

Plädoyer für einen guten Reifen

Wie schnell man mit einem Fahrrad fährt, hängt zum einen von der eigenen Leistung ab, zum anderen von den zu überwindenden Fahrwiderständen. Betrachtet man eine unbeschleunigte Fahrt auf ebener Straße, dann sind es nur der Roll- und Luftwiderstand, die die eigenen Kräfte aufzehren (die Reibungsverluste im Antrieb können in der Regel vernachlässigt werden).

Nun gibt es mindestens zwei Kategorien von Radfahrern: Die einen wollen möglichst schnell, die anderen mit möglichst wenig Anstrengung fahren, Beides läuft zwar auf dasselbe hinaus (nämlich die Reduzierung der Summe aller Fahrwiderstände), jedoch legt die erste Kategorie der Rennfahrer ihr Hauptaugenmerk auf den Luftwiderstand, über den schon viel geforscht, getüftelt und geschrieben wurde. Bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 4.5 m/s (16 km/h) ist aber der Rollwiderstand größer als der Luftwiderstand und verdient deshalb gerade von Seiten der gemütlichen Alltagsradler mehr Interesse, als ihm bisher zukam. Insbesondere bei Fahrten mit Anhängern und Lastenrädern macht der Rollwiderstand den Löwenanteil des Gesamtwiderstandes aus.

In Diagramm 1 geben die durchgezogenen Kurven die erreichbare Geschwindigkeit bei gegebener Leistung für zwei verschiedene Reifen an (bei einem Fahrrad mit Fahrer von $m=100$ kg und $c_w \cdot A=0.5$ m²). An der gepunkteten Kurve kann man ablesen, welchen Geschwindigkeitszuwachs man bei gegebener Leistung hat, wenn man den Rollwiderstandsbeiwert von $C_r=0.00568$ auf $C_r=0.00160$ senkt. Dies entspricht in etwa der Spanne zwischen einem eher schlechten und einem sehr guten Meßergebnis des Rollreibungskoeffizienten (jeweils 20"-Bereifung bei gleichem Druck von 5 bar). Mit 75 W Leistung

(der Dauerleistung eines durchschnittlichen Radlers) würde man dann 12% schneller fahren können. Selbst bei 200 W Leistung beträgt der Zuwachs noch über 6%.

Die Entwicklung von Fahrradreifen ist bisher weitgehend der Industrie vorbehalten; der Leipziger Ingenieur Paul Rinkowski, auf dessen handgefertigte Gürtelreifen noch hingewiesen werden soll, bildete hier eine Ausnahme [5]. Einige Reifenhersteller messen die Rollwiderstände ihrer Reifen auf Laborprüfständen und beziehen die Ergebnisse auch in die Optimierung mit ein. Als Verkaufsargument wird der Rollwiderstand jedoch nur selten und niemals quantitativ verwendet; das mag auch damit zusammenhängen, daß wegen der Unterschiedlichkeit der verwendeten Meßverfahren eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Daten nicht gegeben ist. Darüber hinaus scheint es doch eher die Optik der Reifen zu sein, die steilen Stollen und schlidrigen Sliks, die verkaufsfördernd ins Auge fallen.

Als Grundlage für die Erarbeitung einer Theorie des Fahrradreifens interessierten uns (Physiker und Physikstudentinnen der Arbeitsgruppe Fahrradforschung) Rollreibungsmessungen möglichst vieler verschiedener Reifen. Vor mehr als zwei Jahren perfektionierten wir im Rahmen einer Studienarbeit ein Meßverfahren, das realistische Messungen (mit hoher Genauigkeit) auf beliebigen Fahrbahnoberflächen ermöglicht [1].

Die Ausroll-Methode

Die Messungen erfolgen mit einem eigens dafür konstruierten Meßdreirad. Das ORM (Oldenburger Rollwiderstands-Meßgerät) wird von Hand angeschoben und rollt dann antriebslos über eine Meßstrecke. Mit Hilfe eines Taschencomputers wird die Zeit

für jede Radumdrehung beim Ausrollen gemessen und gespeichert. Aus den Zeitdifferenzen zwischen je zwei Radumdrehungen kann die negative Beschleunigung und daraus mit Hilfe der Fahrwiderstandsgleichung der gesamte Fahrwiderstand berechnet werden. Am Ende wird dann über alle Einzelwerte gemittelt. Da uns der Luftwiderstand und der Rollwiderstand von zwei Reifen des Dreirades aus Eichmessungen bekannt sind, kann der Rollwiderstand eines einzelnen unbekannteren Reifens bestimmt werden.

Um den Einfluß des Höhenprofils der Meßstrecke zu kompensieren, wird die Meßstrecke in beiden Richtungen durchfahren, und die Meßwerte werden paarweise ausgewertet. Die Belastung des gemessenen Reifens beträgt etwa 55 kg, was den üblichen Radlasten am Zweirad entspricht. Für die korrekte Auswertung müssen der exakte Radumfang, die Radlasten, das Trägheitsmoment der Laufräder und die Luftdichte bestimmt werden. Außerdem muß es möglichst windstill sein; wir führten die Messungen deshalb in einem geschlossenen Flur durch, dessen Oberfläche aus PVC-Belag auf einer hochbelastbaren Betondecke bestand.

Wie der Rollwiderstand entsteht

Der Rollwiderstand eines Reifens ist gegeben durch $F_r = C_r \cdot m \cdot g$. Der Rollwiderstandsbeiwert C_r gibt an, mit welchem Anteil der Gewichtskraft das rollende Rad abgebremst wird. Je größer C_r und je schwerer das Rad (bzw. der Fahrer), desto schwerer rollt es. Es gibt noch keine gesicherte Theorie darüber, wie der Rollwiderstand im Reifen entsteht, doch nimmt man an, daß er sich hauptsächlich aus zwei Komponenten zusammensetzt:

Der Abrollwiderstand

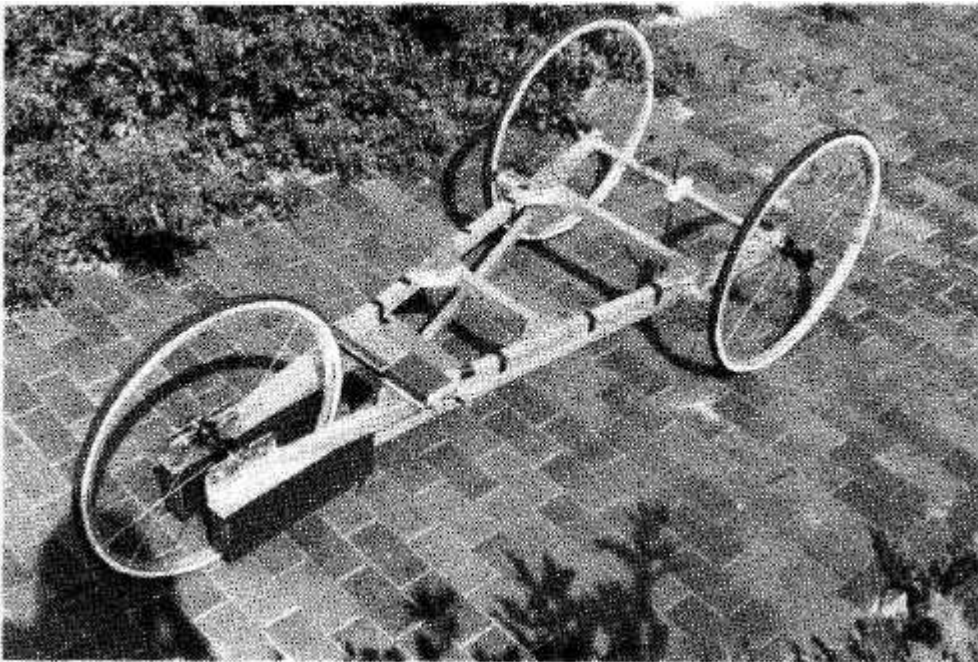
Der Abrollwiderstand entsteht dadurch, daß der Reifen die Fahrbahn **nicht in einem mathematischen Punkt** berührt, sondern mit einer etwa elliptischen Fläche aufsteht. Der Abrollvorgang kann als ein ständiges Kippen

Technik

| Cr*10E-5 bei | | | | | |
|--------------|--------|---------|--------|----------------------------------|--|
| 300 kPa | 500kPa | 700 kPa | Größe | Reifen | |
| 669 | 436 | 378 | 47-305 | Conti Tour de Sol (Spezialanf.) | |
| 614 | - | - | 47-305 | Schwalbe Standard GW, HS159 | |
| - | 416 | - | 47-406 | ACS RL-Edge | |
| - | 514 | - | 47-406 | Avocet Fastgrip Freestyle | |
| 392 | - | - | 47-406 | Continental Nylon S, US Type | |
| 219 | 160 | - | 47-406 | Rinkowski Gürtelreifen, Typ 1 | |
| 261 | 195 | - | 47-406 | Rinkowski Gürtelreifen, Typ 2 | |
| - | 568 | 467 | 32-406 | Schwalbe City Jet | |
| 685 | - | - | 47-406 | Schwalbe Standard SK, HS 188 | |
| 526 | - | - | 47-406 | Schwalbe Standard GW, HS 188 | |
| 455 | - | - | 47-406 | Schwalbe Standard GW, HS 159 | |
| - | 394 | - | 47-406 | Tioga Competition mit Mittelsteg | |
| - | 419 | - | 47-406 | Tioga Competition mit Stollen | |
| - | 534 | - | 28-440 | Michelin Standard | |
| - | 446 | 360 | 32-451 | HudynHPV | |
| 408 | - | - | 47-507 | Schwalbe Standard GW, HS 159 | |
| - | 267* | - | 47-559 | Continental Avenue | |
| 696 | 643* | - | 50-559 | Continental Super Cross | |
| 332 | - | - | 47-559 | Schwalbe Standard GW, HS 159 | |
| 513 | 361 | - | 32-622 | Avocet Slik | |
| 596 | 402 | 349 | 28-622 | Avocet Slik | |
| - | 477 | 376 | 20-622 | Avocet Slik | |
| - | 351 | - | 28-622 | Continental Super Sport | |
| - | 278 | - | 32-622 | Continental Top Touring Skinwall | |
| 448 | 341 | - | 37-622 | Continental Top Touring (weiß) | |
| - | 537 | - | 25-622 | Panaracer Tour Guard | |
| 446 | 351 | - | 47-622 | Schwalbe City Jet HS257 | |
| 522 | 362 | - | 37-622 | Schwalbe City Jet HS257 | |
| 573 | 389 | 321 | 25-622 | Schwalbe Blizzard HS 190 | |
| - | 432 | 342 | 22-622 | Schwalbe Blizzard HS 190 | |
| - | 496 | 405 | 18-622 | Schwalbe Blizzard HS 190 | |
| - | 397 | - | 44-622 | Schwalbe Hurricane | |
| - | 474 | - | 32-622 | Schwalbe Marathon | |
| 336 | - | - | 47-622 | Schwalbe Standard GW, HS 159 | |
| - | 393 | - | 28-622 | Semperit Long Life | |
| - | 319 | - | 37-622 | Vredestein Monte Carlo | |
| - | 312 | - | 25-622 | Vredestein Runner | |

* bei 450 kPa (4,5 bar) gemessen

Hinweis: Ein Wert in der Tabelle von z.B. 312 bedeutet Cr=0.00312
 Alle Meßwerte haben einen relativen Fehler < 2%



Antriebsloses Meßdreirad
ORM (Oldenburger
Rollwiderstands-Mefigerät)

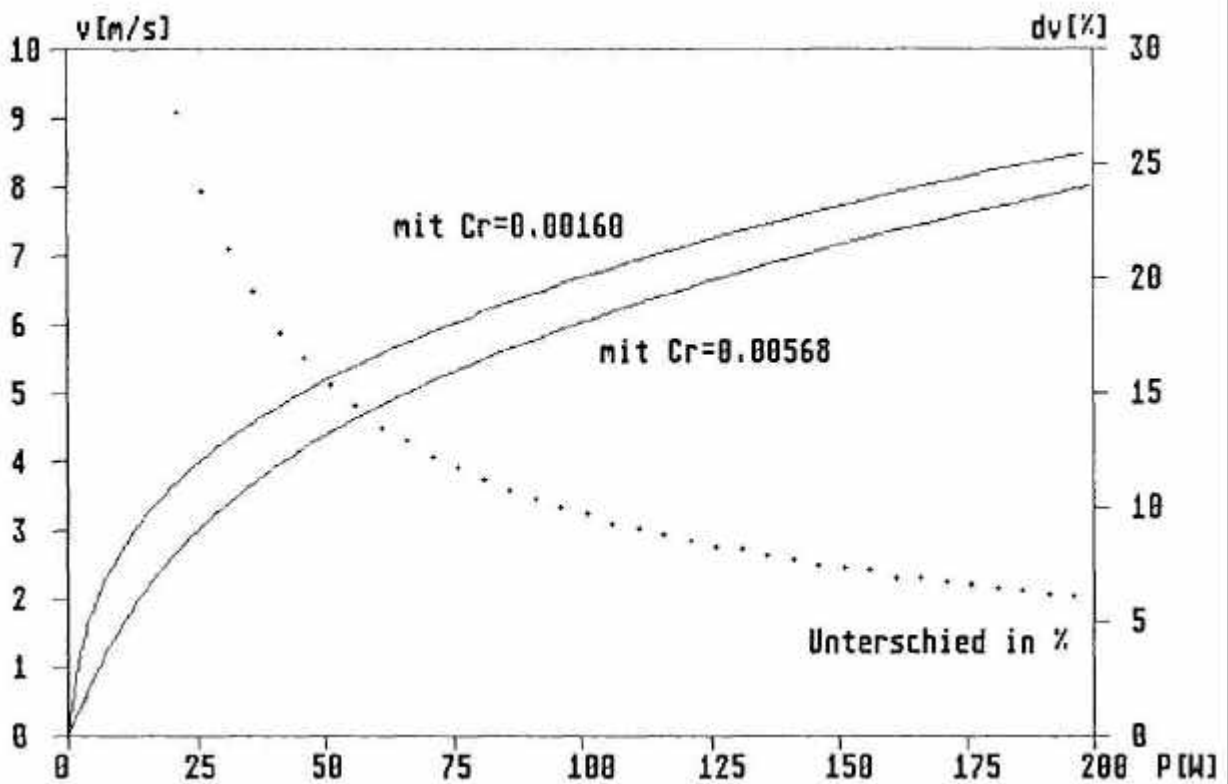


Diagramm 1: Geschwindigkeitszuwachs durch besseren Reifen

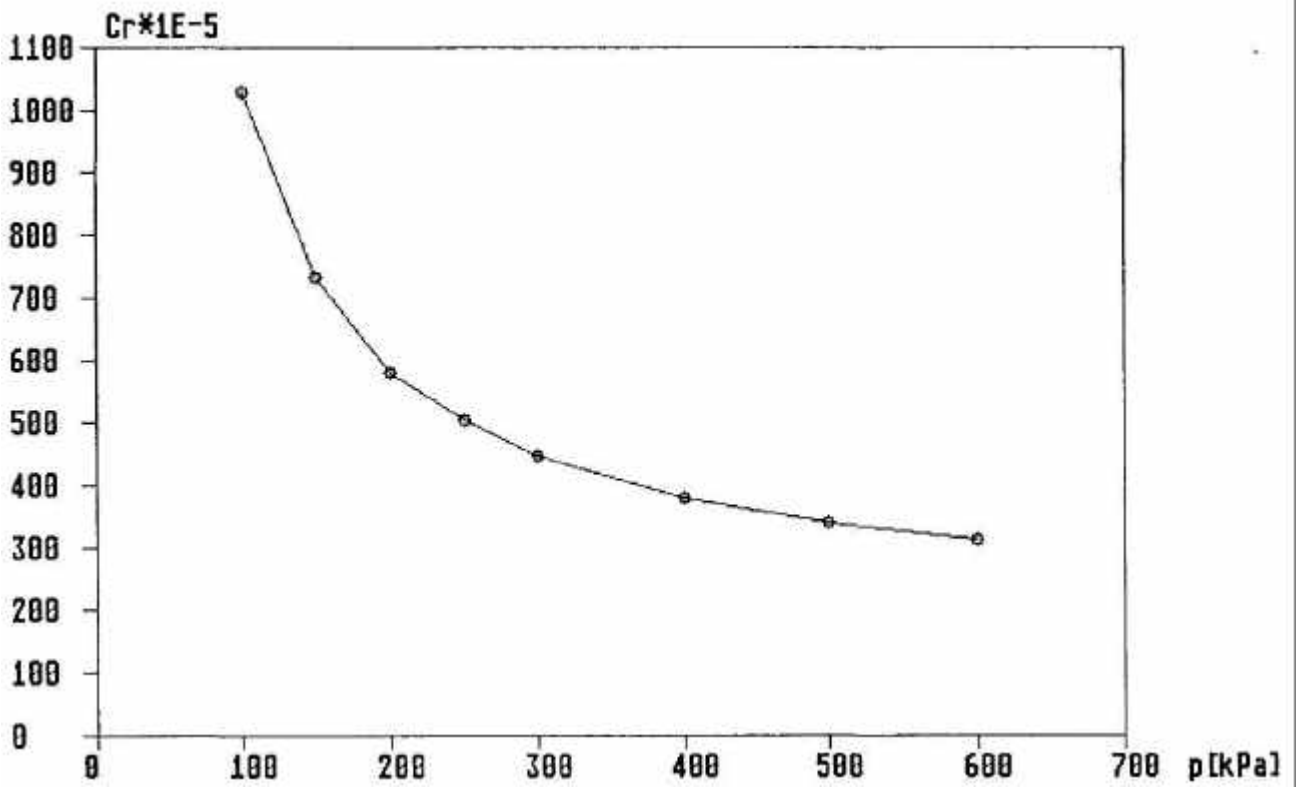


Diagramm 2: Druckabhängigkeit des Rollwiderstandes

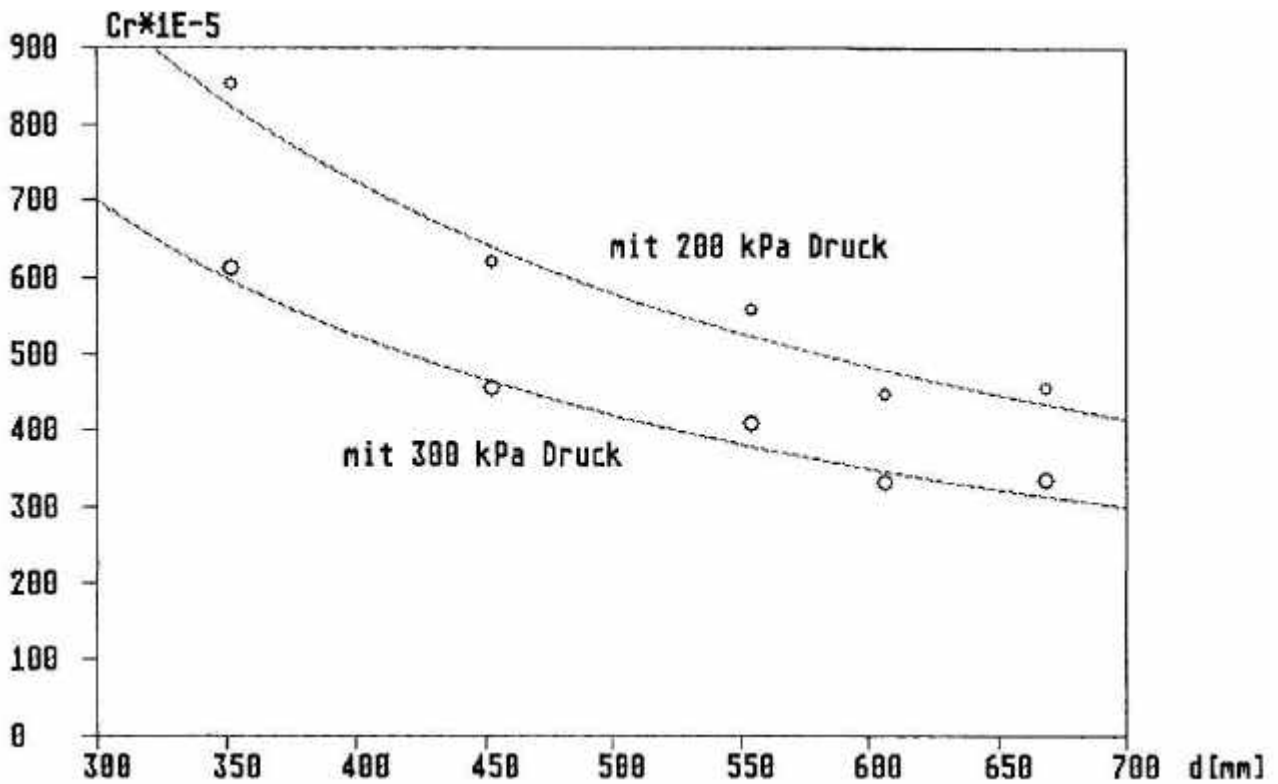


Diagramm 3; Abhängigkeit von Cr von Reifendurchmesser

Technik

über eine gedachte Abrollkante innerhalb der Aufstandsfläche angesehen werden. Je länger die Aufstandsfläche und je kleiner der Raddurchmesser ist, desto größer ist die erforderliche Kraft.

Der Walkwiderstand

Beim Abrollen schiebt der Reifen ständig einen Gummi-Wulst aus der Lauffläche wie einen Bauch vor sich her. Der Reifen wird infolge der Raddrehung durchgewalzt. Durch die Dämpfung des Reifenmaterials wird die Energie der elastischen Verformung nicht vollständig zurückgegeben. Diese Dämpfungsverluste sind proportional zur Einsinktiefe [2].

(In einem theoretischen Beitrag in einer der nächsten Ausgaben werden diese Zusammenhänge genauer erläutert.)

Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt die bisher gemessenen Rollwiderstandsbeiwerte nach der Reifen-Größe geordnet. Von jedem Reifen wurde ein Exemplar gemessen, und die Ergebnisse sind mit dem angegebenen Fehler reproduzierbar. Ob die Ergebnisse jedoch auf alle Reifen des gleichen Typs zutreffen, ist fraglich; die Breite der Produktionsstreuung ist unbekannt, und auch das Alter und der Abnutzungsgrad der Reifen beeinflussen den Rollwiderstand. Fast alle gemessenen Reifen waren neu. Die Auswahl der Reifen ist natürlich weitgehend zufällig und bei weitem nicht vollständig.

Beim Kauf eines Reifens ist es natürlich entscheidend, den Rollwiderstand im Zusammenhang mit anderen, wichtigen Kriterien zu beurteilen, z.B.:

- Pannensicherheit
- Lebensdauer
- Federungseigenschaften
- Fahrdynamik
- Bodenhaftung
- Preis

Im Diagramm 2 sieht man die Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes vom Reifendruck für einen Continental Top Touring 37-622. Bei niedrigen Drücken macht sich eine Druck-

erhöhung viel stärker bemerkbar, als bei hohen Drücken. Schwach aufgepumpte Reifen federn zwar gut, haben aber einen deutlich höheren Rollwiderstand als bei Nenndruck. Bei Hochdruckreifen dagegen ist der Unterschied zwischen z.B. 800 und 900 kPa (8 und 9 bar) nur noch geringfügig-

Für die Abhängigkeit des Rollwiderstandes vom Reifendurchmesser standen uns Schwalbe Standard GW Reifen mit Profil HS 159 zur Verfügung, die alle denselben Aufbau und die gleiche Breite von 47 mm haben. In Diagramm 3 ist zu sehen, daß der Rollwiderstand umgekehrt proportional zum Durchmesser ist.

Bemerkenswert und nicht erwartet ist das Ergebnis, daß - bei ansonsten gleicher Bauart und gleichen Parametern - breite Reifen einen kleineren Rollwiderstand als schmale Reifen haben (Tabelle 1). Dies scheint dem gesunden Menschenverstand zu widersprechen, wird aber bei genauerem Hinsehen klarer: Bei gleichem Druck ist auch die Aufstandsfläche beider Reifen gleich groß. Beim breiten Reifen ist aber die Ellipse kürzer und breiter und damit der Abrollwiderstand geringer. Warum sich im Rennsport schmale Reifen durchgesetzt haben, liegt in erster Linie am besseren Luftwiderstand, der sich bei höheren Geschwindigkeiten bemerkbar macht, und dem geringeren Gewicht. Aus diesen Gründen wurden auch bis vor kurzem gar keine hochwertigen (Hochdruck-) Reifen mit größerer Breite produziert.

Der Rollwiderstand hängt natürlich auch von der Fahrbahnoberfläche ab. Für übliche Radwege aus Betonsteinen oder Asphalt hegen die Werte etwa 20-50% höher, als auf PVC-Boden. Bei sehr weichen Untergründen, wie z.B. Gras oder Sand, sind die Verformungen des Bodens die Hauptursache für den Rollwiderstand, der dann ein Vielfaches der Werte auf PVC beträgt. Dabei kann sich auch die Rangfolge der Reifen untereinander stark ändern, so daß Tabelle 1 für sehr weiche Untergründe keine Aussagekraft besitzt.

Um einen möglichst kleinen Rollwiderstandsbeiwert C_r zu erhalten, sollte ein Reifen also folgende Eigenschaften besitzen:

- gute Elastizität
- kleine Aufstandsfläche
- großer Durchmesser

Für eine kleine Aufstandsfläche braucht man:

- hohe Druckfestigkeit
- große Breite
- hohe Steifigkeit der Reifenwände
- großer Profilpositivanteil

Diese Eigenschaften widersprechen sich zum Teil; so hat ein elastischer Reifen auch eine geringere Steifigkeit [2].

Fazit

Die Meßwerte zeigen, daß die Reifen recht unterschiedliche Rollwiderstände haben und es daher anzunehmen ist, daß noch ein erhebliches Forschungs- und Innovationspotential gibt. Insbesondere die Experimente Rinkowskis mit Gürtelreifen kleinen Durchmessers und großer Breite können Anlaß - vielleicht auch für die Reifenindustrie - sein, sich mit neuen Konstruktionsprinzipien zu befassen, da der Rollwiderstand dieser Reifen trotz der schlechten Produktionsbedingungen fast die Hälfte des von herkömmlichen Diagonalfreifen beträgt.

Thomas Senkel, Uni Oldenburg

Literatur

- [1] Hauschild, A., Senkel, T.: Messung des Rollwiderstandes mit dem ORM; Studienarbeit 1990, Universität Oldenburg
- [2] Gerdes, J., Wieting, P.: Die Abhängigkeit des Rollwiderstandskoeffizienten C_r von Reifenparametern; Studienarbeit 1991, Universität Oldenburg
- [3] Krieger, R.: Die Fahrradbereifung; Pro Velo 24 (1991), S. 20 ff.
- [4] Reimpell, J.: Fahrwerktechnik Räder und Reifen; Vogel Fachbuch, Würzburg 1986
- [5] Rinkowski, R.: Dokumentation zur Herstellung von 27"- Radialschlauchreifen aus Stahlcord, Leipzig 1975