Ziel geführt werden, das sich in ihnen widerspiegelnde physikalische Verhalten zu verstehen, d.h. sich angemessene Modellvorstellungen zu konstruieren: Die Tatsache, daß $P(v)$ mit v gegen Null strebt, bringt die Erfahrung zum Ausdruck, daß man im Stillstand keine Leistung aufzubringen hat. Demgegenüber strebt die Reibungskraft mit verschwindender Geschwindigkeit gegen einen endlichen Wert. Da aber der Reibungskraftanteil aufgrund des Luftwiderstandes $F_L(v)$ offenbar mit der Geschwindigkeit gegen Null gehen muß, ist dieser Wert auf den Rollenreibungsanteil $F_R(v)$ zurückzuführen.³

Nimmt man an, daß $F_R(v)$ unabhängig von v ist, $F_R(v)$ also eine achsenparallele Gerade durch $F_R(v) = 3,5 \text{ N}$ darstellt, so beschreibt die Kurve $F_L(v) = F(v) - F_R$ den Einfluß des Luftwiderstandes, der - wie man leicht nachrechnet - mit guter Näherung proportional zu v^2 ist, so daß $F(v)$ durch die Funktion

$$F(v) = F_R + F_L(v) = F_R + \gamma v^2$$

und wegen Glg. (1) $P(v)$ durch

$$P(v) = F_R \cdot v + \gamma \cdot v^3$$

beschrieben werden kann (γ ist eine Proportional-konstante).

Diesen Sachverhalt kann man sich durch folgende Modellvorstellung erklären: Den Widerstand, den die Luft auf den Radfahrer ausübt, faßt man als eine Art unelastischen Stoß auf, durch den die Luft auf Fahrradgeschwindigkeit beschleunigt wird. Für die dadurch bewirkte Impulsänderung

³⁾ F_R ist insofern eine effektive Rollreibungskraft, als darunter auch andere Reibungsflüsse (Lagerreibung u. a.) subsumiert werden.

$$\Delta \vec{p} = \Delta m_L \cdot \vec{v}_{rel}$$

³ F_R ist insofern eine effektive Rollreibungskraft, als darunter auch andere Reibungseinflüsse (Lagerreibung u.a.) subsumiert werden.

muß der Fahrer die Kraft

$$\vec{F}_L = \Delta \vec{p} / \Delta t = \Delta m_L \vec{v}_{rel} / \Delta t$$

auf die Luft ausüben. $\vec{v}_{rel} = \vec{v} - \vec{v}_w$ ist die Geschwindigkeit relativ zur Luft. Sie ist nur dann gleich der Geschwindigkeit \vec{v} des Radfahrers (bezogen auf die Fahrbahn), wenn die Windgeschwindigkeit \vec{v}_w verschwindet (Windstille). Δm_L ist die Masse der Luftsäule der Länge $v_{rel} \cdot \Delta t$ und vom Querschnitt A des Radfahrers:

$$\vec{F}_L = \rho \cdot A \cdot v_{rel} \cdot \vec{v}_{rel} \tag{2}$$

wobei $\rho \approx 1,3 \text{ kg/m}^3$ die Dichte der Luft ist und $v = |\vec{v}|$.

Glg. (2) beschreibt natürlich den energetisch 'ungünstigsten' Fall. In Wirklichkeit wird nicht die gesamte Luft mitgerissen. Ein Teil 'schlüpft' an den Seiten des Radlers vorbei. Das pflegt man üblicherweise durch Einführung einer effektiven Fläche $A' = (c_w A)/2$ zu berücksichtigen, wobei c_w eine empirisch zu bestimmende Konstante ist.

(Der Faktor $1/2$ ist eine reine Konvention, die getroffen wurde, um Konsistenz mit den üblichen c_w -Wert-Angaben in der Literatur herzustellen. c_w kann deshalb Werte zwischen 0 und 2 annehmen).

Bezieht man die (konstante) Rollreibungskraft \vec{F}_R mit ein, so ergibt sich allgemein eine erforderliche Gesamtleistung von

$$P_w(v) = \vec{F} \cdot \vec{v} = (\vec{F}_R + \vec{F}_L) \vec{v} = \vec{F}_R \cdot \vec{v} + \frac{1}{2} \rho \cdot c_w \cdot A \cdot v_{rel} \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}_{rel} \tag{3}$$

Durch Ausrechnen der Skalarprodukte ergibt sich daraus folgender Ausdruck:

$$P_w(v) = F_R \cdot v + \frac{1}{2} \rho \cdot c_w \cdot A \cdot \sqrt{v^2 + v_w^2 - 2v v_w \cos \theta} \cdot (v - v_w \cos \theta) \cdot v$$

dabei wird durch θ der zwischen Wind- und Fahr- richtung gebildete Winkel bezeichnet.

Diese Formel gilt für beliebige Windrichtungen, wenn man den Radius als Zylinder der Querschnittsfläche A auffaßt, was für Seitenwind nur als grobe Näherung gelten dürfte, weil die Breitseite des Fahrrads eine sehr viel größere Fläche besitzt als Vorder- und Rückseite. (Entsprechende Verfeinerungen werden in einer nachfolgenden Arbeit vorgenommen). Da die vorliegenden Messungen sich auf Windstille beziehen, können wir uns des weiteren auf den Spezialfall

$$P(v) = F_R \cdot v + \frac{1}{2} \rho c_w A v^3 \tag{4}$$

beschränken.

Die oben erhobenen Daten lassen sich mit diesem Modell erstaunlich gut beschreiben: Entnimmt man

der Literatur (z.B. WHITT et al. 1979, S. 92) den c_w -Wert (z.B. $c_w = 0,9$ für Tourenfahrerhaltung) und bestimmt die Frontfläche (im vorliegenden Fall wurde durch Ausmessen einer Fotografie der Frontfläche des Radlers ein Wert von $A = 0,43 \text{ m}^2$ ermittelt), so passen die experimentell ermittelten Werte relativ gut zur theoretischen Kurve

Setzt man andererseits die Gültigkeit dieses Modells voraus, so kann man umgekehrt den c_w -Wert durch Einsetzen der Meßdaten in Glg. (4) bestimmen. (Da sich der c_w -Wert u.a. mit der Fahrerhaltung ändert, können entsprechende Literaturwerte nur näherungsweise gelten). Im vorliegenden Fall ergibt sich ein mittleres $c_w = 0,83$, durch das eine noch bessere Anpassung an das Experiment (Bild

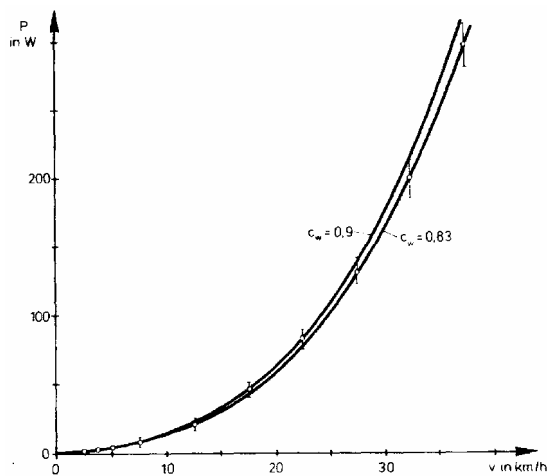


Bild 2: Grafische Darstellung der experimentellen und theoretischen Werte von $P(v)$ mit $c_w = 0,9$ und $c_w = 0,83$

2) erreicht wird. Darüber hinaus hätte man auch die weitgehende Unabhängigkeit der Rollreibungskraft von der Geschwindigkeit mit Hilfe dieses Modells herausfinden können.

5. Diskussion

Mit Glg. (3) bzw. Glg. (4) verfügt man über die Möglichkeit, erforderlich Leistungen beim Radfahren für verschiedene Körperhaltungen, Windeinflüsse, (sofern diese hinreichend genau zu bestimmen sind), Massen (die Rollreibung: kraft ist proportional zur Masse) usw. zu berechnen. Damit lassen sich u.a. Fahrräder hinsichtlich ihrer Leichtläufigkeit vergleichen, Verbesserungsmöglichkeiten diskutieren und mit Hilfe von Angaben über das menschliche Leistungsvermögen Aussagen darüber machen, inwieweit bestimmte Fahrleistungen vom Menschen zu bewältigen sind.

Insbesondere zeigt sich, daß der Rollreibungsanteil an der Gesamtleistung nur bei niedrigen Geschwindigkeiten ins Gewicht fällt. Daraus folgt beispielsweise, daß Verbesserungen im Hinblick auf die ef-

fektive Rollreibung (z.B. Verminderung der Lagerreibung, der Masse) an Alltagsrädern wichtiger sind als an Rennrädern, die meistens mit Geschwindigkeiten laufen, bei denen die Rollreibung

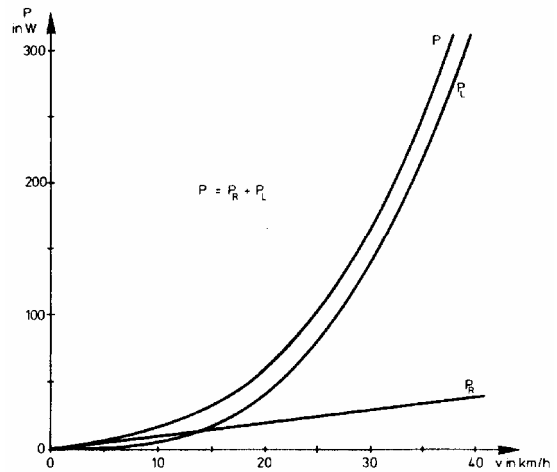


Bild 3: Grafische Darstellung von P_R , P_L und P in Abhängigkeit von v gemäß Glg. (4).

von relativ geringem Einfluß ist (Bild 3).

Insgesamt läßt sich an der vorliegenden Analyse des Fahrradfahrens ein weiteres wesentliches Merkmal naturwissenschaftlichen Vorgehens erkennen. Ausgehend von der Untersuchung einer möglichst einfachen Meßsituation wird eine Modellbildung initiiert, die es erlaubt, Vorhersagen über nicht untersuchte Situationen zu treffen.

6. Literatur:

- BORN, G.; Euler, M.: Physik in der Schule. In: Bild der Wissenschaft 2, 74 (1978)
- SCHLICHTING, H. J., Backhaus, U.: Physikunterricht 5-10. München: Urban & Schwarzenberg 1981
- WEIZSÄCKER, C. F. v.: Die Tragweite der Wissenschaft. Stuttgart: Hirzel 1966
- WHITT, F. R.; Wilson, D.: Bicycling Science. Cambridge etc.: THE MIT PRESS 1974.