

# Physik des Fahrradfahrens

# Moderne Zentauren

H. JOACHIM SCHLICHTING | WILFRIED SUHR

*Nun rollt sie wieder – die Tour de France. Für uns ein guter Anlass, die Physik des Radfahrens zu beleuchten. In einer mehrteiligen Serie beschäftigen wir uns mit Themen wie Leistung und Energetik, der Stabilität und den beiden natürlichen Feinden des Radfahrers: Berge und Wind.*

Wie jedes Jahr im Juli werden Boulevards, Landstraßen und Pässe in Frankreich Schaubühne des wohl größten mobilen Freilichttheaters der Welt. Drei Wochen lang verfolgen Millionen von Menschen direkt an der Strecke oder am Fernseher das Radrennen der Superlative, von dem Roland Barthes in seinen „Mythologies“ einmal gesagt hat: „Die Tour verfügt über eine echt Homerische Geographie. Wie in der Odyssee ist das Rennen zugleich eine Rundreise mit Prüfungen und eine vollständige Erforschung der irdischen Grenzen“ [1].

Die irdischen Grenzen fallen bei den beteiligten Athleten mit den Grenzen des menschlichen Leistungsvermögens zusammen, und ein Großteil der Faszination an dem Spektakel verdankt sich der Bewunderung dessen, was die Sportler aus sich und ihrem Fahrrad herauszuholen in der Lage sind. Diese Bewunderung speist sich nicht zuletzt daraus, dass die meisten Menschen auf eigene Erfahrungen als Radfahrer zurückgreifen können, wenn es darum geht, die Leistungen der Tourteilnehmer zu würdigen.

## Zur Energetik des Fahrrads

Im Unterschied zu den meisten anderen Fahrzeugen ist das Fahrrad nicht auf externe Energiequellen angewiesen. Der Radler muss die Antriebsenergie vor allem mit Hilfe seiner Beinmuskeln selbst aufbringen, wodurch ihm die Doppelrolle als Fahrer und „Motor“ des Fahrrads zufällt. Wie schnell und ausdauernd sich jemand damit fortzubewegen vermag, hängt daher in erster Linie vom körperlichen Leistungsvermögen ab. Die allgemeine Fahrtüchtigkeit vorausgesetzt, kommt es erst in zweiter Linie auf die Güte des Fahrrads an. Je mehr man sich jedoch vom Alltagsradeln hin zum Rad-Sport und damit auf die Grenzen des menschlichen Leistungsvermögens hin orientiert, gewinnen die technisch umgesetzten physikalischen Details und die Feinabstimmung zwischen Fahrer und Rad immer mehr an Bedeutung.

Welche Maximalgeschwindigkeit und vor allem welche maximale Durchschnittsgeschwindigkeit ein Radfahrer über einen längeren Zeitraum unter verschiedenen Bedingungen

erreichen kann, hängen entscheidend von der Frage ab, welche Maximalleistung er für welchen Zeitraum auf das Rad zu übertragen vermag.

Die auf das Fahrrad zu übertragende Leistung  $P_F$  ergibt sich rein physikalisch aus dem Produkt der Geschwindigkeit  $v$ , mit der sich das Rad fortbewegt und der Summe  $F_F$  der diversen Widerstandskräfte, die beim Fahren zu überwinden sind:  $P_F = F_F v$ .

Durch die Wechselwirkung der Reifen mit der Straße tritt ein Rollreibungswiderstand  $F_R$  auf, der praktisch weitgehend unabhängig von der Geschwindigkeit ist. Neben der Rollreibung hat man es vor allem mit dem Luftwiderstand  $F_L$  zu tun, der wegen der quadratischen Abhängigkeit von der Geschwindigkeit  $v$  bei schnellem Fahren zum begrenzenden Faktor wird. Wenn man mit  $A$  die Querschnittsfläche von Fahrer und Rad bezeichnet, mit  $c_W$  den Widerstandbeiwert und mit  $\rho$  die Dichte der Luft, so lässt sich der Gesamtwiderstand formal folgendermaßen ausdrücken:

$$F_F = F_R + F_L = \mu g m + \frac{1}{2} c_W \rho A v^2. \quad (1)$$

Um die Verhältnisse nicht allzu kompliziert werden zu lassen, haben wir uns dabei vorerst auf eine ebene Fahrbahn und Windstille beschränkt. Es ist klar, dass Steigungen und Wind eine Radtour und vor allem die Tour selbst bei moderaten Geschwindigkeiten zu einer wahren Tortour machen können.

Gleichung (1) lässt sich auf einfache Ausrollversuche anwenden. Dazu bringt man sein Fahrrad bei Windstille auf ebener Strecke auf eine möglichst hohe Geschwindigkeit und hört auf zu treten. Dann registriert man die Geschwindigkeitsabnahme mit der Zeit. Daraus lassen sich sowohl die Energieabnahme pro Zeiteinheit also auch die Leistungsabnahme und die Energieabnahme pro Streckeneinheit, also die Abnahme des Gesamtwiderstands, ermitteln [2].

Die Rollreibungskraft  $F_R$  ist proportional zur Masse  $m$  von Rad und Fahrer. Der Proportionalitätsfaktor  $\mu$  (Rollreibungskoeffizient) wird weitgehend durch die Wechselwirkung zwischen der Straße und den Reifen bestimmt. Während man den jeweiligen Straßenbelag als gegeben hinnnehmen muss, kann man den Reibungswiderstand durch Einsatz geeigneter Reifen günstig beeinflussen. So nimmt die Rollreibung normalerweise mit wachsendem Reifendruck ab. Die Bemühungen, bei Rennrädern durch spezielle Leichtbaumaterialien zu einer Reduzierung der Masse zu



kommen, sind daher nicht nur für die Überwindung von Steigungen von Bedeutung, sondern machen sich auch in einer entsprechenden Verminderung des Rollwiderstands bemerkbar. Der kostspielige Kampf um jedes eingesparte Gramm an Fahrradmasse sollte allerdings vor dem Hintergrund der Tatsache gesehen werden, dass der Fahrer selbst mit seiner Körpermasse den wesentlichen Anteil an der Gesamtmasse aufs Rad bringt. Die Frage, inwieweit hier Einsparpotenziale vorhanden sind, muss daher in enger Abstimmung mit den physischen Höchstanforderungen an den Athleten beantwortet werden.

In die Größe  $F_R$  der konstanten Rollreibungskraft werden meist die bei der Übertragung der Muskelenergie auf das Antriebsrad auftretenden Reibungsverluste mit einbezogen. Denn auch diese erweisen sich als weitgehend unabhängig von der Geschwindigkeit. Die Reibungsverluste treten in den Tretkurbeln, der Kette und den Lagern auf. Sie haben zur Folge, dass die auf die Pedale übertragene Leistung mit einem Wirkungsgrad von 90 bis 95 % „auf die Straße gebracht“ werden kann. Dieser vergleichsweise günstige Wert verdankt sich vor allem dem Kugellager. Es ersetzt das mit relativ hohen Energieverlusten einhergehende Gleiten durch das wesentlich günstigere Rollen.

Wäre die Rollreibung der einzige zu überwindende Fahrwiderstand, so könnte man mit dem Fahrrad in Schwindel erregende Geschwindigkeitsbereiche vordringen. So gelang im Jahre 1995 dem Holländer Fred Rompelberg mit einem Spezialrad mit doppelter Übersetzung im Windschatten eines Rennwagens eine Spitzengeschwindigkeit von 268,8 km/h [3]. Geht man stark vereinfachend davon aus, dass dabei eine Rollreibungskraft von  $F_R = 5 \text{ N}$  zu überwinden war, so wäre – wie man leicht nachrechnen kann – eine Spitzleistung von 373 W zu erbringen gewesen. Mit dieser Leistung hätte unser Versuchsfahrer unter normalen Bedingungen aufgrund des Luftwiderstandes nur eine Geschwindigkeit von knapp 40 km/h erreicht.

Diese Abschätzung verweist einmal mehr auf die Be rechtigung des Ausspruchs, den man vor allem von Alltags radlern hört: Beim Radfahren kommt der Wind immer von vorn. Es wird damit auf die Erfahrung angespielt, dass der Widerstand  $F_L$  der verdrängten und verwirbelten Luft quadratisch mit der Geschwindigkeit zunimmt und folglich eine mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit wachsende Antriebsleistung erfordert. So sehr man sich auch bemüht, die Querschnittsfläche durch die Rennfahrerhaltung zu verkleinern und den Widerstandsbeiwert durch eine geeignete aerodynamische Formgebung (stromlinienförmiger Helm, eng anliegende Kleidung, verkleidete oder geeignet geformte Speichen) und andere technische Maßnahmen zu verkleinern: Im Verhältnis zum schnellen Anwachsen der Leistung mit der Geschwindigkeit nehmen sich diese Maßnahmen rein großesordnungsmäßig äußerst bescheiden aus. Das deutliche Gefühl der Rennfahrer, bei hohen Geschwindigkeiten schließlich gegen die sprichwörtliche „Wand“ zu fahren, hat hier seinen sehr realen physikalischen Ursprung. Und dennoch sind all diese Bemühungen sinn-



(Quelle: ImageState)

**Abb. 1 Windschattenfahren senkt den Leistungsbedarf eines Fahrers.**

voll. Denn sie sind das einzige, was aus rein technischer Sicht getan werden kann.

Wegen der starken Abhängigkeit der Leistung vom Luftwiderstand bei höheren Geschwindigkeiten machen sich selbst kleinste Anlässe des Windschutzes angenehm bemerkbar. Wohl jeder Radfahrer weiß den Vorteil zu schätzen, sich im Windschatten eines Vordermannes zu bewegen. Diese Erfahrung wird bei der Tour de France insbesondere dann ausgenutzt, wenn auch noch ein starker Wind weht (Abbildung 1). Die Fahrergruppe fächert sich dann zu einer diagonalen Line auf, in der der jeweils vorderste Fahrer dem Wind trotzt bis er von einem anderen, in der Zwischenzeit „ausgeruhten“ Teamkollegen abgelöst wird. In einer solchen Formation können die Fahrer bis zu 30 % Energie einsparen, so dass die jeweils auf einen Fahrer bezogene Durchschnittsleistung der Gruppe erheblich unter der eines Einzelfahrers sinkt.

Diese Diagonalformation erinnert an die V-Formationen der Zugvogelschwärme. Ohne diese Formation wären die Vögel rein energetisch nicht in der Lage, ihre weltumspannenden Wanderungen zu überstehen. Allerdings profitieren sie nicht vom Windschatten des seitlichen „Vordermannes“, sondern von der Aufwärtsströmung der Randwirbel.

Der Luftwiderstand ist proportional zur Luftdichte, die ihrerseits von der Temperatur und der Höhe abhängt. Bei 0 °C auf Meereshöhe beträgt die Dichte 1,293 kg/m<sup>3</sup>, bei 30 °C sind es 1,163 kg/m<sup>3</sup>. Das ist etwa ein Unterschied von 10 %. Dieser rein aerodynamische Vorteil muss jedoch vor dem Hintergrund der Tatsache gesehen werden, dass das Leistungsvermögen des Organismus bei höheren Temperaturen immer stärker beeinträchtigt wird. Zu einer ähnlichen Einschätzung muss man beim anstrengenden Radfahren in großen Höhen kommen, weil die dünneren Luft zwangsläufig einen geringeren Sauerstoffgehalt zur Folge hat. Sauerstoff ist jedoch für die hohe Energieabgabe ebenso wichtig wie die Nahrungsmittel, die erst durch die Verbindung mit Sauerstoff chemische Energie abgeben.

Bei Fahrradrennen wird man grundsätzlich keine Mühe scheuen, die Performance von Rad und Radler zu verbessern, auch wenn die Effekte noch so klein sind. Schließlich entscheiden oft Bruchteile von Sekunden über den Sieg – zum Beispiel beim Sprinten. Ob sich die Verbesserungen jedoch auch für den Alltagsradler lohnen, ist eine andere Frage. Wie machen sich die verschiedenen Maßnahmen (Gewichtsreduzierung beim Rad, aerodynamisch geformte Teile des Fahrrads, Verbesserung des Fahrradwirkungsgrades durch Kettenschaltung statt Nabenschaltung usw.) in der Energiebilanz bemerkbar?

Wie man leicht anhand von Gl. (1) berechnen oder Abbildung 2 entnehmen kann, ergibt sich (für das von uns untersuchte Versuchsrads), dass bei einer Geschwindigkeit von 13,5 km/h Rollreibung und Luftwiderstand gerade gleich groß sind. Bei niedrigen Geschwindigkeiten, wie sie typisch für den Alltagsgebrauch von Fahrrädern sind, spielt die Leichtläufigkeit daher eine ebenso wichtige Rolle wie Maßnahmen zur Reduzierung des Luftwiderstandes. Allerdings lohnen sich aufwändige Maßnahmen zur Verbesserung der Aerodynamik bei Alltagsfahrrädern wie aerodynamisch geformte Helme und Speichen kaum. Auch wird man sich die Unbequemlichkeit, in Rennfahrerhaltung durch die Stadt zu fahren, kaum antun.

Bei höheren Geschwindigkeiten schlagen aerodynamische Maßnahmen jedoch voll zu Buche. Die energetischen Einsparungen durch einen Wechsel von der aufrechten Tourenradhaltung zur Rennfahrerhaltung wirken sich sogar in

doppelter Hinsicht aus. Bei unserem Versuchsfahrer ermittelten wir durch maßstabsgerechtes Auszählen der Querschnittsfläche auf Fotografien bei Tourenfahrerhaltung und Rennfahrerhaltung einerseits eine Reduktion der Fläche um etwa 18 % von 0,43 m<sup>2</sup> auf 0,36 m<sup>2</sup>. Wie eine Anpassung der unter diesen verschiedenen Bedingungen ermittelten Leistungskurven zeigt, nimmt andererseits die Windschlüpfrigkeit aufgrund der mehr konvexen Körperform bei der Rennfahrerhaltung zu, was sich in einer Reduktion des  $c_w$ -Werts um 24 % von 0,85 auf 0,65 ausdrückt. Insgesamt wurde damit im vorliegenden Fall eine Verminderung des Luftwiderstandes um 37 % erreicht. Bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h verminderte sich die dafür nötige Leistung von 61 W auf 45 W, also gut um ein Viertel.

Mit der dadurch gewonnenen Leistung ließe sich eine Geschwindigkeitsgewinn von 3 km/h realisieren. Aus der Sicht eines Alltagsfahrers ist das ein eher bescheidener Vorteil, so dass er sich vielleicht zu einem Beibehalten der bequemeren Tourenfahrerhaltung entschließen wird. Moderne Fahrräder lassen oft durch die Konstruktion der Lenker ohne größere Einschränkungen beide Möglichkeiten zu.

Ganz anders stellt sich die Situation bei Rennfahrten dar. Hier kommt es in jedem Fall darauf an, das Fahrrad so zu optimieren, dass sowohl beim Streckenfahren als auch beim Sprint Höchstgeschwindigkeiten erreicht werden können. Dieser Zielsetzung werden auch die Fragen der Bequemlichkeit untergeordnet. Um die Bedingungen dabei möglichst vergleichbar zu halten, gibt es bestimmte Vorschriften, die bei der Konstruktion der Rennräder eingehalten werden müssen. Beispielsweise sind Liegeräder, die aufgrund ihrer Konstruktion dem normalen Rennrad überlegen sind, nicht zugelassen.

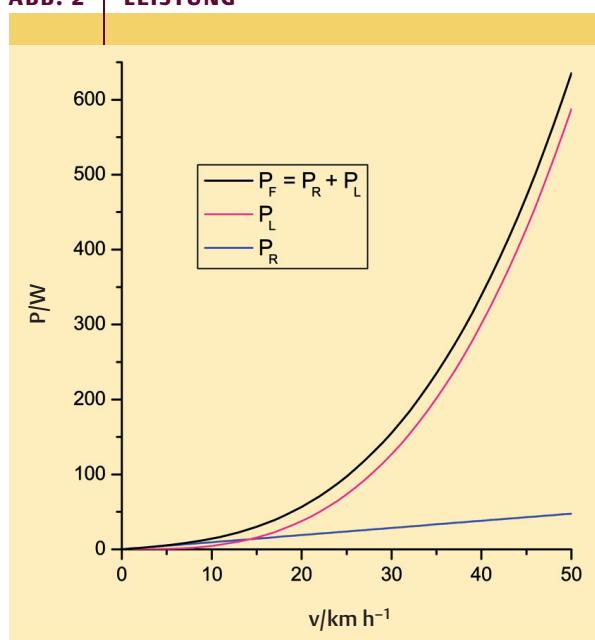
Das Fahrrad selbst ist allerdings nur die eine Hälfte der Medaille. Die andere ist der Fahrer selbst. Die Frage, wie der Fahrer in dem durch das Rennen vorgegebenen Randbedingungen, die Muskelenergie möglichst optimal auf das Fahrrad überträgt, betrifft in erster Linie seine körperliche Konstitution, die Ernährung und die individuelle Fahrtechnik.

### Der Radler als „Motor“ des Rades

Ob man nun den fast auf seinem Rad liegenden, sich mit hoher Geschwindigkeit elegant in die Kurve legenden Rennfahrer oder den gemütlich, unangestrengt in aufrechter Haltung durch die Stadt fahrenden Alltagsradler vor Augen hat, in beiden Fällen gewinnt man den Eindruck einer harmonischen quasi zentaurischen Einheit von Rad und Fahrer. Diese zunächst vom äußeren Eindruck her getroffene Einschätzung hat einen sehr realen energetischen Hintergrund. Nur in Verbindung mit dem Fahrrad schafft es der Mensch seine Muskelenergie mit einem (metabolischen) Wirkungsgrad von knapp 25 % in mechanische Energie umzuwandeln [4]. Bei anderen körperlichen Aktivitäten ist der Wirkungsgrad zum Teil erheblich niedriger.

Vergleicht man diesen Wirkungsgrad mit dem Carnotschen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine, so ist er

ABB. 2 | LEISTUNG



Die auf das Fahrrad zu übertragende Leistung  $P_F$  in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit  $v$ . Diese Leistung muss gegen zunehmende Widerstände der Roll- (Index R) und Luftreibung (L) aufgebracht werden. Die Kurven errechnen sich nach Gl. (1). Es wurden die Werte des von uns getesteten Rennrads benutzt (Tab. 2).



von derselben Größenordnung wie etwa bei einem PKW mit Ottomotor. Dieselmotoren und Kraftwerke liegen mit bis zu 40 % noch darüber. Aber der Vergleich hinkt. Würde der menschliche Organismus wie eine Wärmekraftmaschine arbeiten, müsste der Körper selbst bei idealer Arbeitsweise nach dem Carnotschen Wirkungsgrad  $\eta_C = 1 - T_U/T_K$  bei einer Umgebungstemperatur von  $T_U = 293$  K eine Körpertemperatur von mindestens  $T_K = 391$  K entsprechend 100 °C aufweisen.

Diese Diskrepanz verweist auf die völlig andere „Arbeitsweise“ unseres Körpers. In den Muskeln wird die aus den Nahrungsmitteln gewonnene chemische Energie direkt in mechanische Energie umgewandelt. Dies geschieht in den Muskeln mit einem Wirkungsgrad von bis zu 80 %. Der Gesamtwirkungsgrad von 25 % bringt zum Ausdruck, dass im Körper noch sehr viel mehr passiert, als Energie auf das Fahrrad zu übertragen. Trotzdem ist der Organismus dem Motor insofern vergleichbar, als 75 % der umgesetzten Energie als Wärme anfallen und genügend schnell an die Umgebung abgegeben werden müssen, damit sich der Körper nicht überhitzt. Dies würde wie bei einer Wärmekraftmaschine, bei der das Kühlwasser zu heiß wird, zu einem Abfall der Leistung führen. Daher ist es in einem geschlossenen Raum nicht möglich, auf einem Fahrradergometer über einen so langen Zeitraum wie beim richtigen Radfahren Höchstleistungen zu erbringen. Die Luftkühlung des Fahrtwindes fehlt. Wer sich als Radfahrer über den Fahrtwind ärgert, sollte sich damit trösten, dass dieser letztlich genauso wichtig ist, wie der Energienachschub durch eine angemessene Ernährung.

Der Wirkungsgrad von 25 % wurde unter optimalen Bedingungen gemessen. Das heißt vor allem, dass die Energie durch eine an den Eigenfrequenzen der Schenkel orientierte natürlichen Bewegungen der Beine und von anderen individuellen Faktoren abhängende Drehfrequenz optimal auf das Rad übertragen werden kann. Kann der Fahrer nur sehr langsam treten (bei Gegenwind oder beim Bergauffahren) oder muss er sehr schnell treten (bei Rückenwind oder beim Bergabfahren), dann wird das Radfahren unverhältnismäßig anstrengend und unbequem. Das äußert sich rein physikalisch in zusätzlichen Energieverlusten und wirkt sich negativ auf den Wirkungsgrad aus. Eine den verschiedenen Umständen angemessene Übersetzung in Form einer Gangschaltung dient hier der Abhilfe. Je unterschiedlicher die Bedingungen sind, die bei einer Radfahrt auftreten können, desto feinstufiger muss die Gangschaltung ausgelegt sein. Dies gilt insbesondere für die Tour de France, bei der nur derjenige eine Chance hat, der in jeder Situation möglichst mit optimalem Wirkungsgrad fährt.

Neben einer geeigneten Gangschaltung sind weitere Bedingungen, wie die Sattelhöhe oder die Fahrerhaltung wichtige Voraussetzung für eine optimale Energetik. Dabei kann es beispielsweise bei der Fahrerhaltung zu Optimierungsproblemen kommen. Eine bequeme Sitzhaltung und eine aerodynamisch günstige Position schließen einander weitgehend aus. Wenn man die aufrechte Haltung bei Alltags-

**TAB. 1 | KENNWERTE DES VERSUCHSFAHRRADS**

Kennwerte	$\mu$	$c_w$	$A/m^2$
Tourenfahrerhaltung	0,005	0,85	0,43
Rennfahrerhaltung	0,005	0,65	0,36
Masse des Versuchsfahrers und des Versuchsrades: $m = (55 + 15) \text{ kg} = 70 \text{ kg}$			

**TAB. 2 | DURCHSCHNITTLICHE LEISTUNGEN**

Zeitdauer	$P_{out}/W$	$P_{in}/W$
dauernd	75	400
270 min	142	668
60 min	208	932
1 min	403	1712
5 s	1120	4580
Gilt für einen Erwachsenen nach [6]		

fahrten belächelt, so sollte man bedenken, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten der Leistungsgewinn durch eine Rennfahrerhaltung leicht durch die Abnahme des Wirkungsgrades aufgrund der unbequemen Haltung kompensiert werden kann.

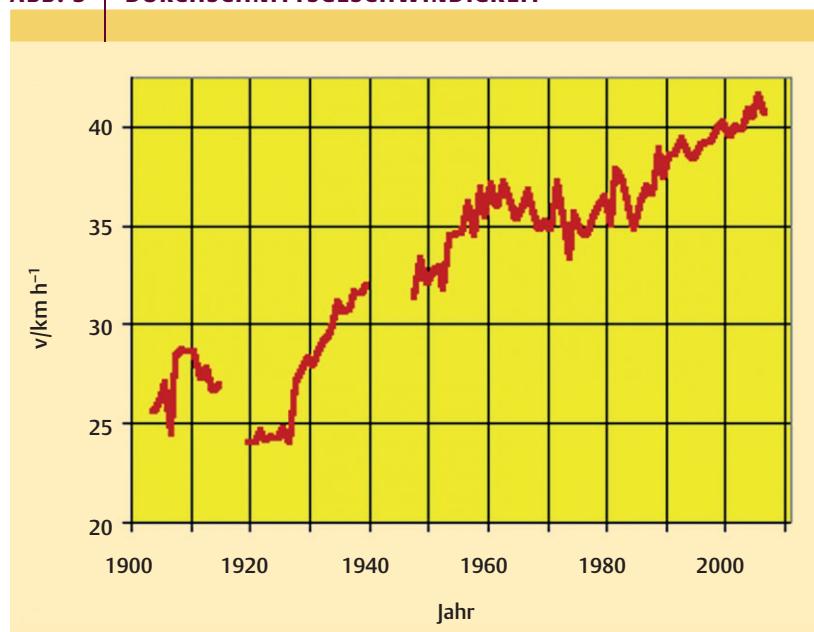
„Bequeme Haltung“ rein physikalisch gesehen heißt vor allem, dass sich die Aktivitäten des Radfahrers weitgehend auf die Bewegung der Beine beschränken und sich der Rest des Körpers in relativer Ruhe befindet. Die Tatsache, dass beim Radfahren in bequemer Haltung für die reine Fortbewegung überflüssige Energieverluste vermieden werden ist im Übrigen ein Argument dafür, dass der Wirkungsgrad beim Fahrrad und beim Fahrradergometer höher ist als beim Laufen und anderen natürlichen Fortbewegungsarten [5].

Bezeichnet man die über die Pedale an das Rad abgegebene Leistung als Leistungsoutput  $P_{out}$  und die dabei vom Organismus insgesamt aufzubringende Leistung als Leistungsinput  $P_{in}$ , so kann man näherungsweise folgenden Zusammenhang zugrunde legen:  $P_{in} = P_{GU} + P_{out}/\eta$ . Dabei ist  $P_{GU}$  die Grundumsatzrate, welche die Leistung des Organismus im Ruhezustand erfasst. Diese muss aufgebracht werden, unabhängig davon, ob man Rad fährt oder ruht. Sie variiert mit der Masse des Fahrers und beträgt für einen 75 kg schweren Fahrer etwa 100 W.

Geht man davon aus, dass beim Erreichen der Spitzengeschwindigkeit dem Radfahrer eine Leistung abverlangt wird, die er nur wenige Sekunden aufzubringen in der Lage ist, dann ermittelt man gemäß Tabelle 2 für  $P_{out} = 1120$  W mit den Daten unseres Versuchsfahrers eine Geschwindigkeit von circa 67 km/h. Das ist ungefähr der Wert, der beispielsweise beim Sprint beim Bahnrad Sport, auch Fliegerrennen genannt, erreicht wird.

Wie man leicht nachrechnet, könnte man mit unserem Versuchsrade in einer Stunde eine Strecke von etwa 40 km zurücklegen. Den Weltrekord mit 49,7 km hält gegenwärtig der Tscheche Ondrej Sosenka. Er liegt nicht nur wegen

ABB. 3 | DURCHSCHNITSGESCHWINDIGKEIT



Die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Tour-de-France-Sieger sind von 25,7 km/h im Jahre 1903 bis auf über 40 km/h gestiegen. Hierbei ist zu bedenken, dass in den ersten Jahrzehnten die zu bewältigende Gesamtstrecke häufig über 5000 km lag und die einzelnen Etappen meist doppelt so lang waren wie heute. Zudem fuhren die Räder anfangs noch ohne Gangschaltung.

der besseren Aerodynamik des Fahrrades, sondern auch aufgrund des höheren Leistungsvermögens eines speziell trainierten Athleten deutlich über unserem Wert. Die Tatsache, dass der spätere Gründer der Tour de France Henri Desgrange im Jahre 1893 mit 35,325 km unter dem für unser Versuchsräder berechneten Wert liegt, dürfte allerdings auf die bessere Aerodynamik unseres Rades zurückzuführen sein (Abbildung 3). Denn man muss davon ausgehen, dass Desgrange mindestens das Leistungsvermögen eines heutigen Durchschnittserwachsenen aufgebracht hat.

## Zusammenfassung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Spitzengeschwindigkeiten beim Radfahren zu erhöhen, beispielsweise durch Gewichtsverminderung. Entscheidend ist jedoch der Luftwiderstand, da der Rollwiderstand so gut wie unabhängig von der Geschwindigkeit ist. Der Luftwiderstand nimmt jedoch quadratisch mit der Geschwindigkeit zu und erfordert folglich eine mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit wachsende Antriebsleistung.

## Stichworte

Physik des Fahrrads, Rollreibungswiderstand, Luftwiderstand,  $C_w$ -Wert, Wirkungsgrad von Muskeln.

## Literatur

- [1] R. Barthes, Die Tour de France als Epos, in: G. Gebauer, G. Hortleder, Sport-Eros-Tod. Suhrkamp, Frankfurt M 1986.
- [2] H. J. Schlichting, U., Backhaus, technic-didact 1983, 8 (1), 27.
- [3] [www.fredrompelberg.com/de/html/algemeen/fredrompelberg/rekord.asp](http://www.fredrompelberg.com/de/html/algemeen/fredrompelberg/rekord.asp)
- [4] F. R. Whitt, D. G. Wilson, Bicycling Science, MIT Press, Cambridge 1974, S. 24.
- [5] S. S. Wilson, Scientific American 1973, 228 (3), 81.
- [6] D. R. Wilkie, J. of the Royal Aeronautic Society 1960, 64, 477.

## Die Autoren



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 im Bereich der Lehrerbildung tätig.



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

## Anschrift

Prof. Dr. H. Joachim Schlichting, Wilfried Suhr, Institut für Didaktik der Physik, Universität Münster, Wilhelm-Klemm-Straße 10, 48149 Münster, [schlichting@uni-muenster.de](mailto:schlichting@uni-muenster.de)