

# Widerstände am rollenden Rad



## 1. Rollwiderstand

Zunächst sollte man klären, welchen Einfluss der Rollwiderstand auf den gesamten (nicht nur auf Laufräder bezogenen) Fahrwiderstand hat:

Als grobe Richtwerte kann man sagen: bei etwa 10 – 15 km/h macht der Rollwiderstand in der Ebene etwa 80% der Widerstände aus, der Luftwiderstand etwa 20%. Die anderen Widerstände sind vernachlässigbar. Bei 40 km/h ist das Verhältnis aber genau umgekehrt, was darauf zurückzuführen ist, dass der Luftwiderstand in 3. Potenz in die zu erbringende Leistung eingeht während der Rollwiderstand einfach korreliert ist. Die Rollleistung von Rennradreifen bewegt sich im Bereich von 20 – 60 Watt, abhängig von Aufbau, Luftdruck und Fahrbahn.

Der Rollwiderstand setzt sich aus zwei Größen zusammen:

- dem Walkwiderstand und
- dem Abrollwiderstand

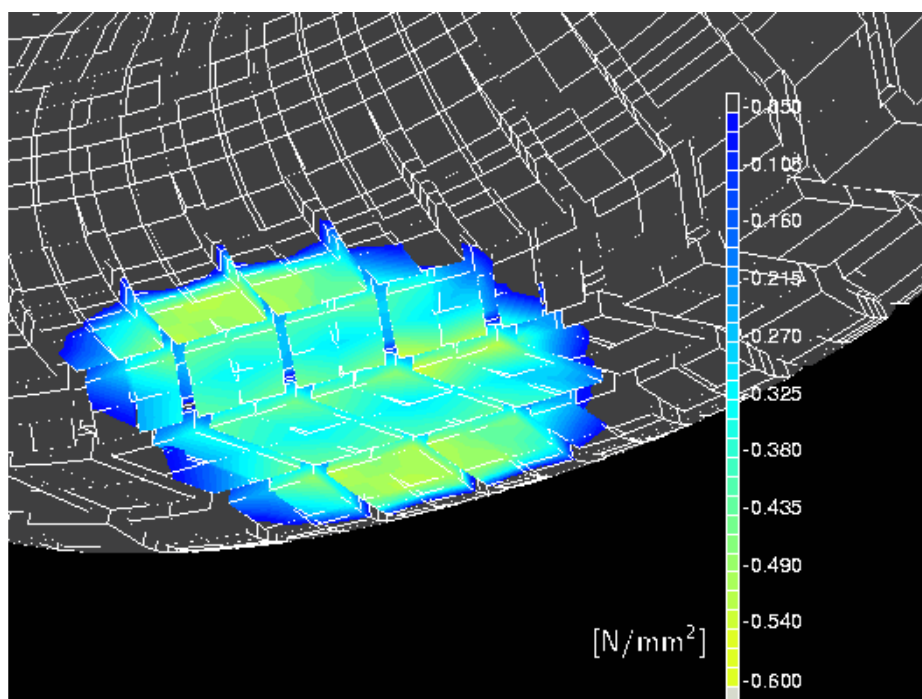
Der Walkwiderstand ergibt sich durch innere Reibung in der Karkasse. Im Bereich der Aufstandsfläche findet eine kontinuierliche Verformung statt, die sich aufgrund der Drehbewegung des Reifens ständig auf und wieder abbaut. Diese innere Reibung ist stark vom Aufbau der Karkasse und vom Grad der Abplattung abhängig.

Der Abrollwiderstand hat den größeren Anteil am Gesamt-Rollwiderstand. Er ergibt sich dadurch, dass sich an der Aufstandsfläche immer ein Wulst bildet, der wie ein Hindernis wirkt, welches überfahren werden muss. Im Gegensatz zum Walkwiderstand lässt sich der Abrollwiderstand mit einfachen mathematischen Modellen grob annähern.

Ein Reifen, der auf Leichtlauf ausgelegt ist, sollte eine elastische Karkasse haben, da so die angesprochene innere Reibung geringer ausfällt als bei steiferen Karkassen. Aus diesem Grund werden auch heute noch Reifen mit Baumwollkarkasse hergestellt, welche sehr elastisch sind. Ebenso werden bei solchen Leichtlaufreifen möglichst wenige Karkassenlagen verbaut und weitestgehend auf Pannenschutz verzichtet. Gerade die Pannenschutzgürtel weisen in der Regel eine geringe Elastizität auf und erhöhen somit den Rollwiderstand.

Die zweite zentrale Einflussgröße ist der Grad der Abplattung, die sowohl auf den Abrollwiderstand (Größe des „Wulstes“) als auch auf den Walkwiderstand (innere Reibung hängt direkt vom Grad der Abplattung ab) Auswirkung hat. Die Abplattung lässt sich durch den Luftdruck und die Reifenaufstandsfläche im unbelasteten Zustand leicht regulieren. Die Aufstandsfläche (im unbelasteten Zustand) resultiert aus dem Reifenumfang (kaum beeinflussbar) und Reifenbreite. Größere Reifenbreite und größerer Abrollumfang reduzieren somit den Rollwiderstand.

Graphische Darstellung der Aufstandsfläche und der lokalen Flächenpressung an einem Autoreifen:



**Widerstände am rollenden Rad - Maxeraser@gmx.de**

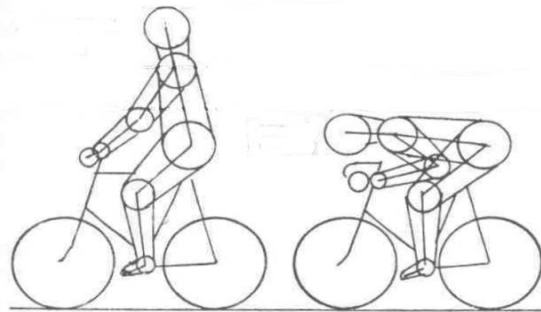
Somit ist klar, dass ein 28 Zoll Reifen immer leichter rollt als ein gleich profilierter, gleichbreiter 26 Zoll Reifen mit dem gleichen Aufbau und demselben Luftdruck, da letzterer ja eine kleinere Aufstandsfläche hat, somit entsteht eine höhere Flächenpressung und somit eine stärkere Abplattung. Ebenso kann man festhalten, dass ein 25mm breiter Reifen bei gleichem Luftdruck, Aufbau und Profil leichter rollt als ein 19mm breiter Reifen! Diese These gilt wohlgedenkt nur bei gleichem Luftdruck!!!

Schnell wird klar, dass neben der Wahl des richtigen Reifens (weiche Karkasse, Dimension, Profil) der Luftdruck die wichtigste Variable ist, mit der sich der Rollwiderstand beeinflussen lässt. So wird schnell klar, dass bei der Wahl der richtigen Reifenbreite unbedingt berücksichtigt werden muss, welcher Luftdruck mit dem betrachteten Reifen gefahren werden kann. Ein Reifen mit geringerem Volumen verträgt immer einen höheren Luftdruck als ein Reifen mit mehr Volumen, sprich mit schmälere Reifen lassen sich höhere Drücke fahren. Aber auch beim Luftdruck gilt **nicht**: mehr ist mehr. Man spricht davon einen „Reifen tot zu pumpen“, wenn man den Reifendruck zu stark erhöht. Was passiert? Bei sehr hohem Luftdruck wird der Reifen sehr unelastisch und hart. Dies führt dazu, dass sich der Rollwiderstand wieder erhöht, da Fahrbahnunebenheiten nicht weggedert werden, sondern als Impulse in Gegenrichtung zur eigentlichen Fahrtrichtung an das Rad weitergegeben werden. So werden die positiven Effekte des geringeren Walkwiderstandes und des geringeren Abrollwiderstandes ab einem gewissen Luftdruck kompensiert.

Wie also kann man den optimalen Luftdruck bestimmen? Zunächst muss man sagen, dass der optimale Luftdruck (immer in Bezug auf den Rollwiderstand, Komfort wird hier außen vor gelassen) immer von Körpergewicht (nehmen wir an dass beim Rennrad das Gewicht höchstens um 5 Kilo schwankt), der Gewichtsverteilung auf Vorder- und Hinterrad sowie auf die Fahrbahnoberfläche ankommt. Eine sehr glatte Fahrbahnoberfläche (z.B. Radbahn) lässt viel höhere Luftdrücke zu als eine raue Fahrbahn, da die genannten Effekte des „Totpumpens“ erst bei höheren Luftdrücken auftreten. Das Fahrergewicht hat direkten Einfluss auf die Abplattung sowie die Größe des Wulstes, der den Abrollwiderstand bestimmt. Ein schwerer Fahrer braucht folglich einen höheren Luftdruck.

**Widerstände am rollenden Rad - Maxeraser@gmx.de**

Die Gewichtsverteilung kann für die Bestimmung des optimalen Luftdrucks wichtig werden, wenn man z.B. die Sitzposition eines Triathleten mit der eines Rennfahrers vergleicht. In der Regel bringt ein Triathlet oder auch Zeitfahrer aufgrund des steileren Sitzwinkels und der gestreckten Sitzposition deutlich mehr Gewicht aufs Vorderrad. Dies sollte beachtet werden!

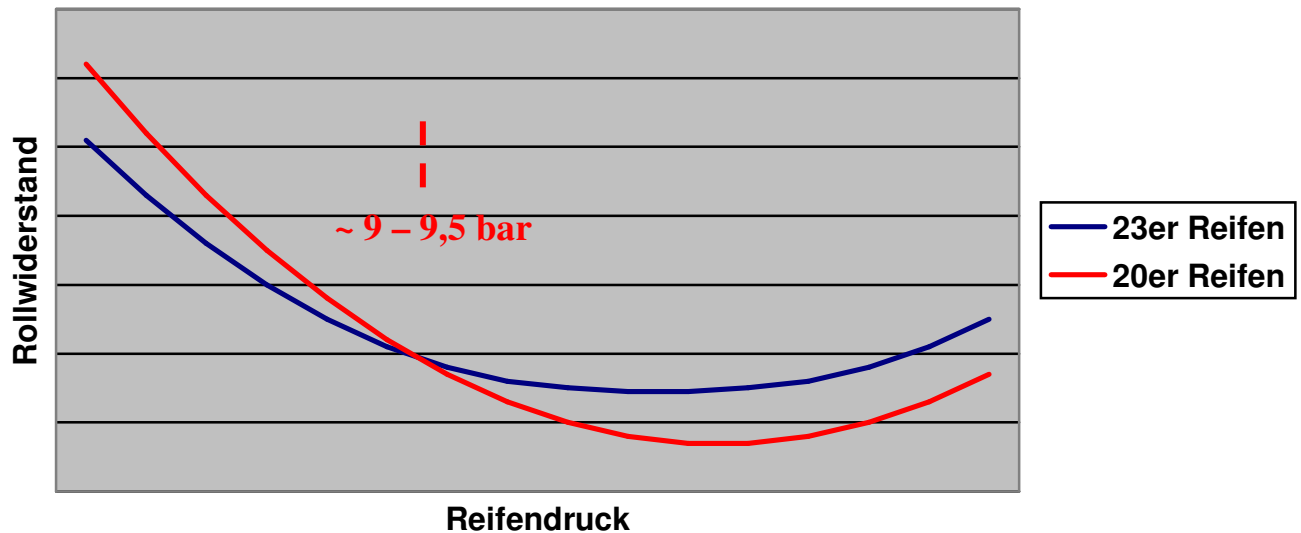


**Gewichtverteilung, z.B.:**      **30%**      **70%**      **40%**      **60%**

Es gibt die Faustformel: Fahrergewicht / 10 = optimaler Luftdruck. Dies ist aber eine nicht unbedingt sinnvolle Näherung. So ist es z.B. fraglich ob ein 55 Kilo Fahrer mit 5,5 bar besser fährt als mit 7 bar. Fahrer mit mittlerem Körpergewicht (etwa 70 bis 80 kg) dürfte diese Faustformel aber durchaus hilfreich sein. Zudem sollte die Fahrbahn beachtet werden. Der beste Luftdruck lässt sich somit nur „erfahren“.

Bei der Wahl der optimalen Reifenbreite sollte vorher in etwa der Luftdruckbereich bestimmt werden, der später gefahren werden soll und in Abhängigkeit davon die Reifenbreite bestimmt werden. So ist klar, dass man immer einen 23er oder sogar 25er Reifen fahren sollte, wenn man in Bereichen bis 8,5 bzw. 8 bar unterwegs sein wird (aufgrund des Gewichtes) und nur auf schmalere Reifen zurückgreifen sollte, wenn man schwerer ist und höhere Drücke fährt.

Zunächst sollte man also feststellen, welches der individuell optimale Luftdruck ist; mit diesem Wert kann man in folgendem qualitativen Diagramm erkennen, welche Reifenbreite vorteilhaft ist.



Die genaue Schnittstelle der Kurven lässt sich nicht genau bestimmen, aber sie dürfte bei etwa 9 – 9,5 bar liegen. Da ein schmaler Reifen bei gleichem Luftdruck mehr einfedert (kleinere Aufstandsfläche -> höhere Flächenpressung) treten die Effekte des „Totpumpens“ erst bei höheren Drücken auf. Daher liegt das Minimum des 20er Reifens weiter rechts als das des 23er Reifens.

Die Profilierung des Reifens hat bei schmalen Rennradreifen keinen wirklichen Sinn. Durch die Profilierung wird die Kontaktfläche mit der Fahrbahn verringert, dies erhöht die Flächenpressung und somit den Rollwiderstand. Ebenso wird durch die Bewegung der Profillamellen eine innere Reibung erzeugt, die sich negativ bemerkbar macht.

Positive Effekte (abgesehen von der Optik) kann man der Profilierung nicht zuordnen, zumal Aquaplaning bei schmalen Rennradreifen erst ab einer Geschwindigkeit von etwa 300km/h auftritt, eine Geschwindigkeit, die nur wenige erreichen.

Der Komfort wurde bei diesen Überlegungen vernachlässigt. Dieser spielt jedoch bei schlechten Fahrbahnoberflächen und längeren Rennen durchaus eine Rolle, da ein zu hartes Fahrwerk bei langen Distanzen zur Ermüdung und Verkrampfung der Muskulatur beiträgt (Stabilisierung, Erschütterungen...)

## 2. Lagerwiderstände

Zahlreiche Tests beweisen: die Lagerwiderstände in den Laufradnaben haben sehr geringe Einflüsse auf den Fahrwiderstand. Im Vergleich zu all den anderen Fahrwiderständen sind die Lagerwiderstände absolut zu vernachlässigen.

**Widerstände am rollenden Rad - Maxeraser@gmx.de**

So wurde z.B. ermittelt, dass eine Swiss Hügi 240 VR-Nabe einen stündlichen Verlust von 107 Ws in Form von Reibung mit sich bringt, eine Dura Ace Nabe 12 Ws. Wenn man davon ausgeht, dass ein Sportler z.B. 300 Watt Leistung auf längere Zeit bringen kann (das sind 1080000 Ws!) so sind diese Größen tatsächlich vernachlässigbar.

Die einfachste Methode um den Lagerwiderstand zu verringern ist es, den Schnellspanner nicht zu stark anzuziehen. Hierdurch lässt sich die Reibung auch bei Naben mit Industrielagern reduzieren.

Da es keine weitere Möglichkeit der Einflussnahme gibt und auch die Hersteller i.d.R. keine Reibwiderstände angeben (können) soll dieses Thema nicht vertieft werden.

### **3. Aerodynamik**

Der Windwiderstand ist quadratisch von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Somit ist in den relevanten Geschwindigkeitsbereichen des Radsports der Wind/Luftwiderstand neben der Steigung der Strecke der entscheidende Widerstand. Er übersteigt den Rollwiderstand um mehrere Dimensionen, die Lagerwiderstände sowieso.

Der Widerstand ergibt sich aus:

$$F_{\text{wind}} = \rho * c_w * A * v^2 * 0,5$$

Wobei  $\rho$  die Luftdichte,  $A$  die Stirnfläche und  $c_w$  der Luftwiderstandsbeiwert ist. Beachten sollte man, dass die Fahrgeschwindigkeit in die Leistung, die zur Überwindung des Luftwiderstandes nötig ist, sogar in 3. Potenz eingeht ( $P = F * v$ )!!! Dies verdeutlicht noch einmal die Bedeutung der Aerodynamik.

Die Stirnfläche wird zu etwa 70% vom Fahrer und dessen Größe und Statur und seiner Sitzposition beeinflusst. 10% entfallen auf die Laufräder und 20% auf den Rahmen und die Komponenten. Beeinflussen lässt sich hiervon nur die Sitzposition.

Der  $c_w$  - Wert lässt sich ebenfalls am besten durch die Sitzposition optimieren. Bei Veränderungen am Material ist klar zu sagen, dass selbst durch Zeitfahrrahmen und aerodynamische Komponenten (Zeitfahr-Kettenblätter, Lenkerendschalthebel...) sich keine so großen Wirkungen erzielen lassen wie an den Laufrädern.

**Widerstände am rollenden Rad - Maxeraser@gmx.de**

Man sollte sich im bewusst machen: Ein rollendes Rad dreht sich naturgemäß an der Außenseite (Abrollumfang) am schnellsten.

Drehgeschwindigkeit des Rades in Abhängigkeit vom Radius:



Dies macht deutlich, dass die Geschwindigkeit der Speichen nach außen hin größer wird und (nahezu – man bedenke die Felgenhöhe) Fahrgeschwindigkeit erreicht.

Da sich das Rad entsprechend der Fahrgeschwindigkeit dreht, beträgt die Relativgeschwindigkeit der Speichen zur Luft an der Oberseite 80km/h !, an der Unterseite 0 km/h.

**Widerstände am rollenden Rad - Maxeraser@gmx.de**



Relativgeschwindigkeit vom Laufrad zur Luft:



So ist die Relativgeschwindigkeit Laufrad-Luft im oberen Bereich doppelt so hoch, wie die Fahrgeschwindigkeit, im unteren Bereich wird die Fahrgeschwindigkeit kompensiert.

Was bedeutet dies für die Praxis?

Bedenkt man, wie der Zusammenhang der Relativgeschwindigkeit und der anfallenden Leistung ist, so wird deutlich, dass die Außenseite des Laufrades die größten Einflüsse auf die Aerodynamik hat. Dies erklärt den Sinn von Hochprofilaufrädern.

Das hohe Profil führt dazu, dass es zu weit weniger Luftverwirbelungen im entscheidenden äußeren Bereich des Laufrades kommt. Scheibenräder perfektionieren dieses Prinzip. Ebenso wichtig ist es, die Felgenform (die Felge sitzt im Bereich der größten Relativgeschwindigkeit) aerodynamisch zu gestalten. Ausgefräste Zwischenräume zwischen den Speichenlöchern (die den Sinn der Gewichtsersparnis haben) reduzieren die Aerodynamik drastisch, da man sich vom Optimalzustand einer Tropfenform mit den Längenverhältnissen von etwa 1:5 (5 mal so lang wie breit) weiter entfernt.

**Widerstände am rollenden Rad - Maxeraser@gmx.de**



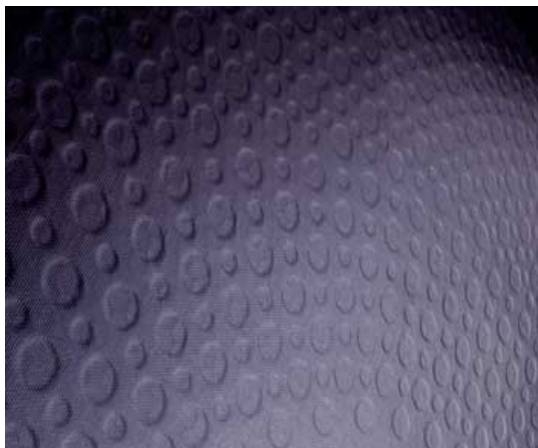
Zudem hat sich gezeigt, dass es günstig ist, wenn die Felgenseitenwand bei Hochprofilrädern nach außen, statt nach innen gewölbt ist. Diese konvexe Wölbung bringt den Felgenquerschnitt der Tropfenform näher.

Darstellung von Luftverwirbelungen bei runden Querschnitten:



Zipp hat zudem die so genannten „Dimples“ eingeführt. Diese bewirken, dass sich ein Luftkissen um die rotierende Felge aufbaut und so die Verwirbelungen reduziert, ähnlich einem rotierenden Ball („angeschnittener Ball“) oder einem Golfball (-> man spricht vom „Golfballeffekt“)

Dimples an einer Zipp 808-Felge:



Ebenso von zentraler Bedeutung ist die Zahl und Form der Speichen. Dass weniger Speichen zu weniger Verwirbelungen und so zu besseren  $c_w$  – Werten führen ist leicht einsichtig.

Ebenso scheint es klar, dass Messerspeichen der Tropfenform mit dem genannten Verhältnis von 1:5 näher sind als runde Speichen. Diese Effekte sollte man nicht unterschätzen. Wichtig hierbei ist jedoch, dass dieses Messerspeichenprofil sich bis in die Felge fortsetzt! Dies sieht man sehr selten, da die meisten Speichen am Ende wieder ein rundes Profil aufweisen, um diese mit dem Speichennippel zu verschrauben. So sind sie im wichtigsten Bereich, dem Außenbereich, wieder rund und es kommt dort zu zahlreichen kleinen Wirbelschleppen.

**Widerstände am rollenden Rad - Maxeraser@gmx.de**

Eine noch größere Rolle spielen die Speichennippel. Außensitzende Speichennippel (die ja einen runden Querschnitt und einen deutlich größeren Durchmesser als die Speichen selbst haben) führen zu starken Verwirbelungen. Besser sind entweder innen sitzende Speichennippel (z.B. Mavic Cosmic Carbon) oder Speichennippel an der Nabe (Shimano WH-R 7801).

Carbonlaufräder mit Druckspeichen, so könnte man die Gruppe „Tri- und 4-Spokes“ umschreiben, weisen in der Regel sehr wenige (nomen est omen: 3 oder 4) Speichen mit starker Tropfenform auf. Das Konzept kann von der Aerodynamik mit Sicherheit an 2. Stelle nach den Scheibenrädern eingeordnet werden, auch wenn einige Hersteller (v.a. Zipp) auf immer höherprofilige Speichenräder setzen.

#### **4. Massenträgheitsmomente**

Massenträgheitsmomente beeinflussen den Widerstand des Laufrades gegen Beschleunigung bzw. Abbremsen an. Ein Rad mit höherem Massenträgheitsmoment ist schwerer zu beschleunigen und erfordert mehr Energie um es abzubremesen. Man sollte daran denken, dass nicht das Gewicht, sondern vor allem die Verteilung des Gewichtes für das Beschleunigungsverhalten ausschlaggebend ist. Die zur Beschleunigung des Laufrades nötige Energie  $E_{\text{rot}}$  ergibt sich aus:

$$E_{\text{rot}} = 0,5 * \Theta * \omega^2$$

mit  $\omega$  = Winkelgeschwindigkeit  
 $\Theta$  = Massenträgheitsmoment

Das Massenträgheitsmoment ergibt sich aus:

$$\Theta = \int r^2 dm$$

Das Flächenträgheitsmoment kann auch leicht über einen Pendelversuch ermittelt, auf welchen hier nicht näher eingegangen werden soll. Dieser ist immer dann sinnvoll, wenn eine mathematische Beschreibung des Felgenprofils zu aufwändig ist.

**Widerstände am rollenden Rad - Maxeraser@gmx.de**

Für die Praxis ist jedoch nur das Verständnis wichtig, wie sich das Massenträgheitsmoment zusammensetzt. So kann man schnell verstehen, dass eine Gewichtseinsparung an der Felge ungleich höheren Einfluss auf das Massenträgheitsmoment und somit die Spritzigkeit, also die Beschleunigungsfreudigkeit des Laufrades hat.

Die Massenträgheitsmomente von aktuellen Laufrädern bewegen sich alle im Bereich von etwa 0,1 kgm<sup>2</sup> bis 0,3 kgm<sup>2</sup>. Mit der oben genannten Formel kann man leicht ausrechnen, welche Energie für einen beliebigen Beschleunigungsvorgang notwendig ist. Man wird sehen: diese Werte sind minimal.

Bekanntlich gilt:  $v = \omega * r$

Somit gilt:  $E_{\text{rot}} = 0,5 * \Theta * v^2/r^2$

So ergibt sich von einem Beschleunigungsvorgang von 25 km/h auf 35 km/h in angenommenen 5 Sekunden; die Masse des Reifens sei hier 0 (in der Realität im Bereich von 0,1 kgm<sup>2</sup> bis 0,15kgm<sup>2</sup>) und die Karkassenhöhe 15 mm:

a) für ein Laufrad mit 0,1 kgm<sup>2</sup> Massenträgheit:

$$\Delta E_{\text{rot}} = 0,5 * 0,1 * [((9,72 \text{ m}^2/\text{s}^2) - (6,94 \text{ m}^2/\text{s}^2)) / (0,308 + 0,015 \text{ m})]^2 \text{ m}^2$$

$$= 3,70 \text{ Ws !}$$

$$\Rightarrow P = 0,74 \text{ W}$$

b) für ein Laufrad mit 0,3 kgm<sup>2</sup> Massenträgheit:

$$\Delta E_{\text{rot}} = 0,5 * 0,3 * [((9,72 \text{ m}^2/\text{s}^2) - (6,94 \text{ m}^2/\text{s}^2)) / (0,308 + 0,015 \text{ m})]^2 \text{ m}^2$$

$$= 11,11 \text{ Ws !}$$

$$\Rightarrow P = 2,22 \text{ W}$$

Dies zeigt, dass es sich hier theoretisch um vernachlässigbar kleine Werte handelt! Diese haben nur dann Einfluss, wenn sehr häufig beschleunigt werden muss und Geschwindigkeit weggenommen (durch Bremsvorgänge!) werden muss. So können sich durch aufintegrieren über die Zeit dennoch größere Werte zusammenkommen.

**Widerstände am rollenden Rad - Maxeraser@gmx.de**

Das Thema der Leistungseinsparung durch Massenträgheitsmoment-Reduktion wird oft diskutiert. Die einen behaupten, die empfundene höhere Spritzigkeit lässt sich lediglich auf die geringere Richtungsstabilität von Laufrädern mit geringem Massenträgheitsmoment zurückführen, die anderen behaupten, in der Tat mit leichteren Laufrädern schneller beschleunigen zu können.

Die theoretische Berechnung spricht jedenfalls ganz klar dafür, dass das Massenträgheitsmoment nur geringe Einflüsse hat und dass lediglich über eine längere Zeit und bei häufigen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen Energie gespart werden kann. Festhalten lässt dennoch: mit einem Laufrad mit geringem Massenträgheitsmoment hat man theoretisch Vorteile. Inwiefern diese Vorteile für die Praxis relevant sind, sollte man vielleicht nicht allein von einem einfachen Rechenexempel wie dem obigen abhängig machen und soll an dieser Stelle nicht abschließend bewertet werden.