https://padlet.net/libraries/pdfjs-2108032255/web/viewer.html?f...5584ab9bda51beedf2a1e2ac53d1%252F2022_DE_Poster_Reifendruck.pdf

PDF.js viewer

SWISS CYCLING

No single adjustment affect comfort, handling and confidence as much as tire pressure!

EHSM
Eidgenössische Hochschule für Sport Magglingen

Einleitung

Beim Radfahren kämpfen wir mit unserer Leistung gegen verschiedene Widerstände an, um Geschwindigkeit zu erzeugen. Die **Geschwindigkeitsgleichung** veranschaulicht diese Tatsache:

$$\boldsymbol{Geschwindigkeit}\ (v) = \frac{Leistung\ (P)}{Widerstände\ (F)}$$

$$= \frac{(Aerobe\ Leistungsproduktion + Anaerobe\ Leistungsproduktion) \times Effizienz}{Luftwiderstand\ (F_{air}) + Rollwiderstand\ (F_{roll}) + Steigungswiderstand\ (F_{slope}) + Trägheitsmoment}$$

Die vorherrschenden Widerstände sind Sportart- und situationsabhängig. Während auf der Strasse vor allem der Steigungs- und Luftwiderstand dominieren, sind es im MTB der Steigungs- und Rollwiderstand. Seit einiger Zeit ist festzustellen, dass nicht nur im MTB, sondern auch im Strassenradsport vermehrt der **Rollwiderstand** in den Fokus der Optimierung rückt. Dies nicht ohne Grund, denn der Rollwiderstand betrifft alle Fahrradfahrenden von der XCO Athletin bis zum Tourenfahrer. Die Einflussfaktoren, welche den Rollwiderstand modellieren, beeinflussen nicht nur **Geschwindigkeit** und **Grip**, sondern auch **Komfort** und sind daher auch im Hobbybereich von grösster Relevanz.

Seitdem der Rollwiderstand vermehrt in den Fokus gerückt ist, kann es für eine Athletin zur Herausforderung werden, die richtige Material- und Reifendruckwahl zu treffen, da das Angebot an verschiedenen Reifentypen, Reifen- und Felgenbreiten ein unüberschaubares Ausmass angenommen haben. Die folgenden Ausführungen sollen helfen, Ordnung ins «Chaos» zu bringen.

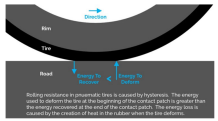
Physik des Rollwiderstandes

Während der Reifen über einen beliebigen Untergrund rollt, erfährt dieser Rollwiderstand, was dessen Vorwärtsbewegung beeinträchtigt. Der Rollwiderstand hängt vom **Systemgewicht** (Athletin + Bike + Equipment), von der **Erdbeschleunigung** und von einem dimensionslosen **Rollwiderstandskoeffizient** ab, der die Wechselwirkung zwischen Reifen und Untergrund beschreibt.

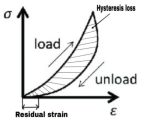
$$F_{roll} = m_{sys}[kg] * g\left[\frac{m}{s^2}\right] * Cr[\,] * cos(\alpha)$$

Im Radsport werden seit jeher pneumatischen Reifen verwendet, welche die Fähigkeit besitzen Unebenheiten zu absorbieren. Rollt der Reifen über eine Unebenheit so deformiert sich der Reifen. Bei dieser **Deformation des Reifenmaterials** wird mehr Energie freigesetzt als zurückgewonnen, wenn sich der Reifen wieder vom Untergrund löst. Diesen Vorgang des Energieverlusts wird als **Hysterese** bezeichnet und führt dazu, dass Wärme und Geräusche freigesetzt werden (Abbildung A und B).

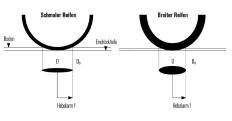
Die Fläche, auf welcher der Reifen auf dem Untergrund aufliegt, wird **Reifenaufstandsfläche** genannt. Eine längere Aufstandsfläche führt zu einer Zunahme der Hysterese und einem **längeren Hebelarm**, was mehr Kraft benötigt, um diese vom Boden zu lösen (Abbildung C).



A. Rollwiderstand verursacht durch Hysterese. (flocycling.com)



B. Energieverlust durch Hysterese aufgrund der Materialverformung. (suspensionsguy.com, 2021)

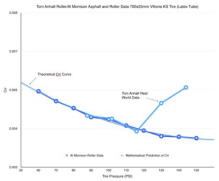


C. Einfluss der Reifenbreite auf die Reifenaufstandsfläche D und die Länge des Hebelarms f. (BIKE Magazin, 2013)

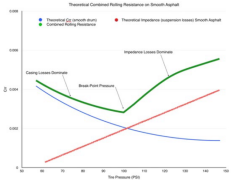
Sobald der zu befahrende Untergrund Unebenheiten aufweist (immer, auch auf der Bahn), kommt es zu Auf- und Abwärtsbewegungen über Unebenheiten, insbesondere bei hartgepumpten Reifen. Das Ziel jedes Athleten ist, dass seine Leistung in einer Vorwärtsbewegung resultiert, daher ist jede **Auf- und Abwärtsbewegung (Vibrationen)** über Unebenheiten einem Energieverlust gleichzusetzen ist, der uns verlangsamt. Diese «Verlustkomponente» wird als **Impedanz** bezeichnet. Nimmt die Impedanz zu, hat der Reifen weniger Bodenkontakt und daher **nimmt** auch der **Grip ab**.

Die früher Vorherrschende Meinung, besonders auf der Strasse, hoher Reifendruck reduziert den Rollwiderstand gründet in Labortests, bei denen der Widerstand des Reifens auf einer glatten Rolle gemessen wurde. Bei diesen sogenannten **«Drum-Tests»** wird das bereifte Rad isoliert betrachtet, daher wurden auch nur die **Widerstandskomponenten Hysteresis** und **Reifenaufstandsfläche** gemessen. Durch die Erhöhung des Reifendrucks nimmt die Verformung des Reifens ab (Hysteresis wird kleiner) und die Aufstandsfläche wird kleiner und daher auch kürzer, sprich der Rollwiderstand nimmt kontinuierlich ab mit steigendem Reifendruck (dunkelblaue Kurve in Abbildung D).

Da nie vollkommen glatte Untergründe befahren werden und sich über dem Rad noch ein Rahmen und eine Person befinden, haben diese Tests sehr wenig mit der Realität zu tun. **Reifentests im Feld** zeigen daher ein anderes Verhalten. Bei tiefem Luftdruck ist die Verformung des Reifens augenscheinlich. Die Verformung des Reifens bringt den Vorteil mit sich, dass kleine Unebenheiten durch den Reifen absorbiert werden, ohne dass das System Vibrationen ausgesetzt wird. Folglich ist die Hysterese hoch, aber die Impedanz ist gering. Wird der Reifendruck erhöht, nimmt die Hysterese ab, da sich der Reifen weniger verformt, gleichzeitig nimmt die Impedanz zu, da vermehrt der Reifen nicht im Stande ist die Unebenheiten zu absorbieren und das System vermehrt Vibrationen ausgesetzt wird (hellblaue Kurve in Abbildung D). Abbildung E verdeutlicht diese Tatsache: Bei **niedrigem Reifendruck dominiert die Hysterese** den Rollwiderstand, während bei **hohem Reifendruck die Impedanz** den Rollwiderstand dominiert. Abbildung E zeigt auch den **optimalen Reifendruck** am so genannten **«Breaking Point»**, an dem sich die Hysterese- und die Impedanz Kurve schneiden.



D. Einfluss des Reifendrucks auf den Rollwiderstand gemessen im Labor (nur Hysterese, dunkelblau) und im Feld (Hysterese und Impedanz, hellblau). *(silca.com, 2021)*



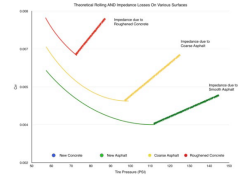
E. Widerstandskomponenten des Rollwiderstands einzeln (Hysterese (blau), Impedanz (rot)) und kombiniert dargestellt (grün). *(silca.com, 2021)*

Einflussfaktoren auf Rollwiderstand und Reifendruck

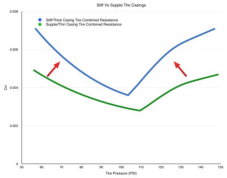
Systemgewicht: Das Systemgewicht hat einen entscheidenden Einfluss auf den Reifendruck. Es ist unschwer vorzustellen, dass eine 50kg Athletin nicht den gleichen Reifendruck fährt wie ein 85kg Athlet. Erhöht sich das Systemgewicht, muss auch der Reifendruck erhöht werden. Dies geschieht in einem **linearen Verhältnis.** Das Systemgewicht ist in den wenigsten Fällen 50 – 50 % auf Vorder- und Hinterrad verteilt. Auch diesem Sachverhalt der **Gewichtsverteilung** sollte Rechnung getragen werden. Während auf dem Zeitfahrvelo die Verteilung ca. 50 – 50 beträgt, liegt beim Rennrad die Verteilung ca. bei 45 – 55 und beim MTB bei 40 – 60.

Untergrund: Der Untergrund hat einen entscheidenden Einfluss auf die Material- und Reifendruckwahl. Daher wird im MTB und auf der Strasse unterschiedliches Material und Reifendrücke verwendet. **Rauerer Untergrund** führt dazu, dass die Impedanz Kurve steiler wird, der Rollwiderstand zunimmt und daher der optimale Reifendruck **(Breaking Point) nach links verschoben** wird (Abbildung F). Bei Nässe die Sportler*innen mehr Grip. Durch eine leichte Senkung des Reifendrucks wird die Impedanz verringert und der Grip benötigenerhöht.

Reifentyp und -beschaffenheit: Derzeit haben die Athleten die Wahl zwischen Collé-, Draht- und Tubeless-Reifen. Diese unterscheiden sich in der Montage und ihren Eigenschaften, die den Rollwiderstand beeinflussen. Collé- und Drahtreifen sind in der Regel geschmeidiger, was sich in der Anzahl der TPI (Threads Per Inch) widerspiegelt, wobei der Reifen mit zunehmender TPI-Anzahl geschmeidiger wird. Es ist unschwer herzuleiten, dass sich eine **geschmeidigere Reifenkarkasse** besser an den Untergrund anschmiegt und dabei die Hysteresis, wie auch die Impedanz (Vibrationen) verringert. Das gleiche gilt für die Wahl des Schlauchs, wobei ein Latex Schlauch eine höhere Geschmeidigkeit gegenüber einem herkömmlichen Butyl Schlauch aufweist. Geschmeidigere Reifen können daher mit **leicht höherem Reifendruck** gefahren werden (Abbildung G). Tubeless Reifen sind weniger geschmeidig, haben aber den Vorteil, dass diese keinen Schlauch aufweisen. Dies erlaubt die **Tubeless-Reifen** mit **tieferem Luftdruck** zu fahren, da die Gefahr eines Durchschlags nicht gegeben ist. Daher ist die Wahl eines Tubeless-Reifens vor allem auf rauem Untergrund sinnvoll, wobei durch den geringeren Reifendruck die **Impedanz reduziert** werden kann und **Grip und Komfort erhöht** werden. Eine **Reifendurchschlagschutz** (Reifen Nudel) erlaubt es den Reifendruck weiter zu senken. Es ist jedoch zu beachten, dass der Reifendurchschlagschutz die Geschmeidigkeit verringert. Wird auf eine Reifendruck-Reduktion verzichtet, führt die Reifen Nudel zu einem Nachteil, sprich zu einem höheren Rollwiderstand.

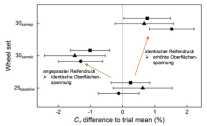


F. Einfluss des Untergrunds auf Hysterese und Impedanz und den resultierenden Breaking Point. *(silca.com, 2021)*

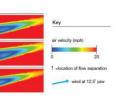


G. Einfluss der Reifenbeschaffenheit auf Hysterese und Impedanz und den resultierenden Breaking Point. *(silca.com, 2021)*

Reifenbreite: Reifen werden in verschiedenen Breiten produziert. Ein breiter Reifen gewinnt nicht nur an Breite, sondern auch an Höhe, was die **Pannensicherheit erhöht**. Aber ein gegebener Reifen kann auch nur durch eine **breitere Felge** breiter «modelliert» werden. Dabei nimmt dieser nur in der Breite zu, aber nicht in der Höhe. Breitere Reifen, die mit demselben Reifendruck aufgepumpt werden, haben eine höhere Steifigkeit und damit weniger Komfort als schmalere Reifen. Dies ist auf den Effekt der **Oberflächenspannung** zurückzuführen. Im Wesentlichen führt der gleiche Druck, der auf mehr Fläche wirkt, zu einer höheren Oberflächenspannung. Folgerichtig müssen **breitere Reifen mit weniger Luftdruck** gefahren werden, um die gleichen Abrolleigenschaften über die meisten Untergründe zu erreichen. Daher erlaubt ein breiterer Reifen den Reifendruck zu senken, bei gleichbleibender Oberflächenspannung und fast gleichbleibender Reifenaufstandsfläche (Abbildung H). Speziell im Offroad Bereich kann ein breiterer Reifen den Rollwiderstand senken, da ein breiterer Reifen den **Hebelarm der Aufstandsfläche verkürzt** (Abbildung C) und der reduzierter Reifendruck die **Impedanz senkt**.
Wie erwähnt, besteht eine Abhängigkeit zwischen Reifenbreite und dem optimalen Reifendruck. Um diesen Druck optimal abzustimmen, reicht es nicht aus, dass Herstellerangeben herangezogen werden. Im Idealfall wird mit einer **Schieblehre** die Reifenbreite gemessen, da diese auch von der Felge beeinflusst wird.
Die oben erwähnten Kenntnisse gelten auch für den Strassenradsport. Des Weiteren hat die Reifenbreite einen Einfluss auf den **Luftwiderstand**. Daher sollte im Strassenradsport die Reifenbreite auf die Felgenbreite abgestimmt werden. Die Firma Silca hat sich eingehend mit diesem Thema befasst (Abbildung I).



H. Einfluss der Felgenbreite (25mm, 30mm), Luftdruck und Oberflächenspannung auf den Rollwiderstand. *(Maier et al. 2019)*



I. Einfluss der Felgen- und Reifenbreite auf die Aerodynamik bei leichtem Seitenwind. *(silca.com, 2021)*

Reifen- / Felgenbreite / Aerodynamik

Komfort: Wenn es um den Komfort eines Fahrrads geht, wirkt jedes Element eines Fahrrads wie eine Feder, welche als Reihenschaltung funktionieren. Jede Feder weisst eine Federkonstante (Steifigkeit) auf. Um die globale Federkonstante der **Reihschaltung von Federn** zu bestimmen, werden diese wie folgt addiert:

$$\frac{1}{Kframe} + \frac{1}{Kwheel} + \frac{1}{Ktire} = \frac{1}{Ktotal} \rightarrow \frac{1}{170N/mm} + \frac{1}{2000N/mm} + \frac{1}{40N/mm} = \frac{1}{Ktotal} \rightarrow \boldsymbol{Ktotal = 32N/mm}$$

Aus dieser Formel ist unschwer zu erkennen, dass die **weichste Feder mit der kleinsten Federkonstante das System massgebend dominiert**. Die Formel verdeutlicht außerdem, dass der **Reifen die weichste Federung** aufweist und somit die dominierende Feder im System ist, wenn es darum geht, Unebenheiten und raue Oberflächen zu überwinden.
Silca konnte aufzeigen, dass es signifikante Unterschiede in der vertikalen Steifigkeit zwischen verschiedenen Rennrädern gibt. Diese Differenz konnte mit einem leicht breiteren Reifen und einer entsprechenden Reifendruck-Reduktion (ca. 1 Bar) überkompensiert werden.

Zum Thema Komfort sollte das folgende Zitat immer im Hinterkopf behalten werden:
«No single adjustment to a bicycle will affect comfort, handling and confidence as much as tire pressure.»

Praktische Tipps

Die Wahl des Reifens sollte immer an die **vorherrschenden Bedingungen** angepasst werden. Auf der **Strasse** bei relativ «glatter» Oberfläche ist der aerodynamische Nutzen nicht zu vernachlässigen, und darüber hinaus steht die Minimierung der **Hysteresis** im Vordergrund. Auf einem XCO Kurs oder einem Strassenrennen wie Paris Roubaix, sollte die Reifenwahl auf die Optimierung der Impedanz-Verluste abzielen. Ein breiterer Reifen bringt neben einem tieferen Rollwiderstand auch den Vorteil einer höheren Pannensicherheit.
Um den **optimalen Reifendruck** zu ermitteln, ist es notwendig, mittels **"Trial and Error"** Verfahren den optimalen Reifendruck zu ermitteln. Um einen guten Ausgangspunkt zu schaffen, sollten Hilfsmittel in Anspruch genommen werden. Swiss Cycling empfiehlt speziell im **Nachwuchs** mit der folgenden Formel den Reifendruck für **Strassenreifen** zu bestimmen:

$$\boldsymbol{Reifendruck[bar]} = \frac{m_{body}[kg]}{20} + 1$$

Ein weiteres Hilfsmittel sind **Reifendruck-Applikationen**, wie **«SRAM AXS Tire Pressure Guide»** und **«SILCA Pro Tire Pressure Calculator»**. Ist der Ausgangspunkt definiert, soll dieser im Training getestet werden und u.U. auch protokolliert werden. Der Ausgangspunkt wird höchstwahrscheinlich noch nicht dem Optimum entsprechen. Daher sollte **in kleinen Schritten der Reifendruck angepasst** werden. Aus dem Hysterese-Impedanz-Diagramm lässt sich ableiten, dass der Reifendruck eher gesenkt werden sollte, da die Hysteresekurve weniger steil ist als die Impedanz Kurve. Daher die Empfehlung von Silca, die auf umfangreiche Testerfahrungen zurückgreifen kann, **einen zu niedrigen Reifendruck einem zu hohen Reifendruck vorzuziehen** (Abbildung J).

	Wattage		
Road Surface	-10psi	BreakPoint	+10psi
New Asphalt	44	43	52
Coarse Asphalt	49	48	54
Rough Milled Concrete	NA	62	65

J. Besser ein bisschen unter dem Breaking Point anstatt darüber. *(silca.com, 2022)*

SRAM AXS Tire Pressure Guide

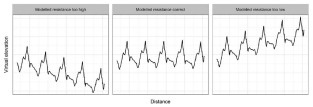
SILCA Pro Tire Pressure Calculator

Feldtests

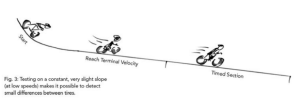
Für alle, die es genauer wissen wollen und sich nicht ausschliesslich aufs Fahrgefühl verlassen wollen, sind Reifentests zu empfehlen. Im Bereich der Reifentests gibt es verschiedene Testmethoden. Wie einleitend erfahren machen Labortests auf einer Rolle keinen Sinn, da sie nur eine Komponente des Rollwiderstands quantifizieren. Um ein valides Resultat zu erhalten, sollten **Feldtests** durchgeführt werden, welche bestmöglich die **vorzufindenden Wettkampfbedingen** widerspiegeln. Bei allen Testmethoden ist es von grösster Wichtigkeit, dass alle anderen Variablen fixiert werden. Dies bedeutet, dass die Testperson immer die gleiche Linie wählt, die identische Position auf dem Fahrrad einnimmt und wenn möglich die identische Übersetzung fährt. Des Weiteren sollte in allen Methoden darauf geachtet werden, dass die Bremsen nicht betätigt werden müssen.

Virtual Elevation: Wenn es zu Feldtests kommt, dann ist die «Virtual Elevation» Methode der **Goldstandard**. In den letzten Jahren hat Swiss Cycling in Zusammenarbeit mit der EHSM hunderte von Reifentests mit dieser Methode durchgeführt. Dabei sind auch mehrere wissenschaftliche Publikationen entstanden. Diese Methode benötigt **viel Hintergrundwissen** und eine Menge an Equipment wie einen **Powermeter**, sodass valide Resultate erhoben werden können. Dank der Open Source Applikation **Golden Cheetah** haben alle Interessierten die Möglichkeit die Messungen unkompliziert auszuwerten (Abbildung K).

Coast Down: Eine weitere Möglichkeit sind sogenannte Coast Down Tests. Dafür wird ein **abfallendes Segment** benötigt, welches initial steiler ist, sodass die Testperson die nötige Geschwindigkeit ohne Treten erreicht, um dann ins **Zeit-gestoppte Segment einzufahren** (Abbildung L). Es ist darauf zu achten, dass die Segmentgeschwindigkeit nicht zu hoch ist, da sonst der Luftwiderstand zum dominierenden Widerstand wird. Anstatt der Zeit kann auch die Distanz ermittelt werden, bis die Testperson zum Stillstand kommt.

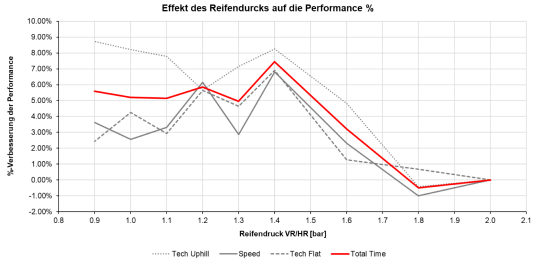


K. Auswertung der Virtual Elevation Methode, wo der Rollwiderstand zu hoch (links), richtig (Mitte) und zu tief (rechts) gewählt wurde. *(Maier et al. 2017)*



L. Testaufbau eines Coast Down Tests, mit einem steilen Start Segment, einem leicht abfallenden Beschleunigungssegment und einem Zeit-gestoppten Segment. *(renehersecycles.com, 2021)*

Zeit/Geschwindigkeit: Die rudimentärste Testmethode ist die **einfache Zeitmessung**. Dabei wird ein kurzer Kurs definiert, welcher befahren wird. Dabei wird die Zeit gemessen (Abbildung M). Falls die Testperson mit einem Powermeter ausgestattet ist, kann zudem noch die **aufgewendete Energie** errechnet werden. Insbesondere wenn nur die Zeitmessung verwendet wird, ist es wichtig, dass die Testperson die Strecke immer mit der gleichen Intensität absolviert. Hier kann die **RPE-Skala** zur Standardisierung der Tests beitragen.



M. Testauswertung eines einfachen Reifendruckexperiments, bei dem die Zeit als prozentuale Verbesserung bezogen auf den maximalen Reifendruck gegen den Reifendruck aufgetragen wurde. *(Swiss Cycling, 2022)*