Über das Fahrrad

Teil 2: Das Ebike

Volker Jentsch
<http://www.volkerjentsch.de>

Mai 2022, ergänzt im Februar 2025

Elektrisiert. Wer vor holperigen und steilen Wegen im Bergland nicht scheut, sich aber auch nicht verausgaben will, wird das Ebike als einen echten Gewinn und unverzichtbares Gefährt bezeichnen. Wer vorwiegend in flachem, wenig windanfälligen Gebiet unterwegs ist, wird das enorme Gewicht des Rades, die unüberhörbare Geräuschkulisse des Motors und vor allem die schwer zu überwindende Schwelle von $v = 25 \text{ km/h}$ abschrecken. Deshalb: wenn $v < 25 \text{ km/h} \Rightarrow \text{top}$; wenn $v > 25 \text{ km/h} \Rightarrow \text{flop}$.

1 Elektrifiziert

Das elektrifizierte Fahrrad (Ebike) ist ein Segen, wenn es um die Beförderung von Kindern, Hunden oder schwergewichtigen Einkäufen geht. Es kann abgasfrei im Stadtverkehr mithalten. Im Unterhalt ist es billig, und die Energiebilanz ist günstig: mit einer Kilowattstunde schafft es in flachem Gelände (ohne Anhänger) problemlos hundert Kilometer. Es benötigt minimalen Parkplatz. Und da es nur dann Leistung entfaltet, wenn sich auch Fahrer/ Fahrerinnen mit eigenem Beitrag beteiligen, fördert es bei diesen Gesundheit und Wohlergehen.

Keine Frage: Ebikes erfreuen sich inzwischen großer Beliebtheit. Wurden 2013 in Deutschland 0.4 Millionen verkauft, sind es laut *statistica* 2022 mehr als zwei Millionen. Der gesamte Bestand wird inzwischen auf elf Millionen geschätzt. Vor allem bei älteren Leuten ist das Ebike das Mittel der Wahl, um mit aufrechtem Rücken, geraden Armen und niedriger Trittfrequenz größere Strecken zurück zu legen. Und sie erfreuen sich zunehmender Beliebtheit bei jungen Eltern, die ihre Kinder statt im Auto, im überdachten Anhänger in den Kindergarten bringen. Und in den Städten sieht man verbreitet Leute auch mittleren Alters, die ihre wöchentlichen Einkäufe im Lastenrad nach Hause schaffen.

Ich erinnere an Frau *A* und Mann *B*, die ambitionierten Radfahrer, die den Teil 1 des Artikels begleitet haben und nun auch im Teil 2 dabei sein werden. Sie haben vor drei Jahren ihr leichtes Bergfahrrad gegen ein gewichtiges Ebike getauscht. Schweren Herzens, wissend, dass alles sein Für und Wider hat. Das klassische Fahrrad ist hinsichtlich Wirkungsgrad, Umweltverträglich-

keit und Preis-Leistungsverhältnis unschlagbar. Aber sie sind jetzt 75 Jahre alt und Jahrzehnte lang Rad gefahren. Das wollten sie beibehalten, und ihre Ausflüge in die Bergwelt der näheren und fernerer Umgebung auch weiterhin mit dem Rad absolvieren. Aber nicht Gefahr laufen, sich dabei zu verausgaben. Sie brauchten also ein gewisses Maß an Unterstützung. Und darum war das Ebike genau das richtige. Überdies löste es auch das Problem, dass A als die Schwächere, mit ihrem Mann, dem bislang Stärkeren, oft nicht mithalten konnte. Etwas mehr Unterstützung, und schon war sie am Mann vorbei. Die Schwächere dem Stärkeren voraus – ein Traum für Weltverbesserer!

Übrigens hat A mit $m_A = 50\text{ kg}$ ihr Gewicht gehalten, während B auf Anraten und mit Hilfe seiner Frau das seine auf $m_B = 75\text{ kg}$ verringern konnte. Dazu kommt das Gewicht der Räder; die bringen mindestens 25kg auf die Waage, so dass $m_A = 75\text{ kg}$ und $m_B = 100\text{ kg}$.

In flachem Gelände überzeugt das Ebike nicht. Wenn der Wind nicht gerade heftig von vorne bläst, sind Geschwindigkeiten über 25 km/h schnell erreicht; und alles, was darüber hinausgeht, wird per Gesetz nicht unterstützt. Ohne Unterstützung macht das Ebiken aber keinen Spaß. Auch wenn der gelegentlich publizierte Eindruck, man trete im stromlosen Zustand gegen eine Wand, wohl etwas zu drastisch ausfällt, so ist und bleibt der wichtigste Nachteil des Ebike, dass ohne Hilfe vom Motor aus dem flinken Gefährt ein schwerfälliges Ungetüm wird, das von einem Allerwelts-Fahrrad mit Leichtigkeit überholt wird.

Das ist ein ernst zu nehmender Nachteil. Es gibt weitere, vielleicht sogar gewichtigere Probleme, die $A\&B$ nicht ignorieren können.

Der Preis. Das Ebike ist teuer. Im Durchschnitt kostet ein gutes Bergfahrrad zwischen vier und fünf Tausend Euro. Das ist mindestens das Doppelte im Vergleich zu einem sehr guten, klassischen Mountainbike. Die sogenannten SUV-Ebike, vollgefedert und u.a., mit Gepäckträger und Schutzblech versehen, sind durchaus auch noch teurer.

Das Gewicht. Das Ebike ist richtig schwer. Inklusive Akku wiegt es mindestens 25 kg , meist sogar darüber. Der 750 Watt starke Akku, ein Monster an Länge, bringt satte 4.34 kg auf die Waage. So ein Ebike ist schwerer als die Fahrräder der Großväter, erinnern sich $A\&B$, die zum Fische Angeln mit Rädern aus dicken Stahlrohren unterwegs waren. Ein gefedertes Bergfahrrad gibt es heute um die 11 kg . Schultern des Ebike, wie beim Überwinden von Treppen zum Kellereingang oft erforderlich, oder Schieben auf steilem Anstieg mit wenig wirkungsvoller Schiebehilfe, ist angesichts des Gewichts für weniger kräftige Menschen nahezu ausgeschlossen. Aus eben diesem Grunde ist auch die Verladung im oder am Auto nicht einfach.

Die Geräuschkulisse. Unüberhörbar ist die beträchtliche Geräusentwicklung, das Surren und Schnurren des Bosch-Motors. Hörempfindliche und Verfechter der Stille werden sich deshalb kaum mit einem Ebike anfreunden

können. Selbst Hörgeschädigte, die regelmäßig die laute Fahrrad-Klingel überhören, drehen sich erstaunt um, wenn im Wald das widernatürliche Geräusch an ihnen vorbeifährt. Ein kundiges „Ach so“, entfährt es den Aufgeschreckten, die damit andeuten, dass er weiß, um was es sich handelt.

Der Wirkungsgrad. Jede Umwandlung einer Energieform in eine andere, sei es chemische in mechanische oder elektrische in mechanische, ist mit einem Verlust an Energie verbunden. Die Effizienz des zugrunde liegenden Prozesses, das Verhältnis von Output zu Input, wird als Wirkungsgrad η bezeichnet, mit $0 < \eta < 1$. Während η beim herkömmlichen Rad auf phänomenale 95% geschätzt wird, finden sich im Internet Hinweise, die beim Ebike von 70% ausgehen.¹ Wie weit diese Aussagen, die teilweise mit Messungen unterlegt sind, die Angelegenheit korrekt beschreiben, ist schwer zu beurteilen; insgesamt machen sie einen seriösen Eindruck. Siehe dazu Seite 6.

Doch nun zu den elektronischen Spezialitäten, die am Lenker des Ebike montiert sind. Und damit zur Firma Bosch. Es sind im Ebike-Segment die vermutlich am meisten verbreiteten; Liebhaber anderer Marken, möglicherweise auch durchaus interessanterer, mögen mir das verzeihen.

2 Spezialitäten: KIOX 300

Der neue Bordcomputer von Bosch² ist ein attraktives Gerät. Natürlich nennt er sich „smart“, und das ganze ist dann „Das smarte System“. Es besteht aus einem Display, dem *KIOX 300*³ und der per Kabel verbundenen Steuereinheit, die Bosch *LED Remote* nennt. Der Bildschirm ist auch bei Sonnenschein gut ablesbar. Die Datenfelder lassen sich inzwischen je nach Geschmack anordnen; hier soll die werksseitig eingespielte Version besprochen werden. Da die Tasten eng beieinander liegen, gerät vor allem *B* beim Tippen schnell durcheinander. Was mit behandschuhten Fingern fast zur Regel wird. Dann kann passieren, dass am Berg unabsichtlich die Unterstützung ausgeschaltet wird. Abgesehen von den üblichen Anzeigen wie Geschwindigkeit, Wegstrecke und Zeit gibt es einige Besonderheiten, die erhöhte Aufmerksamkeit verdienen.

Start-Screen Der *Start-Screen* enthält ein dynamisches Element, den elegant nach links ausholenden und dann nach rechts abbiegenden Bogen.⁴ Schon

¹siehe z.B. die Ausführungen in:

<https://fazua.com/de/support/help-center/fazua-ride-60/ride-60-faqs>

oder die Diskussion in:

<https://akkudoktor.net/t/wirkungsgrad-eta-eines-modernen-ebike-sytems/14508>: Die Effizienz des Motors soll bei 90-95% liegen. Die übrigen 10-20% gehen auf das Konto von Elektronik und Getriebe.

²siehe z.B. <https://www.bosch-ebike.com/de/produkte/kiox>

³Im folgenden einfach mit *KIOX* adressiert. Der Vollständigkeit sei erwähnt, dass es inzwischen auch das *KIOX 500* mit größerem Display gibt.

⁴Dem Vernehmen nach wird der Bogen wohl auch als Schnecke bezeichnet. Ich sehe da keinen Zusammenhang.

beim ersten Tritt in die Pedale steigt die Säule in dem Bogen, vergleichbar mit dem Quersilber im Thermometer, wenn es ins heiße Wasser gehalten wird. Die Säule ist gefärbt; die Farbe entspricht der jeweiligen Unterstützungsstufe, grün für *Eco*, blau für *Tour*, rot für *Turbo*. . . Eigene Leistung und Leistung des Motors werden mittels Schattierung und Reihenfolge voneinander getrennt: der vordere Teil repräsentiert die eigene, der hintere die Motorleistung, erkennbar am hellem respektive dunklem Grün im *Eco* und entsprechend in den anderen Leistungsstufen.

Fitness-Screen Im *Fitness-Screen.1* werden die aktuell gemessene eigene Leistung und Trittfrequenz graphisch und numerisch angezeigt. Im *Fitness-Screen.2* geschieht dasselbe für die jeweiligen Durchschnittswerte, ermittelt vom Zeitpunkt des Starts bis zur Beobachtung. So lassen sich mit Formel (13) aus Teil 1 das aktuelle und durchschnittliche Drehmoment errechnen. Offenbar geht nicht nur die aktive Phase des Radfahrens in den Durchschnitt ein, sondern auch die passive, wenn das Pedal ruht, aber Geschwindigkeit angezeigt wird, wie zum Beispiel beim Bergab und Ausrollen.⁵

Das ansprechende textitKIOX, in dem die Daten wachsen, ist das eine; die Interpretation der Daten ist das andere. Und da haben *A&B* eine Reihe von Ungereimtheiten entdeckt, die im Folgenden diskutiert werden. Aber zunächst der Schwenk zum Motor.

Motor. Beim *Performance Line CX*-Modell gibt es die wohlbekanntesten vier Leistungs-Stufen ($q_i, i = 1, \dots, 4$). Die (maximale) Zugabe der untersten Stufe (*Eco*) beträgt 60%. In der obersten (*Turbo*) liegt diese sogar bei phänomenalen 340%. Die mittlere Stufe (*Tour*) ist mit 140% gelistet, was auch bei steilen Auffahrten meist völlig genügt. Die *eMTB* genießt eine Sonderstellung; die Unterstützung ist nicht konstant, sondern adaptiv; sie erhöht sich bis hin zu den 340% im Turbo. Die Prozentzahlen beziehen sich auf die eigene Leistung.

Leistung via Start-Screen Zurück zum *KIOX*. Frau *A* beobachtet den *Start-Screen*.

Beispiel 1

Sie wählt den *Tour*-Modus und tritt in die Pedale. Zu Beginn meldet sich der Motor, die eigene Leistung ist noch unsichtbar. *A* beschleunigt mit 80 Umdrehungen, die Säule schießt nach vorn, schafft die erste Biegung der Röhre und zieht sich, sobald *A* mit konstanter Geschwindigkeit fährt, ein gutes Stück weit zurück und verharrt dort – mit einem Anteil von Blau, der sehr viel größer ist als der von Hellblau. *A* folgert:

⁵Neuerdings gibt es auch die Möglichkeit, die Herzfrequenz über eine Bluetooth-Verbindung anzeigen zu lassen. Dafür ist dann allerdings ein Gerät erforderlich, das die Frequenz misst, wie z.B. ein Brustgurt. Außerdem verdient Erwähnung, dass das *KIOX* gegen das Smartphone getauscht werden kann, so dass mit Hilfe der *eBike Flow App* von Bosch Routenplanung und andere nützliche Dinge erschlossen werden. Zum *KIOX* gibt es zahlreiche Beiträge im Netz, die sich den verschiedenen Möglichkeiten widmen, das Gerät nach eigenem Gusto zu gestalten.

- (1) der Motor liefert, bevor meine Leistung angezeigt wird;
- (2) der Anteil des Motors übertrifft die eigene Leistung deutlich.

Beispiel 2

B wiederholt das Experiment mit der Unterstützungsstufe *Eco*. Auch hier dominiert zu Anfang der Motor, dann wird die eigene Leistung im hellen Grün sichtbar. Wenig später füllt sich der halbe Bogen. Das helle Grün dominiert das dunkle, aber sollte es nicht doppelt so lang sein? Denn *Eco* erlaubt maximal eine Zugabe von 50% zur eigenen Leistung (siehe „Fitness Screen“).

Beispiel 3

Im zweiten Versuch will er den Bogen im Display ganz auszufüllen. Mit einer beherzten Beschleunigung gelingt das; den Bogen mittels *Eco* gefüllt zu *halten*, gelingt ihm jedoch nicht – das wohl nur den Profis, und auch denen sicher nur für kurze Zeit. Auch hier halten sich der Anteile von eigener zu fremder Leistung die Waage, befinden sich also nicht in Übereinstimmung zu der theoretischen Leistungsverteilung.

Beispiel 4

B strengt sich an und kommt über die 25 km/h - Schwelle hinaus. Das fällt schwer, sehr schwer, ruft er seiner Frau zu und erkennt, dass die Säule nur noch aus hellgrün besteht. Der Motor hat nicht nur gefühlt, sondern auch der Farbe nach abgeschaltet! Also hier alles richtig.

Zusammengefasst: Die Graphik erlaubt verblüffend schnell, einen Überblick über die Anteile der Leistung aus Motor und Nutzer zu gewinnen. Weitergehende Schlüsse, die Anteile des Motor mit den Unterstützungsstufen in Einklang zu bringen, scheinen dagegen eher gewagt.

Leistung via Fitness-Screen. Über die *ebike-Flow App* von Bosch (siehe oben) wird vom Handy zum *KIOX* geschaltet. Die App ermöglicht, die vier Leistungsstufen feiner zu dosieren. Die Stufenfaktoren nähern sich in fünf äquidistanten Schritten der nächsten Stufe:

$$d_1 = 0.2, d_2 = 0.4, \dots, d_5 = 1.$$

Entsprechend verändert werden können auch die Drehmomente.⁶ Die momentane Gesamtleistung P setzt sich zusammen aus eigener Leistung plus Motorleistung. Dazu muss die gewählte Unterstützungsstufe $q_i, i = 1, \dots, 4$ (im Display angezeigt) mit dem vorab in der *Flow-App* vereinbarten Stufenfaktor $d_j, j = 1, \dots, 5$ multipliziert und zur 1 addiert werden. Das Ergebnis ist der Verstärkungsfaktor f , so dass die Leistung des Systems (Motor plus Fahrer):

$$P_{System} = P_{eigen} f_{i,j} \tag{1}$$

$$f_{i,j} = 1 + q_i d_j, i = 1, \dots, 4, j = 1, \dots, 5 \tag{2}$$

Da im *Fitness-Screen* die eigene Leistung P_{eigen} angegeben wird, kann zusammen mit (1) und (2), blitzschnell die gesamte Leistung P_{gesamt} , sowohl die momentane wie auch die durchschnittliche, errechnet werden. Daraus auch die Leistung des Motors. Aber stimmt das alles? Die Motorleistung P_{Motor} wird vom

⁶Warum man für die Einstellung eine App am Smartphone braucht, ist mir unklar; das hätte sich auch problemlos im *KIOX* unterbringen lassen.

KIOX explizit nicht angezeigt, eine Zahl dazu lässt sich trotz mehrmaligem Rauf- und Runterschalten des *KIOX* nicht entdecken. Ein Schelm, der böses dabei denkt! Gemäß (1) und (2) sollte sie $q_i d_j P_{eigen}$ sein. Ein einfacher Feldversuch bietet die Möglichkeit, die Relation zu überprüfen.

Beispiel 5

B manövriert sein Rad bei $13^\circ C$ und weitgehend gleichbleibender Steigung, Geschwindigkeit und konstanter Trittfrequenz ($70/min$), unter absichtlicher Vermeidung von Beschleunigungsspitzen, auf einen Berg. Fahrzeit und Strecke, sowie die durchschnittlich erbrachte eigene Leistung, entnimmt er dem *KIOX*, die Höhendifferenz dem *Garmin-GPS*. Natürlich hatte er auch, um nichts auszulasen, nochmals sein Gewicht kontrolliert und das Fahrrad an eine elektronische Waage gehängt. Alles im Lot, das Gesamtgewicht von 105 kg hatte Bestand. Die geleistete mechanische Energie errechnet er anhand von (8) aus Teil 1. Das Resultat: $Q = P_{mech}/P_{system} = 1.2$. Er wiederholt das Experiment mehrere Male, wechselt dabei auch die Unterstützungsstufe von *Eco* zu *Tour* – mit dem Ergebnis, dass $Q \approx 1.1$. Angesichts der Ungewissheiten, sei es das Einhalten der Unterstützungsstufe oder die Fehleranfälligkeit der Durchschnittsrechnung, sind die Unterschiede akzeptabel. Allerdings ist die Differenz ein Hinweis, dass der Anteil der Motorleistung größer ausfallen dürfte, als in den Angaben von Bosch suggeriert wird.

Noch einmal: der Wirkungsgrad. Im Besitz der (theoretischen) Motorleistung, wie aus (2) erhalten, kann diese der Akkuleistung gegenüber gestellt werden, die bei der *Tour* benötigt wurde. Diese ergibt sich aus dem Energieverbrauch, der im *KIOX* als prozentuale Minderung der Ausgangskapazität angezeigt wird. Hier soll davon ausgegangen werden, dass angesichts der relativ geringen Anzahl von Entladungen die ursprüngliche Kapazität von 750 Wh Bestand hat, also die Entnahme von 7.5 Wh einer Kapazitäts-Minderung von $\approx 1\%$ entspricht. Somit ergibt sich, theoretisch zumindest, ein Wirkungsgrad, der im Bereich von $\eta = 50 - 60\%$ liegt, mal darunter, mal ein wenig darüber. Das ist ein Wert, der in der Literatur auch für Elektroautos veranschlagt wird, aber weit entfernt ist von der Zahl, die auf Seite 3 mit $70 - 80\%$ angegeben wird. Um diese zu erreichen, müsste die Motorleistung um den Faktor 1.4 erhöht werden. Aber dann würde die schöne Theorie in sich zusammenbrechen, das im *KIOX* vereinbarte Verhältnis von Eigen- und Motorleistung über den Haufen geworfen.⁷ Eine Klärung der Angelegenheit könnte nur Bosch herbeiführen, doch die wollen nicht (siehe Anhang.2).

Kalorien. Sportler wollen den eigenen Energieverbrauch wissen. Und der wird üblicherweise in Kalorien angegeben.

Beispiel 6

A multipliziert ihre durchschnittliche Leistung, die sie im *Fitness-Screen.2* sieht,

⁷Dies ist zweifellos ein unwillkommenes Ergebnis. Um die Aussage sicherer zu machen, müsste die Energien, Akku wie Motor, als Zeitreihe ausgegeben und der Mittelwert durch Summierung der Werte gebildet werden.

mit der Zeit T und erhält ihren Energieverbrauch W_{eigen} . Sie vergleicht diesen mit dem Kalorienverbrauch aus *Trip-Screen.2*. Doch auch hier wollen die Zahlen nicht zueinander finden. Die in Kalorien umgerechnete eigne Arbeit ist gerade halb so groß wie der im *KIOX* angezeigte Wert. Bosch sagt dazu: Es handele sich bei den Kalorien um eine relativ komplizierte Formel, die in der Sportwissenschaft gang und gäbe sein soll, in welcher der Energieverbrauch aus Leistungs- und Grundumsatz errechnet wird.

Merkwürdigkeiten. Was *A&B* noch so ausfällt, ist hier zusammengefasst.

1. Bei Bosch liest man: es wird *bis zu 60%* (*Eco*) oder *bis zu 140%* (*Tour*) der eigenen Leistung spendiert. Das würde für eine variable, nicht nur von der Eigenleistung des Fahrers, sondern auch von Motorleistung oder Drehmoment bestimmten Unterstützung sprechen, die zum Beispiel von 0 bis zum Maximum der Unterstützungsstufe, vielleicht auch darüber geht. Aufklärung dazu wird abgelehnt.
2. In Kooperation von Mensch-Maschine kann selbst im *Eco*-Modus schnell mal auf 300 *W* beschleunigt werden, ein Wert, der auch für Radprofis eine durchaus respektable Leistung darstellt. *A* würde mit dieser Leistung eine Steigung von $\approx 10\%$ mit einer Geschwindigkeit von 15 *km/h* bewältigen können.
3. Bosch-Motoren begrenzen die Unterstützung durch den Motor auf 250 *W*. Andererseits spendiert der Motor ein maximales Drehmoment von 95 *Nm*. Wie passt das zusammen? Würde *B* ordentlich in die Pedale treten, schnell eine Trittfrequenz von $f = 80/min$ erreichen, würde eine Leistung von 795 *W* benötigt (siehe Teil 1). Und da die Beschleunigung flüssig von statten geht, ist zu vermuten, dass der Motor im *Turbo*-Betrieb deutlich mehr als 250 *W* beisteuert, vorausgesetzt, die Grenzgeschwindigkeit von 25 *km/h* wird nicht überschritten.
4. *A* verweist darauf, dass mit großer Wahrscheinlichkeit die Akkuanzeige im *KIOX* nicht linear zu sein scheint. Die letzten zehn Prozent der Kapazität sind im Nu verbraucht, jedenfalls lassen sich merklich weniger Kilometer bewältigen, als zum Beispiel zwischen zwanzig und zehn Prozent Anzeige. Durchaus nachvollziehbar, assistiert ihr Mann. Und erinnert daran, dass die Ermittlung der aktuellen Akku-Kapazität, um halbwegs genau zu sein, der Akku jeweils vollständig entladen und die entnommene Ladung gemessen werden müsste.

3 Reichweite

Diese ist beim Ebike von fundamentaler Bedeutung, hat man es doch – wie schon oben ausgeführt – mit einem schwerfälligen Esel zu tun, wenn die Batterie leer ist. *KIOX* offeriert im *Reichweiten-Screen* entsprechend Abschätzungen, die Strecken, aber nicht den wahren Verbraucher, und das sind die Höhenmeter, anzuzeigen. *A&B* sind Bergfahrer, interessieren sich also eher für diese Angabe. Sofern bei hinreichend großer Steigung die Hubarbeit dominiert, kann mit weniger Unterstützung mehr Höhe erreicht werden. Es gilt unter der Annahme, dass (1) und (2) den Energiemix aus eigener und Motorleistung im wesentlichen richtig beschreiben:

$$\frac{\Delta h_{max}(q_i)}{\Delta h_{max}(q_j)} = \frac{(1 + q_i)q_j}{(1 + q_j)q_i} \quad (3)$$

und analog für die verbrauchte Akku-Energie E_{Akku} :

$$\frac{\Delta E_{Akku}(q_i)}{\Delta E_{Akku}(q_j)} = \frac{(1 + q_i)q_j}{(1 + q_j)q_i} \quad (4)$$

Wenn etwa B mal mit 60% Unterstützung ($i = 1$) und mal mit 340% Unterstützung ($j = 4$) fährt, würden sich die maximal erreichbaren Höhendifferenzen verhalten wie

$$\Delta h_{max}(0.6) : \Delta h_{max}(3.4) = 2.3 : 1, \quad (5)$$

aber deutlich weniger als das vermutete Verhältnis von $5.7 : 1$.⁸

Die gelegentlich geäußerte Vorstellung, dass der Bergfahrer, der mit höherer Unterstützung schneller den Pass erreicht, weniger Akku-Energie verbraucht, als der langsamere, der später eintrifft, ist falsch: aus (3) folgt naturgemäß $\Delta E_{Akku}(i)/\Delta E_{Akku}(j) < 1$, sofern $i < j$. Auch erweist sich die Annahme, dass sich die verbrauchten Akku-Energien wie $q_i : q_j$ verhalten, als irrig; der Grund dafür ist, dass sich die Gesamtenergie aus dem selbst erbrachten und dem entnommenen Anteil zusammensetzt; und diese verhalten sich wie $1/q_i : q_i/(1+q_i)$. Die Herleitung dieser einfachen Beziehungen ist im Anhang dargestellt.

B macht folgende Angaben zur Reichweite: Mit der $750 Wh$ Batterie bewältige ich ziemlich sicher 2000 Höhenmeter, die über eine Strecke von etwa $70 km$ verteilt sind. Davon fahre ich die Hälfte auf Waldwegen im Verhältnis von $1/3$ als *Tour* und $2/3$ als *Eco*. Der Stufenfaktor steht jeweils auf $d_4 = 0.8$. Die reine Hubarbeit würde $555 Wh$ betragen; vermindert um den eigenen Beitrag, vermehrt um die Energien, die mit Reibung, Beschleunigungen und den schwer kalkulierbaren Verlusten durch Motor und Getriebe zu tun haben (siehe oben).

⁸ *Aufgabe*: Die Strecke s^* sei $5 km$ lang und steige mit durchgängig 10%. Zwei Fahrerinnen (F_1 und F_2) mit jeweils $75 kg$ (inklusive Fahrrad) machen sich auf die Reise. F_1 fahre mit 60% Unterstützung den ersten Kilometer, und mit 120% die restlichen Kilometer; F_2 dagegen mit 80% die ersten zwei, und mit 110% die restlichen Kilometer. Wie viel Akku-Energie (theoretisch) verbleiben den beiden, wenn sie nach $5 km$ oben angekommen sind, sofern nur die Hubarbeit von Bedeutung ist?

4 Das neue *KIOX*

A&B sind der Ansicht, dass ihre Beschäftigung mit dem aktuellen *KIOX* nicht folgenlos bleiben sollte. Sie plädieren für eine Erweiterung des bestehenden Systems. Die würde dann auch spezielle, gleichwohl naheliegende Wünsche erfüllen. Ein Smartphone wäre dafür nicht erforderlich. Ihr Vorschlag:

- *KIOX.1* ist der „Consumer“- Artikel, also das aktuell angebotene Modell.
- *KIOX.2* wendet sich an alle, die aus ihren Daten herausholen möchten, was in ihnen steckt. Das erfordert die Speicherung der Daten als Zeitreihen, bestehend aus eigener Leistung und Motorleistung, Geschwindigkeit und Akkuverbrauch, die heruntergeladen und auf dem Computer weiterverarbeitet werden.
- *KIOX.3* ist das Top-Modell der *KIOX*-Reihe. Es ist um GPS-Funktionen erweitert. Dann können, unter anderem, streckenbezogene Leistung, Höhenmeter und Akkuverbrauch zusammengebracht werden.

5 Rekuperation

Straßenbahn, Bundesbahn und die neuen E-Autos gewinnen Energie aus den Bremsvorgang zurück. Warum nicht auch beim Ebike?

Bergab kann der Elektromotor, der aus elektrischer Energie mechanische macht, zum Generator werden, der den Prozess umkehrt: aus mechanischer wird elektrische Energie. Ein Teil davon kann in die Batterie eingespeist werden, ein anderer Teil geht vermutlich verloren. Bosch hat sich auf den Mittelmotor festgelegt, was zur Folge hat, dass der Motor beim Bergab nicht angetrieben wird. Nun ist nicht ausgeschlossen, dass die findigen Ingenieure bei Bosch irgendwann den Motor zum Generator umschalten können, ohne das Freilaufprinzip aufgeben zu müssen. Deshalb ist es sinnvoll, die Energiemengen abzuschätzen, um die es bei der Rückgewinnung geht. Die vom Akku gependete Energie ist, unter Berücksichtigung von (2) aus Teil 1, am Ende der Auffahrt über die schiefe Ebene mit Neigung α und Weglänge s^* (siehe Anhang.1):

$$W_{akku} = \frac{f}{1+f}(K_G + K_R + K_L^\uparrow)s^* \quad (6)$$

wobei f der Unterstützungsfaktor aus (1) ist. Wird der gleiche Weg bergab genommen, ist am Ende der Abfahrt der Energiegewinn

$$W_\downarrow = (K_G - K_R - \kappa v_\downarrow^2)s^* \quad (7)$$

Soll bei der Abfahrt Energie gewonnen werden, muss die Geschwindigkeit $v_\downarrow$ entsprechen dosiert werden. Sei also $W_\downarrow$ potentiell rekuperierbar. Zunächst gilt: je mehr Energie verbraucht wurde, umso mehr kann auch zurückgeführt werden. Sie sollte, um den Wirkungsgrad zu maximieren, mindestens gleich, womöglich

sogar größer als W_{akku} sein, um Verluste bei der Einspeisung abzufangen. Das hat zur Folge, dass $v_{\downarrow}$ so eingestellt wird, dass

$$0 \leq \kappa v_{\downarrow}^2 \leq K_G/(1+f) \quad (8)$$

unter der vereinfachenden Annahme, dass $K_G + K_R + K_L^{\uparrow} \approx K_G$ und $K_G - K_L^{\uparrow} \approx K_G$. Erwartungsgemäß sagt (8), dass die vorzugebende Abfahrtgeschwindigkeit logischerweise vom Grad (f) der Unterstützung bei der Auffahrt abhängt – je weniger Energie entnommen wurde, umso weniger kann zurückgeführt werden, und umso höher kann $v_{\downarrow}$ eingestellt werden. Im Grenzfall geht v gegen v_{∞} (siehe (16) in Teil A), gleichbedeutend mit der Tatsache, dass gar keine Energie entnommen wurde. Dann sind wir wieder beim Normal-Fahrrad, zur Freude der „ehrlichen“ Radler.

Für große Höhendifferenzen, gleichbedeutend mit hohem „Akku-Verbrauch“, kann sich die Rückgewinnung also durchaus lohnen. Wobei zu bedenken ist, dass der tatsächliche Verbrauch, wie unter ausgeführt, durch System-interne Verluste (Wirkungsgrad!) deutlich höher liegt, insofern die Formeln (6) und (7) um diese ergänzt werden müssten. Was gleichwohl den Anreiz verstärkt, Energie zu reкупerieren. Nur sollte die dafür erforderliche Geschwindigkeit nicht zu klein geraten. Dann würde man um die Freude gebracht werden, die mit einer schnellen Abfahrt verbunden sein kann.

6 Ebike versus Bike

Böse Blicke, wenn nicht derbe Beschimpfungen riskierten *A&B*, wenn sie am Berg den gestählten Profi-Biker auf seinem super leichten Bergfahrrad überholen. Aber diese Reaktionen haben inzwischen nachgelassen. Das Ebike gehört zum Verkehr. Gelingt es, den schwer atmenden Normalfahrer im Anstieg zu überholen, hört man ein „Ach so“ oder „na ja“ oder „hatte ich’s mir doch gedacht“. Manchmal geht es aber auch richtig freundlich zu, wie in folgendem Beispiel. Ein 76-jähriger Bergfahrer aus der Schweiz, man nenne ihn *C*, bezeichnete sein Gefährt, weil blank und ohne Motor, als „ehrlich“. Er war der Ansicht, die von vielen geteilt wird, dass das Ebike ein Selbstläufer sei. *B* sieht sich die Angelegenheit etwas genauer an und vergleicht die Leistungsbilanzen für Räder mit und ohne Motor.

Beispiel 7

Das Rennrad von *C* wiege 10 kg , also 15 kg weniger als das Ebike von *B*. Ansonsten sollen die beiden gleich schwer sein (75 kg). Die Aufgabe bestehe darin, eine Höhendifferenz von 1000 m mit einer kontinuierlichen Steigung von 6% zu überwinden, was einer zu durchfahrenden Strecke s^* von 16.67 km entspricht. Reibungs- und Luftwiderstands-Kräfte (siehe Teil 1) seien klein gegen den Hangabtrieb.

Der durch den Aufstieg verursachte Zuwachs an potentieller Energie („Hubarbeit“) beträgt für *B*: 277 Wh und (wegen des geringeren Gewichts) für *C*: 236 Wh . Damit *B* nicht mehr Energie als *C* verausgibt, müsste er sein Gewicht auf das von *C* reduzieren. Das gelingt durch die Unterstützung vom Motor schon

bei Verwendung der *Eco* Stufe, wenn etwa $d_1 = 0.2$ gesetzt wird. Die Unterstützung resultiert also, vereinfachend gesprochen, in der Reduktion des auf der Straße anliegenden Gewichts.

Entsprechendes gilt für den Vergleich der Geschwindigkeiten bzw. Leistungen. *B* fährt im Schnitt mit 13 km/h , was laut (4) und (5) aus Teil 1 einer Leistung von 216.7 W entspricht. Würde *C* mithalten wollen, müsste er eine Dauerleistung von 184 W erbringen. Mehr will auch *B* nicht investieren. Folglich aktiviert er *Eco* mit $d_1 = 0.2$ (was ihm nur unter Zuhilfenahme seines Smartphones gelingt, auf dem die aktuelle App installiert ist). Dann sind Leistung und Geschwindigkeit der beiden gerade gleich. *B* hätte so lediglich den Gewichtsvorteil ausgeglichen, dessen sich *C* aufgrund des leichteren Fahrrads erfreut. Doch warum schwer, wenn es auch noch leichter geht? *B* geht bis an die Grenze des *Eco*-Modus, bekommt somit 60% geschenkt und muss selbst nur mehr 135 W aufbringen, eine Leistung, die er eineinhalb Stunden mit einer Geschwindigkeit von 13 km/h ganz gut durchhalten kann. *C* ist allerdings schnell am Ende seiner Kräfte und reduziert mit Hilfe der Ketten-Schaltung ebenfalls auf 135 W , fällt aber aufgrund der nun geringeren Geschwindigkeit zurück. *B* ist 15 Minuten früher und sicher auch entspannter am Ziel. *C*, zunächst ungläubig, lässt sich anhand der Daten überzeugen.

Also Vorsicht, Normal-Fahrer! Unter durchaus realistischen Bedingungen könnte der Ebiker gleiche oder größere Leistung als die „Ehrlichen“ erbringen, und hätte den Vorteil, dass er diese am Berg überholt. Nicht wenige sind darunter, vor allem ältere Jahrgänge, die sich mit schmerzverzerrtem Gesicht, oftmals kaum schneller als Fußgänger, den Pass herauf quälen, wo sie dem vorsorglich bereitgestellten Rettungssanitäter in die Arme fallen.

7 Zukunft des Ebike

Zwei Verbesserungen sind dringend erforderlich – am Ebike selbst, aber auch bei den gesetzlichen Vorschriften.

- Bei leerem Akku sollte das Ebike dem herkömmlichen Fahrrad in etwa ebenbürtig sein, was darauf hinausläuft, dass der Motor samt Getriebe komplett ausgekoppelt werden müsste. Offenbar gibt es solche Lösungen, aber diese verharren dem Vernehmen nach in einer schwer zu entdeckenden Nische. Die industrielle Massenproduktion versucht, durch höhere Akkukapazitäten den leeren Akku zu vermeiden. Die technisch anspruchsvollere Lösung sollte darüber nicht vergessen werden.⁹
- Die Geschwindigkeitsbegrenzung von 25 km/h ist nicht zeitgemäß. Sie sollte zumindest auf eine Geschwindigkeit angehoben werden, die innerorts immer häufiger angewendet wird, und das sind 30 km/h . Welche Lobby ist am Werk, um das zu verhindern? Überdies hätte die Erhöhung der

⁹Die Firma *Fazua* aus München hat Antriebssysteme entwickelt, die ihren (leisen) Motor oberhalb von 25 km/h automatisch vom Getriebe trennen. Es ist ein offenes System, bei dem das Update des Motors selbst vorgenommen werden kann.

unterstützten Geschwindigkeit den Vorteil, dass (noch) mehr, vor allem berufstätige Menschen, zum Ebike greifen, mithin der Stadtverkehr der Zukunft im großen und ganzen Fahrrad-basiert, ziemlich leise und weitgehend abgasfrei, dahinrollen könnte.

- Rekuperation sollte zum Thema werden. Energie sparen ist angesagt, gerade auch bei denen, die für die Bergauffahrt viel davon verbrauchen, die sie bei langer Abfahrt, wenigstens zum Teil, wieder zurückholen könnten.

8 Résumé

Aus meiner Sicht ist das Ebike eine hervorragende Erfindung. Wie angenehm ist es doch, wenn die Kräfte bei langer Bergfahrt nachlassen und die nächste Unterstützungsstufe dem Gefährt neuen Impuls verleiht. Das Prinzip überzeugt: den Motor je nach Vermögen helfen zu lassen, ohne selbst untätig zu sein. So bleibt genügend Wahrnehmung für Wald und Wild, Blüten, Büsche und Bäume.

Vor allem aber vermittelt das Ebike eine neue Erfahrung: was elektrische Energie, in mechanische umgeformt, im wahrsten Sinne des Wortes zu Wege bringen kann. Mit nur 500 Wh können wir hohe Berge erklimmen und lange Distanzen zurücklegen! Es ist diese halbe Kilowattstunde, die unser Herd in weniger als einer halben Stunde verbrät. Dennoch gibt es einiges zu verbessern. Anstatt, unter anderem, immer größere Akkus einzubauen, sollte in erster Linie der Wirkungsgrad verbessert werden.

Nichtsdestoweniger gilt: Das Gerät ohne Motor, das unverfälschte, klassische oder „ehrliche“ Fahrrad, ist hinsichtlich Wirkungsgrad, Umweltverträglichkeit, Preis, Gewicht und Ästhetik das beste, was die Technik im unteren Geschwindigkeitsbereich zur Fortbewegung geschaffen hat. Es ist das Mittel der Wahl für die Jüngeren und Fitteren, egal ob bergauf oder bergab, in der Stadt und mit einem Kind hintendran.

9 Anhang.1

Herleitung von Gleichung (2). Setzt man für E_a die obere Grenze 750 Wh ein, dann ist die theoretisch erreichbare Höhendifferenz (in Metern): $\Delta h < \Delta h_{max} = 360 * (750/Wh)/(G/kg) * (1 + q)/q$. Vergleicht man $\Delta h_{max}(q_i)$ mit $\Delta h_{max}(q_j)$, folgt Gleichung (2).

Herleitung von Gleichung (3). Wegen $P = P_e + P_a = P/(1 + q) + qP/(1 + q)$ (P =Gesamt-Leistung, q = Leistungs-Stufe, Index e =eigen, Index a =Akku) gilt unter der Annahme, dass beim echten Bergfahren die Hangabtriebs-Kräfte alle anderen Kräfte dominieren, wegen $E = Pt$ auch für die erbrachte Gesamtenergie E : $E = E_e + E_a = E/(1 + q) + qE/(1 + q)$. Der zweite Summand ist die Akku-Energie, somit gilt für Akku 1: $E_1 = q_1 E_1/(1 + q_1)$ und für Akku 2: $E_2 = q_2 E_2/(1 + q_2)$. Da zur Überwindung einer Höhendifferenz die Hubarbeit $E_1 = E_2$ erforderlich ist, ergibt sich für den Quotienten E_2/E_1 Gleichung (3). *Herleitung von (6) und (7).* Aus (6) Teil 1 und (1), (2) aus Teil 2 folgt (W statt

P) $W_{\text{Akku}} = fW_{\text{eigen}}$ und $W_{\text{eigen}} = Ks^*/(1 + f)$.

Zu (8): Hier muss nur bedacht werden, dass sich das „>“-Zeichen in ein „<“-Zeichen umkehrt.

10 Anhang.2

Imaginäre Empfehlungen der Radsport Journalisten. *A&B* bekommen einen auf Papier geschriebenen Brief. Darin steht, aufs Wesentliche zusammengefasst:

Nehmen Sie die Angaben zu Leistung und Energie, Motor und Akkuverbrauch als grobe Orientierung. Betrachten Sie diese „with a pinch of salt“! Sie verstehen? Sehen Sie: Wir produzieren für den Konsum, schaffen ein schönes Produkt, von dem wir ausgehen, dass es der ganz großen Mehrheit der User gefällt. Gerät und Software haben ihre Vorzügen und Schwächen. Das wird immer so sein. Deshalb: Hüten Sie sich vor Kaffeesatzleserei. Damit verderben Sie sich den Spaß beim Ebiken. Sehen Sie das Ganze eher spielerisch. Entdecken Sie die Stärken: jetzt können Sie sogar eine Tour voreinstellen und mit Ihrem Smartphone verfolgen! Das ist state-of-the-art! Bosch ist am Puls der Zeit. Bosch ist eine Firma mit globaler Reichweite. Und unter uns: wer will denn wissen, was genau unsere Daten sagen oder wie gut sie sind. Hauptsache, es gibt sie!

Nicht imaginäre Antwort des Bosch eBike Systems vom 10.2.25.

Wir verstehen, dass Sie gern mehr über die Unterstützung und die technischen Details unseren Systems erfahren möchten.

Wir bitten Sie um Verständnis, dass wir aus Gründen des Geschäftsgeheimnisses bestimmte Informationen nicht herausgeben können. Wir legen großen Wert auf den Schutz unserer Technologien und bieten Ihnen dennoch die Gewissheit, dass unsere Produkte höchsten Qualitätsstandards entsprechen und für ein zuverlässiges Fahrerlebnis sorgen.

Fazit: Es ist nicht alles Gold, was glänzt.