

Wirkungsgradmessungen von Fahrradantrieben – Eine unendliche Geschichte?!

Um die neuerlich entstandene Diskussion um den Wirkungsgrad fruchtbar zu beleben, beschreiben wir im folgenden einige Punkte, die die Bestimmung des Wirkungsgrades so schwierig gestalten. Wir hoffen, daß damit mehr Verständnis dafür erzeugt wird, daß es nicht so leicht ist, den Wirkungsgrad punktgenau anzugeben.

1. Gültigkeit der Modellbildung

Bei den bisher bekannten Messungen wurde meistens mit niedrigen Prüfleistungen von 80W - 200W mit konstantem Drehmoment gemessen. Diese Leistungen werden als repräsentativ für typische Fahrradfahrsituationen dargestellt. Aus den nachfolgend beschriebenen Gründen erscheinen uns diese Prüfleistungen als nicht ausreichend.

Die vom Radfahrer erzeugte Leistung besteht aus der relativ konstanten Drehzahl und dem aufgrund der Kurbeltriebskinematik stark schwankenden Drehmoment. Messungen ergaben bei verschiedenen Antriebsleistungen Drehzahlschwankungen von ca. 5% und Drehmoment-schwankungen bis über 90% pro Kurbelumdrehung. Tabelle 2 zeigt die Meßergebnisse bei verschiedenen Leistungen.

Fahrleistung und Drehzahl	100W, 75min ⁻¹	300W, 75min ⁻¹	575W, 50min ⁻¹
Drehmomentmaximum	21,6Nm	68Nm	200Nm
Drehmomentminimum	3,8Nm	8Nm	20Nm

Tabelle 2

Die Leistungscharakteristik wird daher entscheidend von dem Drehmomentverhalten bestimmt. Bild 1 zeigt den typischen Leistungsverlauf über eine Umdrehung der Antriebswelle.

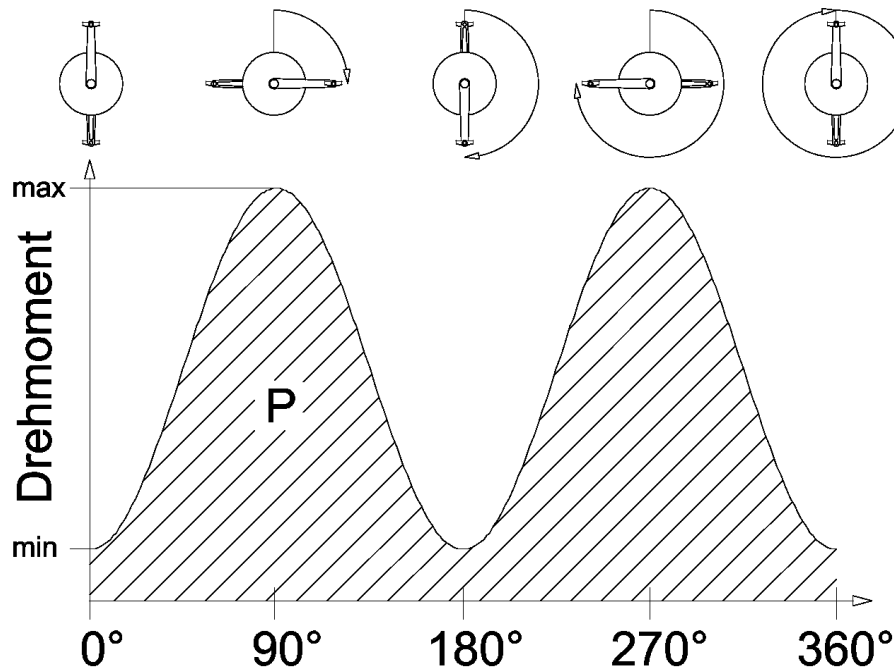


Bild 1

Durch den pulsierenden Drehmomentverlauf eines Radfahrers kommt es bei allen kraftübertragenden Teilen (Kettengelenke, Kettenräder, Lager, Zahnräder, usw.) zu einer sich mit dem Drehmomentverlauf ständig wiederholenden Be- und Entlastung bzw. Ver- und Entspannung.

Bei der Bewertung der mechanischen Verluste, die für den Wirkungsgrad verantwortlich sind, ist diesem Umstand besondere Beachtung zu schenken.

Die genaue Simulation des an- und abschwelldenden Drehmomentverlaufs ist nicht einfach zu realisieren und meßtechnisch unverhältnismäßig aufwendig zu erfassen. Bei der Messung von mechanischen Wirkungsgraden werden daher in den Prüfständen Elektromotoren mit konstanter Antriebsleistung verwendet. Es stellt sich nun die Frage, wie groß die Prüfleistung mit konstantem Drehmoment gewählt werden muß, damit für die Wirkungsgradmessung ein ähnliches Verhalten des Fahrradtriebes erreicht wird, wie es beim Radfahren tatsächlich auftritt.

Ein ähnliches Problem stellte sich uns bei der Gestaltung unseres Verschleißmeßprüfstandes für Ketten und Kettenräder. Auch dieser wird mit konstantem Drehmoment angetrieben bzw. gebremst. Umfangreiche Vergleiche zwischen praktisch gefahrenen Komponenten und Komponenten, die auf dem Prüfstand verschlissen wurden zeigten folgendes: Wurden Komponenten z.B. in der Praxis mit durchschnittlich 150W bei einem durchschnittlich pulsierenden Drehmoment zwischen 5Nm und 30Nm gefahren, so ergab sich erst bei den Testkomponenten, die mit konstant 30Nm gefahren wurden ein ähnliches Verschleißbild.

Es kann vorausgesetzt werden, daß die den Verschleiß der Bauteile verursachenden Gründe die gleichen sind, die auch für den Wirkungsgrad verantwortlich sind. Daher läßt sich aus den Vergleichen ableiten, daß eine konstante Leistung mit den Maximalwerten des zu simulierenden pulsierenden Drehmoments der Realität näher kommt, als eine konstante Leistung mit gemitteltem Drehmoment.

Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, daß eine Radfahrleistung von z.B. 80W durch eine Prüfstandsleistung von 160W (jeweils die doppelte Leistung) bei gleicher Drehzahl simuliert werden sollte.

2. Interpretation der Meßergebnisse

Um die Meßergebnisse besser interpretieren zu können, ist es wichtig festzustellen, aus welchen Komponenten sich die zu messenden Verluste zusammensetzen.

Verluste entstehen im Antrieb des Radfahrers durch Reibung. Die Größe wird bestimmt von der Art der Reibung (rollend oder gleitend), der Größe der Reibbewegung, der Art der Oberflächengüte, der Materialhärte, der Schmierung und der Werkstoffpaarung der reibenden Teile. Zwei gesondert zu betrachtende Arten von Verlusten existieren im Fahrradtrieb:

- a) Die leistungsabhängigen Verluste entstehen durch Reibung der sich unter Antriebskraft bewegenden Teile, wie z.B. Kettengelenke, Zahnräder, Lager, usw. Ihre Größe wächst proportional mit der übertragenden Leistung.
- b) Die leistungsunabhängigen Verluste entstehen durch Reibung an sich bewegenden Teilen, deren Reibkraft nicht durch die übertragene Antriebskraft verändert wird, wie z.B. Dichtscheiben, Anlaufscheiben, Schmierstoffwalken. Ihre Größe ist abhängig von der Drehzahl, der Temperatur und der Schmierstoffviskosität.



Im folgenden Beispiel werden zwei Fahrradantriebe verglichen, die bei 50W Eingangsleistung 91% Wirkungsgrad besitzen. Sie entwickeln jedoch unterschiedliche leistungsabhängige und leistungsunabhängige Verluste.

System A

P ein	50W	100W	200W	300W	400W	500W
Lastab. Verlust 7%	3,5W	7W	14W	21W	28W	35W
Lastunab. Verlust	1W	1W	1W	1W	1W	1W
Verlust gesamt	4,5W	8W	15W	22W	29W	36W
η ges	91,00%	92,00%	92,50%	92,70%	92,75%	92,80%

Tabelle 3

Im System A gehen 7% der übertragenen Leistung durch leistungsabhängige Reibung verloren. Dazu addieren sich die leistungsunabhängigen Verluste der Dichtungen und Anlaufscheiben. Diese betragen im Beispiel bei der vorgegebenen Drehzahl und dem betrachteten Gang 1W. In Tabelle 3 sind die entsprechenden Größen für Eingangsleistungen von 50W bis 500W eingetragen. Bei 50W Antriebsleistung beträgt der Gesamtwirkungsgrad 91% und steigt bei 500W Antriebsleistung auf 92,8%.

System B

P ein	50W	100W	200W	300W	400W	500W
Lastab. Verlust 3%	1,5W	3W	6W	9W	12W	15W
Lastunab. Verlust	3W	3W	3W	3W	3W	3W
Verlust gesamt	4,5W	6W	9W	12W	15W	18W
η ges	91,00%	94,00%	95,50%	96,00%	96,30%	96,40%

Tabelle 4

Im System B gehen nur 3% der übertragenen Leistung durch leistungsabhängige Reibung in Kette, Zahnrädern, etc. verloren. Dazu addieren sich jetzt die Verluste von Dichtungen und Anlaufscheiben, die in diesem Beispiel wegen stramm laufender, also gut dichtender Dichtungen 3W betragen. In Tabelle 4 sind die entsprechenden Größen eingetragen.

Bei 50W Antriebsleistung in System B entsteht hier ein Gesamtwirkungsgrad von 91%, der dem des Systems A entspricht. Mit steigender Leistung verbessert sich jedoch der Gesamtwirkungsgrad, bis er bei 500W 96,4% beträgt. Er ist damit deutlich besser, als der von System A mit 92,8%.

Aus den Tabellen werden zwei Dinge deutlich:

1. Bei niedrigen Leistungen überwiegen die leistungsunabhängigen Verluste.
2. Bei höheren Leistungen überwiegen die leistungsabhängigen Verluste.

Bild 2 zeigt die Zusammenhänge.

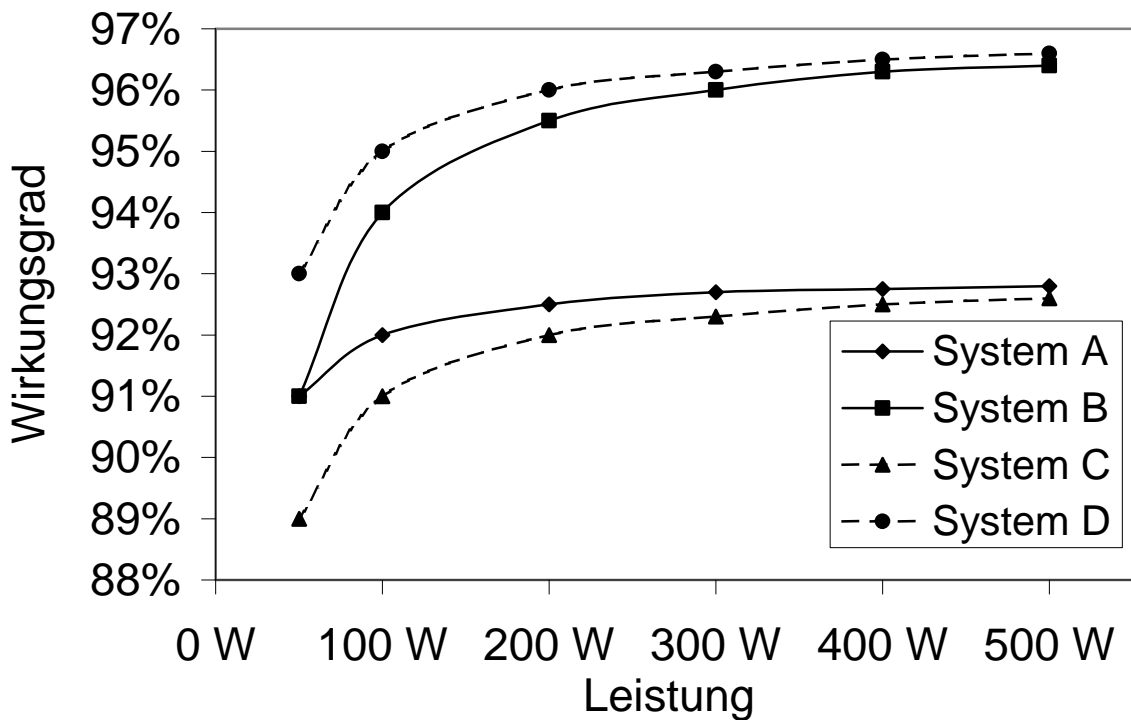


Bild 2

Neben den Wirkungsgradkurven für die Systeme A und B sind die Kurven C und D aufgezichnet. Die Kurve C beschreibt den Fall, daß sich aufgrund von Temperatur- oder Schmierfilmänderung an der Dichtung des Systems A die leistungsunabhängigen Verluste von 1W auf 2W erhöht haben. Kurve D beschreibt System B, nur hat sich hier der leistungsunabhängige Verlust aus dem gleichen Grund von ursprünglich 3W auf 2W reduziert.

Aus diesen Beispielen ist zu erkennen, daß bei Messungen unterhalb 200W relativ kleine leistungsunabhängige Verlustschwankungen von +/-1W eine besonders große Rolle bei der Wirkungsgradbildung spielen. Da diese Verluste in einem komplexen Zusammenhang zwischen Drehzahl- und Temperaturänderung (auch erzeugt durch eigene Reibungswärme), sowie Schmierstoffverhalten stehen, können diese Schwankungen auch innerhalb einer Prüfsituation auftreten. Bei Messungen unterhalb 200W ist es daher notwendig, den Einfluß dieser Schwankungen durch mehrfache Wiederholung der Prüfung festzustellen. Bei Prüfungen oberhalb 200W wird der Einfluß dieser Schwankungen so klein, daß er vernachlässigt werden kann.

Aus dieser Erkenntnis heraus sollten Meßwerte nicht absolut, sondern immer als Wirkungsgradkennfeld mit entsprechender oberer und unterer Abweichung dargestellt werden.

3. Sinn der Wirkungsgradmessung

Sinn und Zweck der Wirkungsgradmessung ist es, verschiedene Fahrradantriebe daraufhin zu untersuchen, welcher Antrieb die investierte Radfahrerleistung am besten in Vortrieb umsetzt. Zur Erreichung des optimalen Vortriebes ist es jedoch genauso wichtig durch geeignete Gangwahl für den jeweiligen Fahrwiderstand die Übersetzung so wählen zu können, daß Tretkraft und Trittfrequenz dem persönlichen Leistungsniveau entsprechen.

Die Leistungsentwicklung der Muskeln unterliegt wie bei jeder Wärmekraftmaschine einem Wirkungsgrad. Er bezeichnet das Verhältnis der Stoffwechselleistung zur abgegebenen

mechanischen Leistung (z.B. Antriebsleistung an der Tretkurbel). Der Wirkungsgrad hängt ab von der jeweiligen Muskelkraft in Verbindung mit der dazu entwickelten Bewegungsgeschwindigkeit. Finden beide Größen ihr Optimum, kann der Muskelwirkungsgrad bis auf 25% steigen.

Die Unterschiede der Muskelwirkungsgrade zwischen günstigem und ungünstigem Anstrengungsverhältnis (Verhältnis Körperbeanspruchung zur entwickelten Leistung) kann schnell über 10% steigen. Damit ist dieser Bereich wesentlich größer, als die Wirkungsgradunterschied innerhalb der verschiedenen Schaltungssysteme.

Tabelle 5 zeigt das Beispiel von zwei Radfahrern, die mit gleicher Leistung am Hinterrad fahren.

Muskelwirkungsgrad	24%	22%
+ Fahrradtriebwerkungsgrad	93%	97%
= Gesamtwirkungsgrad	22%	21%

Tabelle 5

Fahrer A fährt für diese Fahrsituation eine optimale Übersetzung, sein Muskelwirkungsgrad beträgt daher 24%. Sein Fahrradtriebwerkungsgrad läuft in diesem Beispiel in einem Gang mit relativ schlechtem Wirkungsgrad von 93%. Fahrer B fährt eine für ihn ungünstige Übersetzung mit sehr gutem Wirkungsgrad von 97%. Wegen der jetzt ungünstigen Trittfrequenz arbeiten seine Muskeln nur mit 22% Wirkungsgrad. Aus dem Gesamtwirkungsgrad, der Muskel- und Antriebsverluste berücksichtigt, ist zu entnehmen, daß Fahrer A trotz schlechterem Antriebswirkungsgrad mit 22% effektiver fährt, als Fahrer B, der im Beispiel nur auf 21% kommt.

Um dem Mensch als Fahrradtriebwerkmaschine gerecht zu werden, ist eine feine Abstufung der Schaltung genauso wichtig, wie ein guter mechanischer Wirkungsgrad. Die optimale Energieumsetzung läßt sich bei Getrieben mit wenig Gängen nur in einem stark eingegrenzten Fahrbereich umsetzen. Viele Gänge mit feinen Abstufungen ermöglichen dagegen eine optimale Energieumsetzung über die gesamte Fahrbereichsbreite (von steil bergauf bis steil bergab), vorausgesetzt, man fährt im richtigen Gang. Sportmedizinische Untersuchungen zeigen, daß die Gangsprünge kleiner als 15% sein müssen, damit die Anschlußgänge nach oben und unten passen.

Es macht unter diesem Gesichtspunkt wenig Sinn, Antriebe mit wenig Gängen, großen Gangsprüngen und kleiner Gesamtübersetzung mit Antrieben mit vielen Gängen, kleinen Gangsprüngen und großer Gesamtübersetzung zu vergleichen. Ein Vergleich von verschiedenen Schaltungssystemen sollte immer deren Einsatzbereich berücksichtigen.

4. Zusammenfassung

- A) Messungen unterhalb von 200W sind sehr vorsichtig zu bewerten, da der Einfluß der Schwankungen der leistungsunabhängigen Verluste hier sehr hoch ist.
- B) In der Praxis spielen Wirkungsgradänderungen erst bei sportlicher Fahrweise eine wesentliche Rolle. Eine sportliche Fahrweise ist aber durch eine Leistung von deutlich über 100W gekennzeichnet. Berücksichtigt man den Einfluß des pulsierenden Drehmomentverlaufes auf den Wirkungsgrad, so machen Prüfstandsläufe unterhalb 200W mit konstantem Drehmomentverlauf auch aus dieser Perspektive keinen praktischen Sinn.
- C) Beim Vergleich der Systeme sollten neben den Wirkungsgraden auch immer die Gesamtübersetzung und die Gangzahl berücksichtigt werden. Nur so ist ein Vergleich, der Aussagen über die praktische Auswirkung zuläßt, möglich.

5. Eigene Meßergebnisse

Wir möchten die dargestellten Punkte als Anregung zur Diskussion verstanden wissen, da es auf dem Gebiet der praktischen Wirkungsgradmessung von Fahrrad-Schaltssystemen noch viele offene Fragen gibt. Zum Vergleich befindet sich in Bild 3 das Ergebnis der von uns durchgeführten Wirkungsgradmessungen einer 24-Gang Kettenschaltung (Kettenblätter 46, 36 und 26 Zähne, XT-Kassette 11-28) und der Rohloff SPEEDHUB 500/14 (Primärübersetzung 46/16). Beide Schaltssysteme waren ca. 100km eingefahren.

Diese Messungen beinhalten die Verluste des kompletten Antriebs (Tretlager, Kette, Kettenschaltungsnahe bzw. Getriebe).

Um einen sportlichen Fahrer zu simulieren, der mit ca. 160W und Drehmomentspitzen von 50Nm (Pedalkraft 285N) fährt, wurden die Messungen mit einer Leistung von 314W mit konstantem Drehmoment durchgeführt.

Antriebsdrehzahl 60min⁻¹
 Bremsleistung (konstant) 314W
 Antriebsdrehmoment 50Nm

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und deren Genauigkeit wurde durch mehrmalige Wiederholung der Prüfstandsläufe verifiziert.

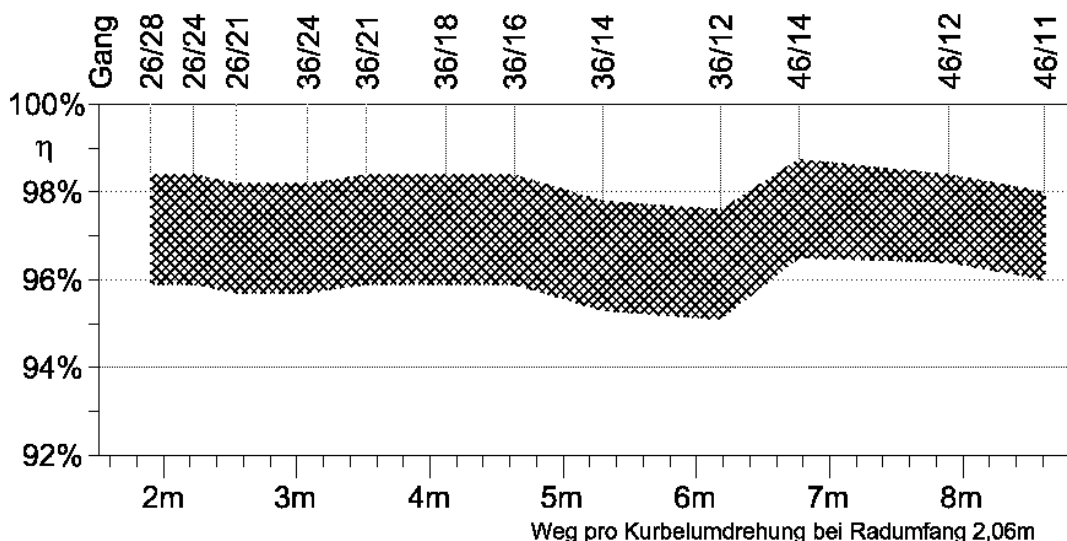


Bild 3

Bild 3 zeigt die Wirkungsgrade der Kettenschaltung über der Entfaltung (Zurückgelegter Weg pro Kurbelumdrehung bei 2,06m Radumfang). Die Abstände zwischen den Gängen stellen sich daher entsprechend der Übersetzungsänderung unterschiedlich groß dar. Die Kettenschaltung wurde zunächst im sauberen und gut geschmierten Zustand untersucht. Um praxisgerechte Ergebnisse zu erhalten, wurden Kette und Ritzel gegen Komponenten getauscht, die ca. 1000km gefahren waren und im originalen Verschmutzungszustand montiert wurden. Das dargestellte Wirkungsgradkennfeld beinhaltet beide Zustände, wobei die Meßwerte der gebrauchten Komponenten im Schnitt 1% tiefer lagen. Die Höhe des Kennfeldes beinhaltet außerdem die Toleranz der Meßgenauigkeit von +/-0,5%.

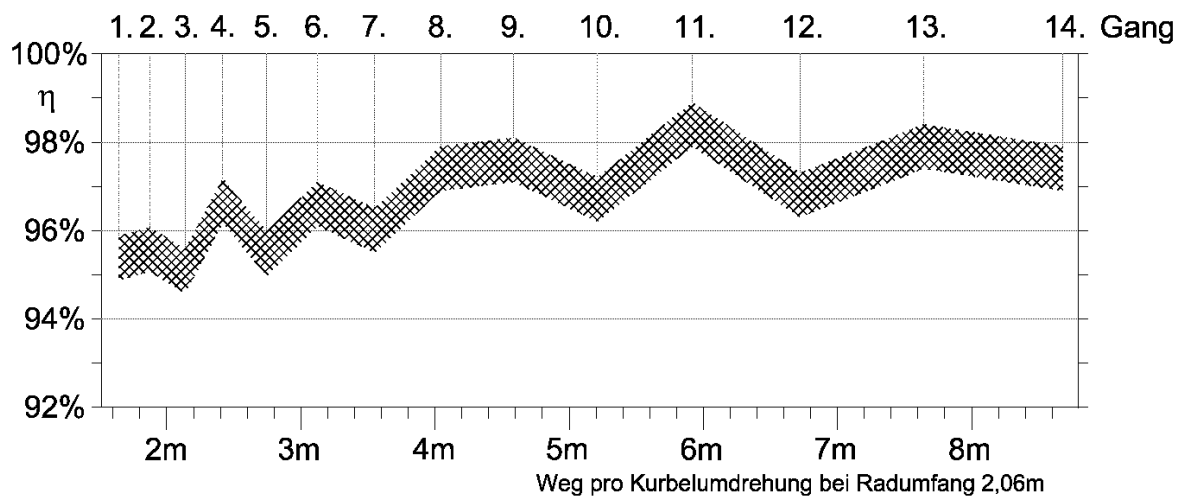


Bild 4

Bild 4 zeigt das Wirkungsgradkennfeld der Rohloff SPEEDHUB 500/14 über der Entfaltung. Da die Rohloff SPEEDHUB 500/14 gleichmäßig abgestufte Gangsprünge besitzt, zeigen sich die Abstände zwischen den Gängen hier als harmonisch steigende Reihe. Auch hier wurden bei Wiederholungsmessungen Ritzel und Kette gegen solche getauscht, die 1000km gefahren waren. Wirkungsgradunterschiede waren dabei nicht meßbar. Die Höhe des Kennfeldes kennzeichnet die Toleranz der Meßgenauigkeit mit +/-0,5%.

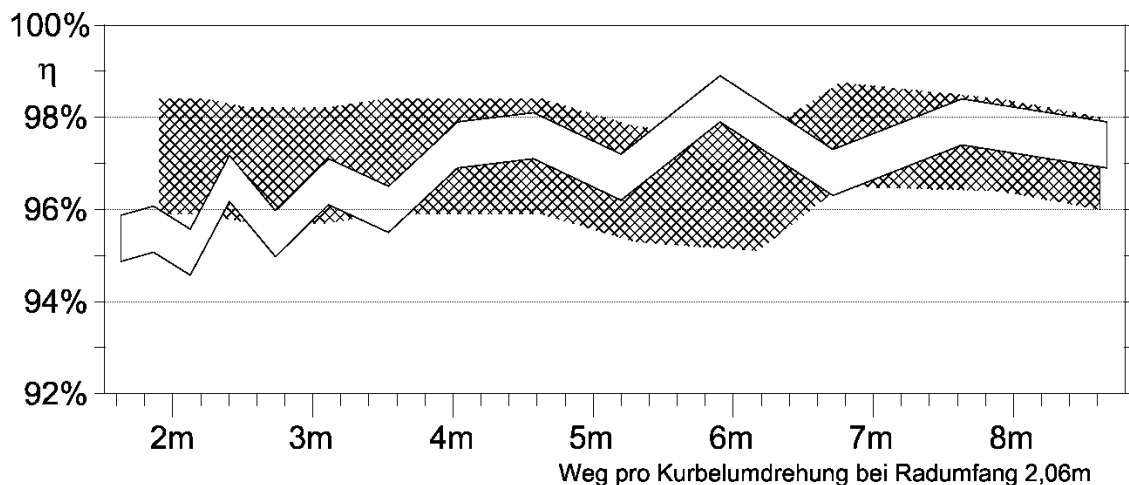


Bild 5

Bild 5 zeigt die Wirkungsgradkennfelder der Bilder 3 und 4 übereinander. Um einen Vergleich der praktischen Auswirkung zu ermöglichen, erfolgt die Wirkungsgradarstellung über der Entfaltung.

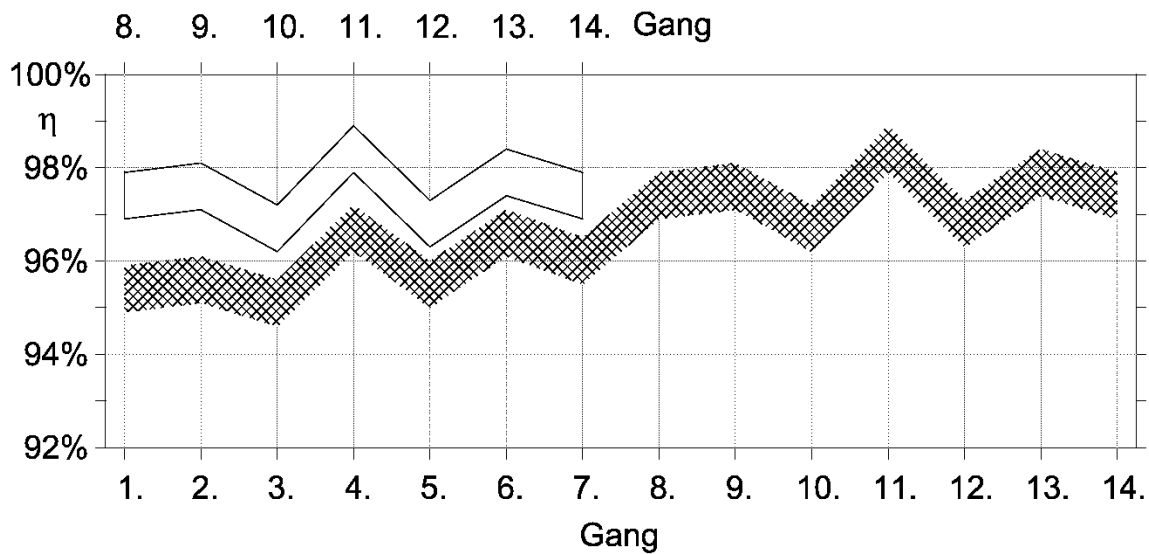


Bild 6

*Rohloff GmbH Mönchebergstr. 30 D-34125 Kassel Tel. 0561-875615 Fax 0561-875338
<http://www.rohloff.de> e-mail: service@rohloff.de
 Technische Änderungen vorbehalten*

Bild 6 zeigt das Wirkungsgradkennfeld über den Gängen. Der Abstand von Gang zu Gang ist gleich groß. Der Kennfeldverlauf spiegelt die Anzahl der aktiven Getriebestufen wie in Tabelle 1 dargestellt wider. Der Kennfeldverlauf vom ersten bis zum siebten Gang entspricht dem Kennfeldverlauf vom achten bis zum 14. Gang. Das Wirkungsgradniveau von Gang eins bis sieben liegt jedoch durch die aktive dritte Getriebestufe um ca. 2% niedriger. Auch das ist plausibel, da bei der Rohloff SPEEDHUB 500/14 die ersten beiden Getriebe in den Gängen eins bis sieben identisch geschaltet sind, wie in den Gängen acht bis 14. Zur Verdeutlichung wurde der Kennfeldabschnitt Gang acht bis 14 parallel nach links verschoben und über dem Kennfeldabschnitt Gang eins bis sieben nochmals abgebildet. Die Ergebnisse decken sich mit dem Schaltschema bzw. den mechanischen Abläufen innerhalb des Getriebes.

6. Schlußbemerkung

Die Ausführungen machen deutlich, daß die Wirkungsgradbestimmung von Fahrradantrieben von vielen Faktoren abhängt, deren Untersuchung im einzelnen einen umfangreichen Aufwand erfordert. Zur Ermittlung praxisbezogener Werte müßten z.B. auch Faktoren wie Verschmutzung, Schmierung, Verschleiß und Serienschwankungen insbesondere bei offen laufenden Systemen wie die Kettenschaltung berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang müssen ebenfalls die sportmedizinischen Erkenntnisse zur Leistungsumsetzung mit einbezogen werden. Wir denken, daß dieses Thema noch viel Raum für Versuche und Diskussionen bietet.

*Rohloff GmbH Mönchebergstr. 30 D-34125 Kassel Tel. 0561-875615 Fax 0561-875338
<http://www.rohloff.de> e-mail: service@rohloff.de
 Technische Änderungen vorbehalten*