

## Wirkungsgrad von Fahrradantrieben

FB TECHNIK  
Prof. Dr.-Ing. Hubert Hinzen  
Christian Petry, B. Eng.

### 1. Einführung in die Problematik

Unabhängig davon, ob das Fahrrad als Fortbewegungsmittel oder als Sportgerät benutzt wird, ist man stets bemüht, die naturgemäß begrenzte Muskelleistung des Radfahrers möglichst vollständig für den Antrieb des Fahrrades nutzbar zu machen. Für die heute übliche, optimierte Konstruktion des Fahrrades als zweirädriges, einspuriges Fahrzeug hat der Antrieb grundsätzlich zwei Aufgaben zu erfüllen:

- Die Leistung des Radfahrers als „Motor“ muss von der Tretkurbel auf das Hinterrad übertragen werden.
- Die Leistung in ihren Komponenten Moment und Winkelgeschwindigkeit soll durch ein Getriebe so gewandelt werden, dass die Leistungsfähigkeit des Radfahrers möglichst effektiv zum Antrieb des Fahrrades ausgenutzt wird. In aller Regel soll dieses Getriebe auch während der Fahrt schaltbar sein, um diese Optimierung sowohl bei sich ändernder

Leistungsbereitschaft als auch bei sich ändernden Fahrwiderständen vornehmen zu können.

Die heute weit verbreitete Kettenschaltung vereinigt beide Funktionen in einer Konstruktion, aber grundsätzlich kann die Leistungsübertragung in Form einer Kette oder neuerdings auch eines Zahnriemens mit einem hintereinander geschalteten separaten Getriebe kombiniert werden, welches in aller Regel in der Hinterradnabe angeordnet wird (Nabenschaltung).

Der Wirkungsgrad setzt die Leistung an der Tretkurbel zu 1 oder 100 % und gibt an, wie viel von dieser Leistung tatsächlich am Hinterrad genutzt werden kann. Der Wirkungsgrad ist stets kleiner als 1 bzw. 100 %, weil auf Grund von unvermeidbarer Reibung Leistung verloren geht. Durch optimierte Konstruktion und Wartung (z. B. Schmierung) wird versucht, diese Reibungsverluste möglichst gering und den Wirkungsgrad so hoch wie möglich zu halten.

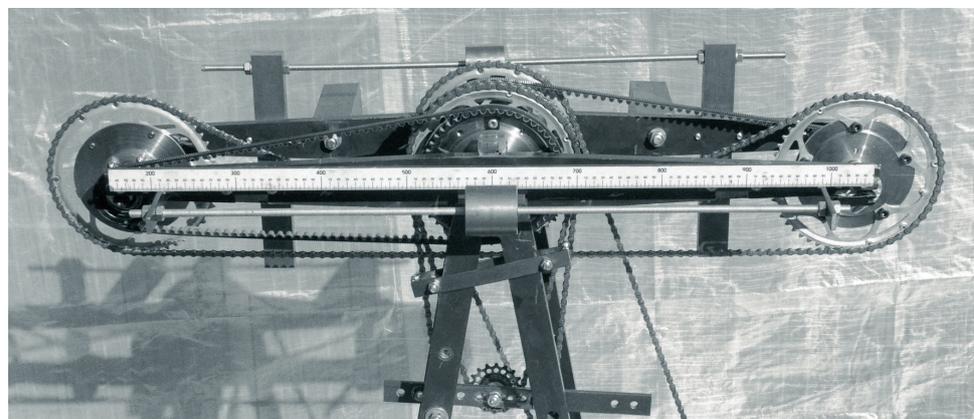


Abb. 1: Prüfstand zur Wirkungsgradmessung von Fahrradantrieben

Während für die Kettenschaltung der Gesamtwirkungsgrad angegeben wird, muss bei einer Nabenschaltung differenziert werden: Die Antriebsleistung an der Tretkurbel wird zunächst bei der Übertragung auf das Hinterrad durch den Kettentrieb oder den Zahnriemen mit dessen Wirkungsgrad reduziert. Die Abtriebsleistung des Kettentriebes bzw. Riementriebes ist ihrerseits dann wiederum Antriebsleistung für die Getriebeabtriebsleistung, deren Abtriebsleistung schließlich am Hinterrad genutzt werden kann. Aus diesem Grunde sind die beiden Wirkungsgrade als Absolutzahl (nicht als Prozentwert) miteinander zu multiplizieren, was zunächst einmal einen scheinbaren Nachteil bedeutet.

Die letztjährige Ausgabe des Hochschulreports stellte eine Prüftechnik vor, mit der diese Wirkungsgrade auf das Promille genau erfasst werden können. Abb. 1 zeigt die Verspannungseinheit und Belastungswaage des Prüfstandes in der Ausstattung zur Untersuchung des Zahnriemens. Der nunmehr vorliegende Bericht versucht, die damit gewonnenen Ergebnisse beispielhaft zu dokumentieren und mit dem Ziel aufzubereiten, daraus einige allgemeingültige Aussagen abzuleiten.

## 2. Wirkungsgrad der Fahrradkette

Die vielleicht wichtigste diesbezügliche Frage betrifft den Wirkungsgrad der Fahrradkette, der von einer Vielzahl von Parametern abhängt. Abb. 2 versucht, für eine handelsübliche Fahrradkette die wichtigsten Einflüsse darzustellen, wobei ein weiterer Begriff hilfreich ist: Die Differenz zwischen dem Wirkungsgrad und dessen Idealfall von 100 % stellen die im System auftretenden Verluste dar und wird hier als „Verlustgrad“ bezeichnet.

- Auf dem geradlinigen Abschnitt ihrer Bewegung tritt in der Kette keinerlei Reibung auf und der Wirkungsgrad wäre 100 %. Da sie aber bei Auflaufen auf das Ritzel oder das Kettenblatt „in die Kurve geht“, werden zwei benachbarte Kettenglieder relativ zueinander bewegt, was Reibung hervorruft und den Wirkungsgrad reduziert. Dieser Effekt wird um so intensiver, je kleiner das Ritzel bzw. dessen Zähnezahl ist. Sämtliche Kurvenzüge in Abb. 2 sinken also mit kleiner werdender Zähnezahl ab. Ausgerechnet das für schnelle (Bergab-) Fahrten benutzte Ritzel mit nur elf Zähnen weist einen schlechten Wirkungsgrad auf. Noch kleinere Ritzel sind aus verzahnungstechnischen Gründen nicht sinnvoll.
- Gleiches gilt für das Kettenblatt: Grössere Kettenblätter bedeuten einen geringeren „Schwenkwinkel“ zwischen zwei benachbarten Kettengliedern und damit weniger Reibung, was den Wirkungsgrad steigert. Ein relativ grosses Kettenblatt mit 50 Zähnen ist also stets günstiger als beispielweise ein beim Mountainbike übliches kleines Kettenblatt mit nur 30 Zähnen.
- Bei hoher Leistung ist der Wirkungsgrad stets günstiger als bei geringer Leistung. Die Ursache dafür liegt in der Tatsache begründet, dass bei differenzierterer Betrachtung nach lastabhängigen und lastunabhängigen Verlusten unterschieden werden muss: Lastunabhängige Anteile liegen auch dann vor, wenn das System keine Leistung überträgt und nur im Leerlauf bewegt wird. In diesem Fall wäre der Wirkungsgrad als Quotient von Abtriebsleistung zu Antriebsleistung sogar 0 %. Wird ausgehend von diesem unsinnigen Leerlaufbetrieb die Leistung immer weiter gesteigert, so verlieren die lastunabhängigen Anteile relativ immer mehr Bedeutung, was zu einer Steigerung des Wirkungsgrades führt. Der beste Wirkungsgrad wird dann erzielt, wenn das System voll ausgelastet wird. Die hier vorliegende Darstellung variiert die Leistung zwischen 50 W (sehr „gemütlich“) und 400 W (sehr leistungsbetont).

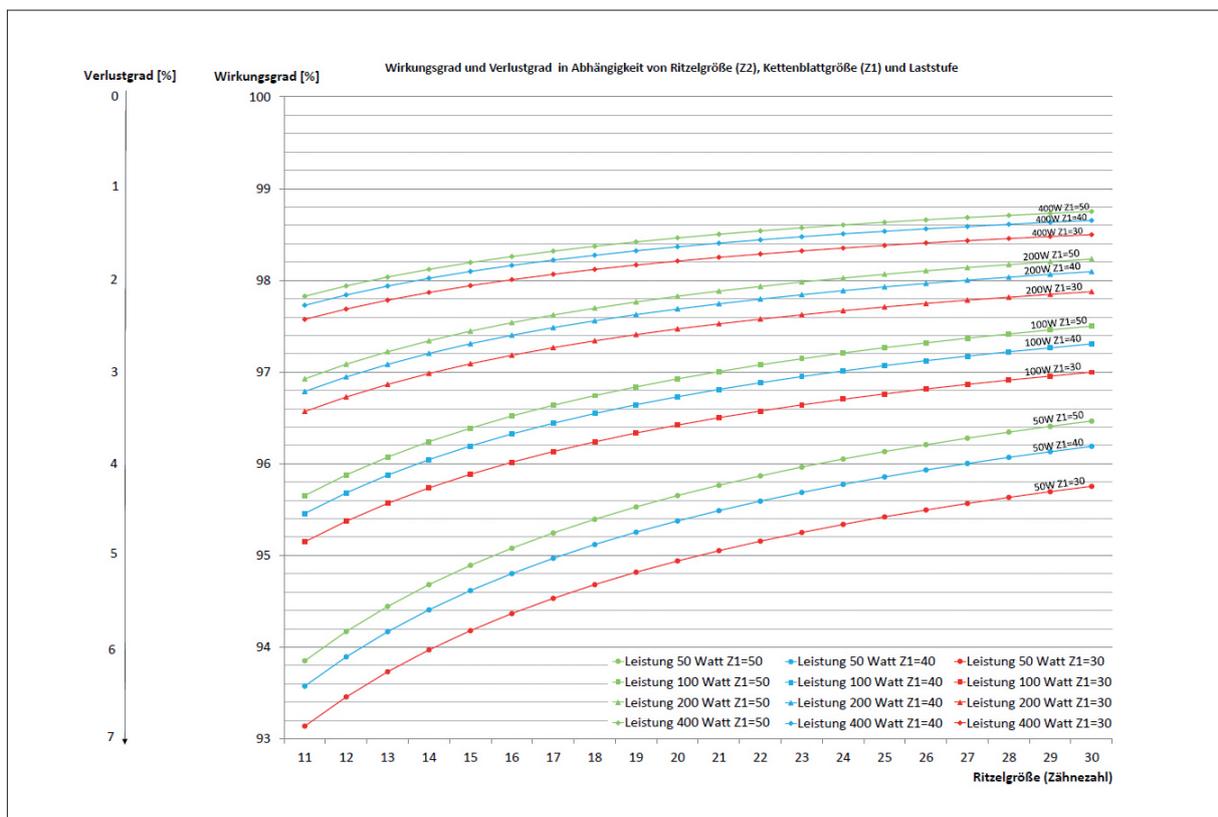


Abb. 2: Wirkungsgrad Fahrradkette

Der hier dokumentierte Wirkungsgrad lässt sich jedoch nur im Labor erreichen. Im praktischen Betrieb wird dieses Optimum durch drei Umstände eingetrübt:

- Die im Versuch praktizierte optimale Schmierung lässt sich auf der Strasse nur schwerlich aufrecht erhalten und wird durch Witterungseinflüsse sowie Schmutz verschlechtert.
- Der für eine Kettenschaltung erforderliche Kettenspanner mit Schaltwerk verbraucht etwa 1 W, was den Wirkungsgrad weiterhin reduziert. Bei einer Leistung von 100 W würde sich der Wirkungsgrad alleine dadurch um 1 % verschlechtern.
- Bei einer Kettenschaltung muss die Kette zum Gangwechsel im allgemeinen Fall aus der Idealebene heraus geschwenkt und zum Schräglauf gezwungen werden, was zu weiteren Verlusten führt, die allerdings nur im Promillebereich liegen.

### 3. Wirkungsgrad des Zahnriemens als Fahrradtrieb

Der Zahnriemen wurde zwar schon vor geraumer Zeit als Fahrradtrieb versucht, aber erst jüngere werkstoffkundliche Optimierungen lassen ihn vorteilhaft zur Anwendung kommen. Während eine Fahrradkette zur Montage geöffnet und geschlossen wird, kann der Zahnriemen nur geschlossen gefertigt werden, so dass der Fahrradrahmen so ausgelegt werden muss, dass er zur Montage des Riemens geöffnet werden kann. Da der Zahnriemen selber nicht als schaltbares Getriebe genutzt werden kann und in aller Regel mit einer Nabenschaltung kombiniert wird, kommen nur einige wenige Kombinationen von Zähnezahlen in Frage. Es bietet sich also an, den Wirkungsgrad nach Abb. 3 mit einem üblichen Zähnezahlverhältnis 50 (an der Tretkurbel) und 20 (am Hinterrad) direkt über der Leistung aufzutragen.

Auch hier lässt sich eine Aussage treffen, die bereits bei der Kette eine wichtige Rolle gespielt hat: Der Wirkungsgrad wird bei zunehmender Leistung immer günstiger. Während bei der Kette allerdings der Leertrum (unterer „Kettenstrang“, der zur Rückführung der Kette an die Tretkurbel dient) praktisch keine nennenswerte Kraft überträgt, muss ein Zahnriemen vorgespannt werden, so dass auch dieser Leertrum unter Kraft steht. Wenn der Zahnriementrieb nach den Empfehlungen des Herstellers „normal“ vorgespannt wird, so ergibt sich der untere Kurvenzug in Abb. 3. Wird die Vorspannung deutlich reduziert, so wird der Wirkungsgrad erheblich gesteigert. Die heikle Frage ist allerdings, wie weit diese Reduzierung getrieben kann, ohne dass es

bei einem heftigen Antritt zu einem Überspringen des Riemens auf den Zähnen des Ritzels kommt.

Versucht man einen ersten groben Vergleich zwischen Kettentrieb und Riementrieb, so liegt es nahe, aus der Vielfalt von Abb. 2 den Fall nach Abb. 3 zu übertragen, der von den Zähnezahlen her mit dem Riemen vergleichbar ist, also ebenfalls an der Tretkurbel 50 Zähne und am Hinterrad 20 Zähne aufweist: Bei hoher Leistung ist der Wirkungsgrad des Riementriebes deutlich besser als der eines vergleichbaren Kettentriebes, bei geringer Leistung kann der Riemen aber nur mit der Kette konkurrieren, wenn die Riemenvorspannung deutlich reduziert wird. Eine zukunftsweisende Entwicklung müsste darauf abzielen, den Zahnriementrieb als selbstspannenden Riementrieb auszuführen, der die Vorspannung bei geringen Lasten reduziert und damit zu einem sehr günstigen Wirkungsgrad führt. bei hoher Belastung spannt sich der Riementrieb selbsttätig und vermeidet dadurch ein Überspringen des Riemens auf den Zähnen des Ritzels. Solche selbstspannenden Riementriebe sind rein mechanisch agierende Mechanismen und werden in anderen Bereichen der Technik schon seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt.

Der Riementrieb wirft jedoch noch eine weitere Frage auf, die beim Kettentrieb nicht existent ist und in Abb. 4 dargestellt ist. Ähnlich wie in Abb. 3 wurde sowohl für normale als auch für reduzierte Vorspannung der Wirkungsgrad ermittelt und dabei die Tretkurbeldrehzahl von 40 bis 100  $\text{min}^{-1}$  variiert. Auf der waagerechten Achse konnte hier allerdings nicht die Leistung aufgetragen werden, weil diese ja ihrerseits von

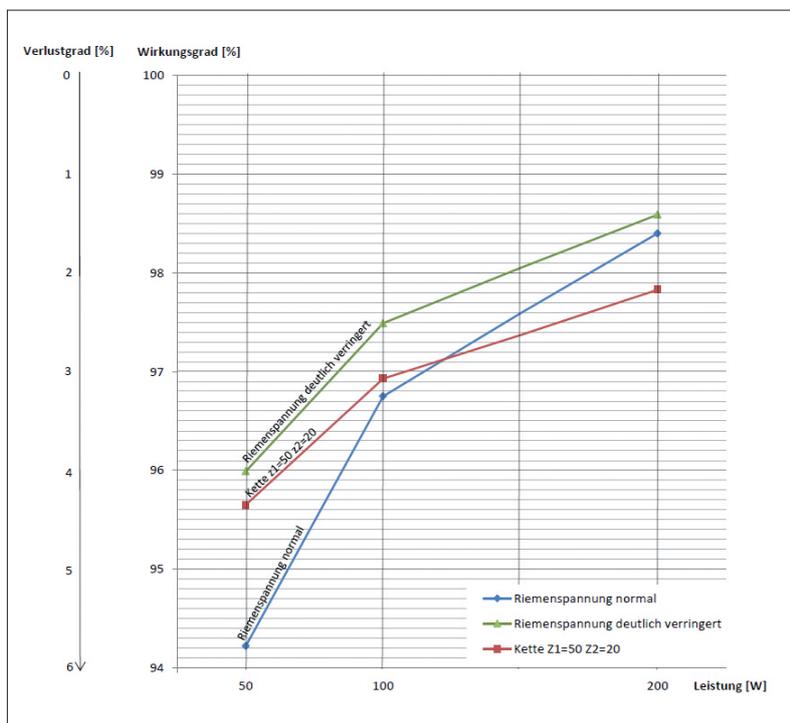


Abb. 3: Wirkungsgrad Zahnriemenantrieb

der Geschwindigkeit abhängt. Aus diesem Grund wurde als Belastung das Moment an der Tretkurbel aufgetragen. Tatsächlich lässt sich messtechnisch nachweisen, dass sich der Wirkungsgrad mit steigender Drehzahl im Promillebereich verschlechtert, weil aufgrund der Dämpfung weitere Energie verloren geht. Der Riemenwerkstoff entzieht aufgrund seiner „viskoelastischen“ Eigenschaften dem sich bewegenden System Energie. Dieser Effekt ist allerdings für fahrradtypischen Parameter (die Tretkurbeldrehzahl entfernt sich kaum von  $70 \text{ min}^{-1}$ ) so schwach ausgeprägt, dass er für praktische Belange kaum Bedeutung haben dürfte.

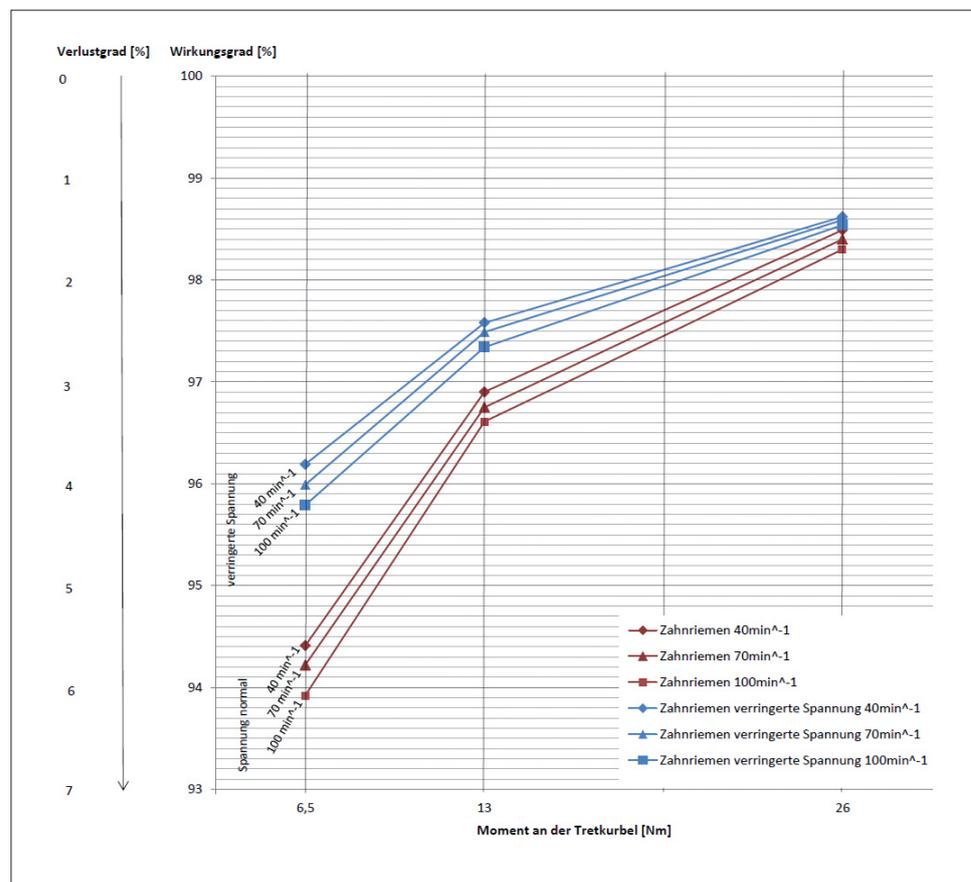


Abb. 4: Wirkungsgrad Zahnriemenantrieb in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

#### 4. Wirkungsgrad der Nabenschaltung

Der Wirkungsgrad des Nabengetriebes hängt von sehr vielen Einflussgrößen ab, die sich hier nur grob beschreiben lassen. Zunächst einmal ergibt sich eine ähnliche Abhängigkeit wie beim Kettentrieb: Der Wirkungsgrad wird mit steigender Leistung immer höher. Die gute alte Torpedonabe konnte mit einer einzigen Planetenradstufe in drei Gängen betrieben werden. Moderne Getriebeabnen stellen bis zu 14 Gänge zur Verfügung, wobei je nach eingelegtem Gang bis zu drei Getriebestufen geschaltet werden. Während der direkte Gang ohne Getriebe einen optimalen Wirkungsgrad von fast 100 %

aufweist, kostet jede zugeschaltete Getriebebestufe weitere Verluste, die sich dann auf einige Prozent addieren können. Im Neuzustand weist das Getriebe einen eher geringen Wirkungsgrad auf, der sich in der Einlaufphase durch selbsttätige Läppvorgänge deutlich verbessert. Der mit der Alterung des Öls einhergehende Wirkungsgradverlust lässt sich durch einen Ölwechsel (nach einem Jahr Betriebsdauer oder 5.000 km) wieder eliminieren. Ansonsten weist eine Getriebe- nabe den für den Alltagsbetrieb deutlichen Vorteil der Unabhängigkeit von Umwelteinflüssen auf.

### 5. Gesamtwirkungsgrad

Kommt man auf die bereits eingangs erwähnte Gegenüberstellung von Kettenschaltung und Nabenschaltung zurück, so lässt sich zwar keine pauschale Schlussfolgerung ziehen, aber für die Kombination eines Kettentriebes mit einer Nabenschaltung können folgende Feststellungen getroffen werden:

- Es brauchen keine kleinen Ritzel verwendet zu werden, so dass deren besonders hohen Verluste vermieden werden können.
- Ein Kettenspanner wird überflüssig, so dass die dadurch verursachte Reibung entfällt.
- Der Schräglauf der Kette und der damit verbundene Verlust wird ausgeschlossen.
- Der Kettentrieb kann vollständig gekapselt werden, was ihn witterungs- und schmutzunabhängig macht. Dadurch wird der gesamte Antrieb allwettertauglich und wartungsarm.

- Es kann wahlweise auch ein Zahnriementrieb verwendet werden, der die Leistungsübertragung auch ohne Kapselung allwettertauglich und praktisch wartungsfrei macht.

Grundsätzlich werden diese Umstände dazu führen, dass die Nabenschaltung, die ja deutlich älter ist als die Kettenschaltung, in ihrer modernen Form wieder mehr genutzt wird.



**Prof. Dr.-Ing. Hubert Hinzen**

Fachbereich Technik  
Fachrichtung Maschinenbau  
Hochschule Trier / Schneidershof

+49 651 8103 471  
H.Hinzen@hochschule-trier.de