

# Grobentwurf für einen elektrischen Zusatzantrieb für ein Pinion-Fahrrad

Privater Forumsbeitrag für [www.rad-forum.de](http://www.rad-forum.de), abgelegt als pdf auf [www.picr.de](http://www.picr.de), User AndreMQ, April 2017, Eigenleistung, keine Kopie, Abschrift o.ä. von irgendeinem anderen Dokument, keine kommerziellen Interessen bzw. Vor-/Nachteile damit verbunden.

Aktuelle Pedelecs sind relativ schwer und sind zu weit vom Fahrrad entfernt. Eigentlich ist es nicht ein muskelbetriebenes Fahrrad mit elektrischer Unterstützung, sondern ein zu schwaches E-Mofa mit Muskelunterstützung. Im Prinzip gibt es zwei Grundkonzepte in dann mehreren Ausführungen:

- Nabenmotoren mit/ohne Untersetzung. Der E-Motor sieht ein Eingangssystem.
- Motoren im Tretlager, die das für den Muskelantriebe vorhandene Mehrganggetriebe mitnutzen.

Rückspeisung/Rekuperation kann eigentlich jeder Motor von Haus aus, aber die Nutzung benötigt zwei Voraussetzung:

- Im Schiebetrieb dürfen die üblichen Freiläufe nicht wirken, weil sonst das HR kein negatives Drehmoment auf dem Motor übertragen kann.
- Die Leistungs- und Regelelektronik muss darauf ausgelegt sein. Das ist bei Akku-Speisung mit einer DC-Spannung deutlich einfacher, als bei sonstigen Umrichtern, die am 3AC400V oder 1AC240V-Netz betrieben werden.

Es gibt eigentlich nur fünf Motortypen, die in Frage kommen:

- a) Permanent-erregte Synchronmotor
- b) Reluktanzmotor, der ebenfalls zu den Synchronmotoren zählt.
- c) Asynchronmotoren bzw. Käfigläufermotoren.
- d) Gleichstrommotoren (Nebenschluß).
- e) Gleichstrom (Reihenschluß).

Motortyp c) ist vor allem wegen der Feldschwächung interessant und der weit überwiegende Motor in Bahnantrieben und z.B. auch dem Tesla-E-KFZ. Leider ist dieser Motortyp für die kleinen Leistungen im Pedelec nicht sinnvoll. Motortyp b) könnte gehen, ist auch interessant, weil er ohne teure Magneten funktioniert, aber bei den kleinen Leistungen weniger brauchbar. Bleibt Motortyp a), der auch bei so ziemlich allen Pedelec-Systemen im Einsatz ist. Die kann man als große, hochpolige Langsamläufer auslegen (z.B. BionX-Nabenmotor) oder als höherdrehende, kleinere Motoren wie z.B. Bosch-, Conti- oder Shimano-Tretlagermotoren. Motortyp d) bringt keine Vorteile mehr, weil vernünftige Leistungs- und Regelelektronik vorausgesetzt werden kann und da sind die kompakteren a) gleich besser geeignet. Typ e) gibt es heute noch als den sehr günstigen Universalmotor in – nicht von Mindestwirkungsgradvorgaben betroffene – Küchenmaschinen und Bohrmaschinen. Durch ihre Charakteristik ließen sich Schaltgetriebe mit geringer Gangzahl leichter vermeiden (Lokomotiven), haben aber einen schlechten Wirkungsgrad und hohe Baugröße. Sie funktionieren auch ohne (Stufentransformatoren) oder mit primitiver Elektronik (Triacs). Aber das ist alles im Jahre 2017 kein Thema mehr. Wir reden bei dem Konzept nicht von Einfachlösungen, sondern von technisch voll ausgereizten Konzepten nach aktuellem Stand der Technik.

Ein weiterer, wichtiger Punkt, der für alle Motorentypen incl. Verbrennungsmotoren gilt, da Leistung = Drehmoment x Drehzahl x 2 x pi ist:

Langsamläufer müssen ihre Leistung über hohes Drehmoment erbringen, Schnellläufer über die Drehzahl. Da die Motorgröße aber vor allem vom Drehmoment bestimmt wird und nicht von der

Leistung, sind Langsamläufer große und damit schwere Motoren (Kupfer, Magnete, Eisen) und Schnellläufer eben leicht. Der Unterschied ist so deutlich, dass sogar ein für den Schnellläufer notwendiges (gutes) Getriebe dies nicht umkehrt. Der Grund: Getriebe können als Hebel mit sehr wenig (Stahl-)Gewicht, sehr hohe Drehmomente erzeugen. Wesentlich mehr als die magnetisch aktiven Flächen in E-Motoren.

Kompakte, leistungsstarke Antriebe sind daher immer Schnellläufer – wenn eine Untersetzung möglich ist. Auch die Eingangfahrzeuge nutzen das. Die 2 Fahrmotoren zu je etwa 150kW im Tesla drehen bis ca. 20.000rpm. Die 16 Fahrmotoren zu je 500kW im IEC2 drehen etwa 4.000rpm. Der eine Gang reicht, wenn der Betriebsbereich eingeschränkt wird (Bahnen ohne wesentliche Steigung), das Fahrzeug übermotorisiert wird (Tesla) und in beiden Fällen die Feldschwächung für Asynchronmotoren genutzt wird. Das Pedelec ist aber – wie ein LKW und wie der Muskelmotor – untermotorisiert, hat sehr weite Betriebsbereiche (Passfahrt – Ebene) und soll ein möglichst kompaktes Paket Zusatzantrieb/Akku bekommen, das trotz Untermotorisierung überall spürbar unterstützen kann. Das geht nicht mehr mit einer Getriebestufe.

Weiterer Punkt: Das erlaubte Dauerdrehmoment von E-Motoren ist sehr stark von der Kühlung abhängig und kann z.B. beim Übergang auf eine Wasserkühlung drastisch gesteigert werden. Weiterhin können E-Motoren dieses Drehmoment (wenn die Kühlung korrekt läuft) ab Drehzahl Null eben dauerhaft erbringen. Was häufig im Zusammenhang mit E-Motoren aber verwechselt wird: auch volles Drehmoment bei kleiner Drehzahl bedeutet trotzdem kleine Leistung und leider miserabler Wirkungsgrad. Der Motor kann das zwar klaglos, aber er liefert die gleiche kleine Leistung mit viel besserem Wirkungsgrad bei hoher Drehzahl und kleinem Drehmoment, was aber wiederum Getriebestufen erfordert.

Zum Selbstbasteln ist folgendes wahrscheinlich ungeeignet. Wenn Rückspeisung in allen Bereichen möglich sein soll, aber kein unerwünschtes Mitschleppen von Riemen, Motor, Getriebe oder allen dreien sonst, dann könnte es mit einem kräftig modifizierten Pinion-Stirnradgetriebe z.B. wie folgt aussehen:

- Tretkurbel wirkt über einen Freilauf (FL1 in rw-Richtung) auf die Getriebeeingangswelle.
- Motor wirkt über einen elektrisch sperrbarer Freilauf (FL2 in rw-Richtung) auf Getriebeeingangswelle.
- Getriebeausgangswelle wirkt fest auf Kurbelblatt.
- Kurbelblatt/Riemen/Ritzel wirkt über elektrisch sperrbarer Freilauf (FL3 in rw-Richtung) auf das HR.

Damit geht folgendes:

- Tretkurbel und Motor treiben Getriebeeingangswelle im Normalbetrieb: FL1 überträgt vw, FL2 überträgt vw, FL3 überträgt vw.
- Tretkurbel steht, Motor treibt alleine: FL1 läuft frei rw, FL2 überträgt vw, FL3 überträgt vw.
- Tretkurbel treibt alleine, Motor steht: FL1 überträgt vw, FL2 entsperrt, läuft frei rw, FL3 überträgt vw.
- Bergabfahrt mit stehender Kurbel ohne Rückspeisung: FL1 steht, FL2 steht, FL3 läuft frei rw. D.h. Riemen, Getriebe, Motor und Tretkurbel stehen, HR läuft frei - so wie bei normalem Rad auch.
- Bergabfahrt mit stehender Kurbel mit Rückspeisung: FL1 läuft frei rw, FL2 gesperrt, überträgt rw, FL3 gesperrt, überträgt rw. Motor und Getriebe werden von Riemen und Kettenblatt mitgeschleppt als Generator. Bremsen in der Ebene genauso.

Ein Zahlenbeispiele zur Wirkung:

- Systemgewicht 100kg

- Wie oben modifiziertes Pinion-P1.18 mit 32/28 Riemenscheiben, 165mm-Kurbel.
- Rad-Umfang 2240mm
- Motor mit Dauernenndaten: 100W/3000rpm/0,32Nm, bis 4500rpm (dann 150W) nutzbar, über Freilauf auf Vorgelege 1:50 auf Getriebeeingangswelle. D.h. die 0,32Nm sind dann 16Nm an der Tretlagerwelle.
- Rechnung zur Vereinfachung ohne Reibungsverluste in der Mechanik.

Steigung 15%, 1. Gang der Pinion:

Ergebnis (vereinfacht immer über eine Kurbelumdrehung mit 2 Totpunkten und 2 Druckpunkten):

Ohne Motor:

- Fahrer kurbelt: 65,3Nm - 0Nm - 65,3Nm - 0Nm - ... (Mittelwert 32,65Nm) bzw. Kurbelkraft 395,8N - 0N - 395,8N - 0N - ... (Mittelwert 197,9N).
- Getriebeeingangswelle: wie Fahrer.
- Am Hinterrad ergibt sich: 104Nm - 0Nm - 104Nm - 0Nm - ... (Mittelwert 52Nm).
- Fahrer leistet die gesamten 205W!!!

Motor hilft mit 16Nm auf das Tretlager:

- Fahrer kurbelt: 33,3Nm - 0Nm - 33,3Nm - 0Nm ... (Mittelwert 16,65Nm) bzw. Kurbelkraft 201,8N - 0N - 201,8N - 0N - ... (Mittelwert 100,9N), Fahrer muss nur noch etwa die Hälfte von vorher aufbringen!!.
- Getriebeeingangswelle: 49,3Nm - 16Nm - 49,3Nm - 16Nm - ... (Mittelwert 32,65Nm).
- Am Hinterrad: 78,5Nm - 25,5Nm - 78,5Nm - 25,5Nm - ... (Mittelwert wieder 52Nm).
- Fahrer leistet 105W, Motor 100W.

Man sieht also, wie deutlich der kleine 100W-Motor am Berg unterstützt, wenn nur die Übersetzung stimmt (die 0,32Nm des Motors sind am Hinterrad zu 25,5Nm geworden).

Jetzt die gleiche Fahrt mit Trittfrequenz 90:

- Rad fährt mit 7,6km/h den Berg hoch.
- Motor dreht 4500rpm.
- Fahrer leistet ohne Motor 308W!!! und mit Motor 158W. Der Motor trägt 150W bei.

Bei Bergabfahren bremst der Motor mit 100W/3000rpm, wird der Berg zu steil und die Fuhre immer schneller, werden zuerst die Gänge hochgeschaltet, bis im 18. Gang bei 48,2km/h der Motor 4500rpm (bei 150W) dreht und dann der FL2 und FL3 geöffnet wird, um ein Überdrehen zu verhindern. Insgesamt sollte gleich eine komplett elektronische Schaltung verwendet werden, die einen Schaltwunsch des Fahrers nur nach Prüfung ausführt und die elektrisch sperrbaren Freiläufe zwangsöffnet, wenn der Fahrer Unfug macht. Den optimalen Gang weiss der Fahrer sowieso nicht.

Überlandfahrt, 18. Gang, Trittfrequenz 60, 32,1km/h

Motor dreht 3000rpm, 100W, 16Nm an Getriebeeingangswelle.

Nach Kreuzotter braucht man dafür etwa 240W, d.h. am HR wirken (nur) 9,6Nm

Ergebnis (vereinfacht immer über eine Kurbelumdrehung mit 2 Totpunkten und 2 Druckpunkten):

Ohne Motor:

- Fahrer kurbelt: 75,7Nm - 0Nm - 75,7Nm - 0Nm - ... (Mittelwert 37,85Nm) bzw. Kurbelkraft 458,8N - 0N - 458,8N - 0N - ... (Mittelwert 229,4N).
- Getriebeeingangswelle: wie Fahrer.
- Am Hinterrad ergibt sich: 19,2Nm - 0Nm - 19,2Nm - 0Nm - ... (Mittelwert 9,6Nm).
- Fahrer leistet die gesamten 240W!!!

Motor hilft mit 16Nm auf das Tretlager:

- Fahrer kurbelt: 43,7Nm - 0Nm - 43,7Nm - 0Nm .... (Mittelwert 21,85Nm) bzw. Kurbelkraft 264,8N - 0N - 264,8N - 0N - ... (Mittelwert 132,4N, fast nur noch die Hälfte von vorher!!).
- Getriebeeingangswelle: 59,7Nm - 16Nm - 59,7Nm - 16Nm - ... (Mittelwert 37,85Nm).
- Am Hinterrad: 15,1Nm - 4,1Nm - 15,1Nm - 4,1Nm - ... (Mittelwert wieder 9,6Nm).
- Fahrer leistet 140W, Motor 100W.

Der Motor unterstützt wieder mit 100W. Aus den 0,32Nm Motormoment werden im 18. Gang am HR nun nur noch HR 4,1Nm, was aber eben bei hoher Geschwindigkeit trotzdem wieder 100W sind. Genau diese breite Anpassung zwischen 1. Gang bei z.B. 5,1km/h den Berg hoch (25,5Nm) und im 18. Gang bei 32,1km/h (4,1Nm) kann nur ein Getriebe. Die 25,5Nm zu 4,1Nm ist genau die Bandbreite der Pinion P1.18 (mehr als 626%).

Überlandfahrt, 15. Gang, Trittfrequenz 83, 32,1km/h

Motor dreht 4141rpm, 138W, 16Nm an Getriebeeingangswelle.

Wieder 240W und 9,6Nm am HR

Ergebnis (vereinfacht immer über eine Kurbelumdrehung mit 2 Totpunkten und 2 Druckpunkten):

Ohne Motor:

- Fahrer kurbelt: 54,9Nm - 0Nm - 54,9Nm - 0Nm - ... (Mittelwert 27,45Nm) bzw. Kurbelkraft 332,7N - 0N - 332,7N - 0N - ... (Mittelwert 166,4N).
- Getriebeeingangswelle: wie Fahrer.
- Am Hinterrad ergibt sich: 19,2Nm - 0Nm - 19,2Nm - 0Nm - ... (Mittelwert 9,6Nm).
- Fahrer leistet die gesamten 240W!!!

Motor hilft mit 16Nm auf das Tretlager:

- Fahrer kurbelt: 22,9Nm - 0Nm - 22,9Nm - 0Nm .... (Mittelwert 11,45Nm) bzw. Kurbelkraft 138,8N - 0N - 138,8N - 0N - ... (Mittelwert 64,4N, weniger als die Hälfte von vorher!!).
- Getriebeeingangswelle: 38,9Nm - 16Nm - 38,9Nm - 16Nm - ... (Mittelwert 27,45Nm).
- Am Hinterrad: 13,6Nm - 5,6Nm - 13,6Nm - 5,6Nm - ... (Mittelwert wieder 9,6Nm).
- Fahrer leistet 102W, Motor 138W

Ohne Rückspeisung vereinfacht sich das Ganze natürlich deutlich, weil dann fast das heutige Pinion-Getriebe genommen werden kann. FL1 entfällt, FL3 ist eine normale Nabe ohne sperrbaren Freilauf. Aber FL2 ohne sperrbaren Freilauf ist noch notwendig, um bei reinem Tretbetrieb ohne Motor diesen nicht mitschleppen zu müssen.

Das Konzept ist jetzt für ein Pinion-ähnliches Getriebe beschrieben. Nochmals etwas kompakter, aber weniger flexibel wären Planetengetriebe im Stile Speedhub im Tretlager. Denkbar wäre wahrscheinlich auch ein Hinterradantrieb mit einem auf das Ritzel wirkenden Motor und einem modifizierten Speedhub-Getriebe. Das müsste nur sehr kompakt gebaut werden. Auch hier vereinfacht sich viel, wenn die Rückspeisung entfallen kann.