

Über das Fahrrad

Teil 2: Das E-Bike

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

Mai 2022, ergänzt November 2022

Kurzfassung

Das E-Bike ist eine vortreffliche Erfindung vor allem für Leute, die auch in höherem Alter gerne auf holperigen Wegen im Bergland unterwegs sind. In ebenem Gelände überzeugt es nicht, folglich gilt: $v < 25 \text{ km/h} \Rightarrow \text{top}$; $v > 25 \text{ km/h} \Rightarrow \text{flop}$. In vorliegendem Artikel geht es um E-Bike spezifische Aspekte, wie Leistung, Energie, Reichweite und Rekuperation. Außerdem um die elektronischen Neuerungen der Firma Bosch, die in ihren Displays viel Informationen anbieten, deren Bedeutung und Zuverlässigkeit jedoch nicht immer einsichtig sind. Insbesondere sind die verbrauchte Akkuenergie und die erbrachte eigene Arbeit mit den Regeln der herkömmlichen Physik nicht zusammenzubringen. Was zukünftige Entwicklungen betrifft, wäre die Herausforderung für den Erfindergeist, das E-Bike so zu konstruieren, dass es auch wie ein normales Fahrrad gefahren werden kann – damit nicht, wie zur Zeit unumgänglich, bei Überschreiten der Höchstgeschwindigkeit oder Akku-Ausfall, gegen den widerständigen Bosch-Motor angekämpft werden muß.

1 Einführung

E-Bikes sind ein Segen, wenn es um die Beförderung schwerer Lasten oder Kinder im Anhänger geht. Sie können nahezu geräuschlos und abgasfrei im Stadtverkehr mithalten. Im Unterhalt sind sie billig, ihre Energiebilanz ist günstig: mit einer Kilowattstunde schafft man in flachem Gelände problemlos hundert Kilometer. Sie benötigen minimalen Parkplatz. Sie sind leise. Und selbst bei höchster Motorunterstützung fördern sie die Bewegung und wirken sich günstig auf Leib und Seele aus. Keine Frage: E-Bikes sind inzwischen bei älteren Leuten¹ das Mittel der Wahl, um in der Freizeit anspruchsvollere Touren zu unternehmen .

Da sich A und B noch zu den jüngeren und leistungsstärkeren zählen dürfen, haben wir es jetzt mit Frau A^* und Herrn B^* zu tun. Die beiden sind über

¹Diese erkennt man an folgenden Merkmalen: aufrechter Rücken, gerade Arme, geringe Trittfrequenz, kleines Ritzel, höchste Motorunterstützung.

siebzig, und wiegen 50 kg bzw. 75 kg . Dazu kommt das Gewicht der Räder; die wiegen 25 kg , so daß $m_A = 75\text{ kg}$ und $m_B = 100\text{ kg}$. Sie haben Jahrzehnte lang „ehrliches“ Fahrrad gefahren und haben sich seit einigen Jahren das motorisierte Gefährt gegönnt, mit dem sie sich in bergigem Gelände an außerordentliche, sogar steinige Anstiege wagen können. So dürfen sie, von Überanstrengung befreit, schöne Umgebungen in vollem Umfang wahrnehmen. Allerdings: nur wer selbst etwas leistet, nur dem bietet der Motor Unterstützung an (die freilich vorab durch den Kauf des Rades teuer bezahlt worden ist). Und wer weniger zu leisten imstande ist, kann sogar mehr Leistung anfordern, und das quasi kostenfrei, so dass die Schwächeren mit den Stärkeren gleichauf, wenn's beliebt auch nebeneinander fahren können. Ein vernünftiges Prinzip, und ein Traum für Weltverbesserer, würde die Ökonomie der Gesellschaften ähnlich funktionieren...

Doch in flachem Gelände überzeugt das E-Bike nicht. Denn wenn nicht gerade der Wind heftig von vorne bläst, sind Geschwindigkeiten über 25 km/h schnell erreicht; alles was darüber hinausgeht, wird nicht unterstützt. Im Gegenteil! Der Widerstand des Getriebes des Elektromotors erweist sich im stromlosen Modus als Bremse und erhöht den eigenen Aufwand über Gebühr. Auch wenn der gelegentlich publizierte Eindruck, man trete im stromlosen Zustand gegen eine Wand, etwas zu drastisch ausfällt, so ist und bleibt der wichtigste Nachteil des E-Bike, dass ohne Motorunterstützung aus dem flinken Gefährt ein schwerfälliges Ungetüm wird, das von einem Allerwelts-Fahrrad mit Leichtigkeit überholt wird. Es gibt ein weiteres, gesetzlich vorgeschriebens Limit: die Unterstützung des Motors soll auf 250 W begrenzt sein. Andererseits spendiert der Motor ein maximales Drehmoment von $85 - 95\text{ Nm}$. Würde B^* bei harter Beschleunigung das Moment voll ausreizen, bei einer Trittfrequenz von $f=60/\text{min}$, würde eine Leistung von 534 W benötigt. Bei solch hohen Anforderungen ist es durchaus denkbar, dass der Motor im Turbo-Betrieb mehr als 250 W beisteuert, um eine flüssige Beschleunigung zu gewährleisten, vorausgesetzt, die Grenzgeschwindigkeit wird nicht überschritten.

Ein weiterer Nachteil des E-Bike ist dessen enormes Gewicht. Inklusive Akku wiegt es 25 kg und darüber. Das erinnert an die Fahrräder der Großväter, die mit Rädern aus dicken Stahrohren unterwegs waren. Ein motorloses Bergfahrrad wiegt heute um die 10 kg . Schultern des E-Bike, wie beim Überwinden von Treppen zum Kellereingang oft erforderlich, oder Schieben auf steilem Anstieg mit wenig wirkungsvoller Schiebehilfe, ist für weniger kräftige Menschen nahezu ausgeschlossen. Aus eben diesem Grunde ist auch die Verladung im oder am Auto nicht ganz einfach.

2 Spezialitäten bei Bosch: KIOX 300

Ich beschränke mich hier, soweit es um Marken geht, auf die Produkte der Marke Bosch, die vermutlich die am meisten verbreiteten sind; Liebhaber anderer Marken mögen mir das verzeihen.

Der neue Bordcomputer von Bosch für E-Bikes hat es mir angetan. Natürlich nennt er sich „smart“, und das ganze ist dann „Das smarte System“. Es besteht

aus einem Display, dem KIOX 300 und der per Kabel verbundenen Steuereinheit („LED Remote“). Das ganze sieht schön aus, und der Bildschirm ist auch bei Sonnenschein gut ablesbar. Da die Tasten eng beieinander liegen, gerät man beim Tippen schnell durcheinander. Was mit behandschuhter Hand fast die Regel ist. Dann passiert es, dass am Berg schnell einmal unabsichtlich die Unterstützung ausgeschaltet wird.

Mit der *ebike-Flow App* können die Leistungs-Stufen verändert werden. Die Stufenfaktoren variieren in vier äquidistanten Schritten von $d_1 = 0.2, d_2 = 0.4, \dots, d_5 = 1$. Entsprechend verändert werden können auch die Drehmomente. Warum man dazu eine App braucht, ist mir unklar; das hätte sich auch problemlos am *Kiox* unterbringen lassen. Ähnliches gilt für die Datenspeicherung, insbesondere die von der Strecke abhängige Leistung. Wozu die Zuhilfenahme der App, wenn die simple Speicherung auch von dem „smarten System“ hätte erledigt werden können. Ein GPS ließe wohl auch noch unterbringen. Man möchte den Herstellern von Smartphones nicht ins Gehege kommen, im Gegenteil – ganz nebenbei fällt auch für diese beim E-Biken noch etwas ab.



Abbildung 1: Kiox 300 nebst weiterer Instrumente

Beeindruckend ist der Start-Bildschirm. Die gebogene Kurve besteht aus zwei Abschnitten: der rechte Abschnitt repräsentiert offenbar die vom Motor erbrachte Leistung, der linke die eigene. Im „Fitness-Bildschirm“ wird dem linken Abschnitt eine Zahl zugeordnet, sie repräsentiert (nach Aussage von Bosch) die eigene, momentane Leistung (in Watt). Mich überrascht, wie leicht z.B. eine Leistung von 200 W, durchaus auch über mehrere Minuten, erreicht und gehalten werden kann. Beim Kardiologen muss ich mich auf dem Ergometer deutlich mehr anstrengen, um diese Leistung über zwei Minuten durchzuhalten. Doch wie fehlerhaft sind die angezeigten Werte? Wenn wir es streng nehmen, ist ein Messwert ohne Angabe des Fehlerbalkens nicht vertrauenswürdig.

Was den Motor betrifft, gibt es bei dem *Performance Line CX*-Modell die wohlbekanntesten vier Leistungs-Stufen ($q_i, i = 1, \dots, 4$). Inzwischen beträgt die (maximale) Zugabe der untersten Stufe (Eco) 60%. In der obersten (Turbo) liegt diese sogar bei phänomenalen 340%. Die Prozentzahlen beziehen sich auf die eigene Leistung, was allerdings erst bei Nachfrage bei Bosch herauskommt. Somit stünde in der vierten Stufe schon bei kleiner Anstrengung von nur 57 W die versprochene maximale Leistung von 250 W zur Verfügung. Es ist zu vermuten (siehe oben), dass bei mehr Eigenleistung sogar diese Obergrenze zumindest kurzfristig überschritten werden darf.

Beispiel 1. Die Anzeige der eigenen Leistung im Display motiviert unser Radler-Pärchen, blitzschnell die momentane Gesamtleistung (also inklusive Motorleistung) zu errechnen. Muss doch lediglich die von ihnen 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, mit dem die angezeigte Leistung P_{eigen} multipliziert werden muss, um die insgesamt erbrachte Leistung zu errechnen:

$$P_{gesamt} = P_{eigen}(1 + q_i d_j), i = 1, \dots, 4, j = 1, \dots, 5 \quad (1)$$

Da können in Kooperation von Mensch-Maschine schnell mal 300 W zu Wege gebracht werden, ein Wert der auch für Radprofis eine durchaus respektable Leistung darstellt. Mit dem etwa A^* , aufrecht sitzend, eine Steigung von $\approx 10\%$ mit Tempo 15 km/h bewältigen könnte. Warum nur wird diese Größe im Display nicht angezeigt? Sozusagen zur Bestätigung, dass alle unsere Überlegungen mit denen von Bosch übereinstimmen? Weil genau das sie nicht tun.

3 Rätselhafte KIOX-Daten

Beispiel 2. Die Neugier von A^* und B^* ist damit geweckt. Sie würden gern wissen, wie hoch ihre Leistung $\langle P_{eigen} \rangle$, über die gesamte Tour gemittelt, ausfällt und wie hoch die von ihnen erbrachte Energie W_{eigen} ist. Erfreulicherweise gibt das *Kiox 300* am Ende der Tour unter dem Thema „Zusammenfassung“ genau diese Informationen. Aber sind sie auch stimmig?

Herr B^* manövriert sein Rad bei gleichbleibender Steigung und konstanter Geschwindigkeit, unter absichtlicher Vermeidung von Beschleunigungsspitzen, auf einen Berg, der 700m höher liegt als sein Ausgangspunkt. Sein Akku mit 750Wh ist frisch geladen. Er möchte wissen, wieviel Energie der Motor dafür benötigt. Und diese mit der Akkuanzeige abgleichen. Was tun? Er multipliziert den vom KIOX ermittelten bzw. errechneten Wert $\langle P_K \rangle$ mit der gefahrenen Zeit T . Das Resultat sollte, zumindest näherungsweise, die von ihm verausgabte Energie W_{eigen} beziffern (siehe Teil 1 des Artikels). Bei Fahrten, wo es auf und ab geht, müsste nach den Regeln der Kunst die jeweilige Leistung mit dem dazu gehörenden Zeitintervall multipliziert und dann aufaddiert werden. Da B^* aber darauf geachtet hat, möglichst gleichmäßig zu fahren, sollte seine einfache Rechnung eine gute Näherung für seine Arbeit sein. Und jetzt der Motor. Dieser hat

einen Bruchteil davon, nämlich $W_{Motor} = W_{eigen}\gamma$ gespendet, wenn $\gamma = qd$ der gewählte Unterstützungsfaktor ist (siehe oben). B^* ist einigermaßen trainiert und gönnt sich nicht mehr als 48%. Wenn alles mit rechten Dingen zugeht, sollte $W_{Motor} \approx W_{Akku}$ sein. Weit gefehlt – der Akku hat etwa 40% mehr an Energie verloren, als die Rechnung ausweist. Wie das? Wo ist sie geblieben? Kann es sein, dass der Wirkungsgrad des Motors nur bei 60% liegt? Mehrere Fehlerquellen kommen in Frage: (1) die ausgegebene durchschnittliche Leistung ist zu niedrig; (2) der Akkuverbrauch ist zu hoch gesetzt; (3) der Unterstützungsfaktor wird nicht eingehalten. Und die wichtigste, allerdings unbekannteste Unsicherheit ist der unvollkommene Wirkungsgrad des Motors mitsamt Getriebe. B^* fragt beim Bosch Service an. Der liefert eine wahre Lawine von Energieverbrauchern. Unter anderen: Die Beschleunigung zum Erreichen der Endgeschwindigkeit sei nicht berücksichtigt. Gegenrede: Das ist ein einmaliges, kurzzeitiges Ereignis. Allerdings gibt es immer wieder kleine Geschwindigkeitskorrekturen, bei denen die Beschleunigung eine Rolle spielt, aber auch die dürften im allgemeinen Rauschen untergehen. Der Wirkungsgrad wird erwähnt, aber nicht beziffert. Ob Herr B^* ihn je erfahren wird? Verdient hätte ich das, sagt er sich, nach so viel Zahlen-Knobelei. Für ihn sind die wichtigsten Quellen der Unstimmigkeit: der Wirkungsgrad und das Unterstützungslevel. Ersterer ist unvollkommener als allgemein angenommen, und letzterer wird nicht eingehalten, könnte eher höher als niedriger sein. Und sofern nichts anderes verlautet, gilt ab jetzt, ein für allemal, als Faustformel: der Akkuverbrauch kann bis zu 50% höher sein, als die (naive) Rechnung aus den verfügbaren Daten ergibt.

Beispiel 3. Da gibt es noch ein anderes, eng verwandtes Problem. In der Zusammenfassung von KIOX gibt es einen weiteren Wert: die Energie, die zwecks Bewältigung der Tour verausgabte. Also genau die Größe, die B^* gerade errechnet hat. Nachfrage bei Bosch liefert die Aufklärung. Es handele sich um die Summe aus mechanischer und chemischer Energie, Ergebnis einer relativ komplizierten Formel, die in der Sportwissenschaft gang und gäbe zu sein scheint, in welcher der Energieverbrauch aus Leistungs- und Grundumsatz errechnet wird. Was mit einem gewissen Aufwand verbunden ist, erfordern die „Umsätze“ doch die Kenntnis verschiedener persönlicher Daten. B^* ist verdutzt. Hat er leichtfertig sein Innerstes preisgegeben? Legt man die dergestalt errechnete Eigen-Arbeit zugrunde, kommen sich Akkuverbrauch und Eigenanteil deutlich näher. Also liefert der Akku nicht nur Unterstützung bei der mechanischen Arbeit, sondern hilft dabei, dass wir am Leben bleiben? Unsinn. Die für die internen Körperfunktionen notwendige Energie wird durch Verbrennung aus den körpereigenen Ressourcen aufrechterhalten.

4 Das bessere KIOX

Aus den oben diskutierten Problemen ergeben sich folgende Vorschläge zur Verbesserung:

1. Die vom KIOX gelieferten Daten bedürfen der Interpretation. Bosch hätte gut daran getan, ein papiernes Handbuch zu spendieren, in dem präzise die

Bedeutung der angezeigten Daten, sofern nicht selbsterklärend, erläutert wird. Was im Online-Material leider nicht der Fall ist. Auch wäre es geboten, die Zahlenwerk mit einer Prise Salz zu versehen. Etwa so: Nehmen Sie die Angaben zu erbrachten Leistung und Energie als grobe Orientierung. Verfallen Sie nicht auf die Idee, diese in direkten Bezug zur verausgabten Energie des Motors zu setzen. Sie würden nichts anderes als Schiffbruch erleiden.

2. Für die Freaks sollte KIOX die Möglichkeit anbieten, im KIOX die relevanten Daten als Zeitreihe zu speichern, die nach Tour-Ende heruntergeladen und mit eigenen Programmen weiterverarbeitet werden können. Das ist bei Geräten ähnlichen Typs (z.B. Garmin) inzwischen auch fast die Regel. Ein Smartphone ist dafür nicht erforderlich.
3. Informationen zum Wirkungsgrad des Motors und den Motor-bedingten Verlusten. Um Illusionen über Reichweite etc. niedrig zu halten.

5 Reichweite

Diese ist beim E-Bike von fundamentaler Bedeutung, hat man es doch – wie schon oben ausgeführt – mit einem schwerfälligen Esel zu tun, wenn die Batterie leer ist. A^* und B^* sind Bergfahrer, interessieren sich also eher für die maximal erreichbare Höhendifferenz Δh_{max} als Funktion der Leistungs-Stufen q_i . Würde man nur die reine Hubarbeit berücksichtigen, kämen enorme (allem Anschein nach völlig unrealistische) Höhen zustande, bis der Akku leer ist. Diese sind also obere Grenzen. Sofern bei hinreichend großer Steigung die Hubarbeit dominiert, kann mit weniger Unterstüzzung mehr Höhe erreicht werden. Es gilt:

$$\frac{\Delta h_{max}(q_i)}{\Delta h_{max}(q_j)} = \frac{(1 + q_i)q_j}{(1 + q_j)q_i} \quad (2)$$

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

$$\frac{\Delta E_{Akku}(q_i)}{\Delta E_{Akku}(q_j)} = \frac{(1 + q_i)q_j}{(1 + q_j)q_i} \quad (3)$$

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

$$\Delta h_{max}(0.6) : \Delta h_{max}(3.4) = 2.3 : 1, \quad (4)$$

und nicht, wie vermutet werden könnte, wie 5.7 : 1. Gleiches gilt für die verbrauchte Akku-Energie. Immer vorausgesetzt, dass der Motor idealerweise einen Wirkungsgrad von 100% hat.

Aufgabe: Die Strecke s^* sei 5 km lang und steige mit durchgängig 10%. Fahrer sind jetzt zwei Fahrerinnen (F_1 und F_2), und sie wiegen inklusive Fahrrad jeweils 75kg. 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. Wieviel Akku-Energie verbleiben den beiden, wenn sie nach 5 Kilometern oben angekommen sind, sofern nur die Hubarbeit von Bedeutung ist?

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.

Meine persönliche Erfahrung (die eine individuelle, somit nicht verallgemeinerungsfähige ist, weil maßgeblich von Gewicht und Ausdauer sowie der Fahrweise abhängig): Mit der 750 Wh Batterie kann ich ziemlich sicher 2000 Höhenmeter bewältigen und zusätzlich 70 km Strecke fahren, davon die Hälfte auf Waldwegen. Das Ganze ist natürlich vom Gelände abhängig; im Schwarzwald halte ich ein Verhältnis von 1/3 im Tour- und 2/3 im Eco-Modus, mit einem Stufenfaktor von jeweils 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).

6 Rekuperation

Bergab kann der Elektromotor, der aus elektrischer Energie mechanische macht, zum Generator werden, der den Prozeß umkehrt und aus mechanischer elektrische Energie macht. 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 gespendete Energie ist, unter Berücksichtigung von (2) aus Teil 1, am Ende der Auffahrt über die schiefe Ebene mit Neigung α und Weglänge s^* :

$$W_{akku} = \frac{q}{1+q}(K_G + K_R + K_L \uparrow)s^* \quad (5)$$

wobei q der Unterstützungsfaktor ist. Wird der gleiche Weg bergab genommen, ist am Ende der Abfahrt der Energiegewinn

$$W \downarrow = (K_G - K_R - \kappa v \downarrow^2)s^* \quad (6)$$

Wenn am Ende der Abfahrt Energie gewonnen werden soll, kann das trivialerweise nur über $v \downarrow$ geschehen. 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 sein sollte, dass

$$\kappa v \downarrow^2 \leq K_G / (1 + p) \quad (7)$$

unter der vereinfachenden Annahme, dass $K_G + K_R + K_L \uparrow \approx K_G$ und $K_G - K_R \approx K_G$. Erwartungsgemäß sagt (7), dass die vorzugebende Abfahrtgeschwindigkeit vom Grad der Unterstützung 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_∞ aus (14) 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.

7 E-Bike versus Bike

Böse Blicke, wenn nicht derbe Beschimpfungen riskiert unser Pärchen, wenn es am Berg den gestählten Profi-Biker auf seinem super leichten Bergfahrrad überholt. Manchmal geht es aber auch freundlich zu, wie in folgendem Beispiel. Ein 76-jähriger Bergfahrer aus der Schweiz, nennen wir ihn C , bezeichnete sein Gefährt, weil blank und ohne Motor, als „ehrlich“. Er war der Ansicht, die von vielen geteilt wird, dass das E-Bike ein Selbstläufer sei. Sehen wir uns deshalb die Angelegenheit etwas genauer an und vergleichen die Leistungsbilanzen für Räder mit und ohne Motor.

Die Annahmen: Das Rennrad von C wiege 10 kg , also 15 kg weniger als das E-Bike von B^* . Ansonsten seien die beiden gleich gewichtet (75 kg). Die Aufgabe bestehe darin, eine Höhendifferenz von 1000 m mit einer kontinuierlichen Steigung von 6% zu überwinden, was einer zu durchzufahrende Strecke s von 16.67 km entspricht. Vereinfachend vernachlässigen wir Reibungs- und Luftwiderstandskräfte, die (siehe Teil 1) klein sind gegen die Kräfte der Schwere am Berg. Der durch den Aufstieg verursachte reine 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 verausgabt, müsste er sein Gewicht auf das von C reduzieren. Das gelingt durch die Unterstützung vom Motor schon im Eco, wenn etwa d auf $d_1 = 0.2$ gesetzt wird. Die Unterstützung durch den Motor resultiert also, vereinfachend gesprochen, in der Reduktion des auf der Straße anliegenden Gewichts.

Entsprechendes gilt für den Vergleich der Geschwindigkeiten bzw. Leistungen. B^* fahre im Schnitt mit 13 km/h , was laut (4) und (5) aus Teil 1 des Artikels 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 „ehrliche“ 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's 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 1.5 Stunden mit einer Geschwindigkeit von 13 km/h gut durchhalten kann. C ist allerdings schnell am Ende seiner Kräfte und geht mit Hilfe der Ketten-Schaltung ebenfalls auf 135 W, fällt aber aufgrund der nun geringeren Geschwindigkeit zurück. B^* ist 15 Minuten früher, womöglich auch entspannter, am Ziel. C , zunächst ungläubig, lässt sich anhand der Daten überzeugen. Und hätte B^* die Verluste im Motor und die größere Reibung des schweren E-Bike berücksichtigt, würde herauskommen, dass er sogar mehr geleistet hat als C . Also Vorsicht, Normal-Fahrer! Unter durchaus realistischen Bedingungen könnte der E-Bike-Fahrer gleiche oder größere Leistung erbringen, und hätte den Vorteil, dass er am Berg die meisten Normal-Fahrer überholt. Von denen, das sei nicht verschwiegen, vor allem ältere Jahrgänge sich mit schmerzverzerrtem Gesicht, oftmals kaum schneller als Fußgänger, den Paß herauf quälen, wo sie dem vorsorglich bereitgestellten Rettungssanitäter in die Arme fallen.

8 Zukunft des E-Bike

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

- Bei leerem Akku sollte das E-Bike dem herkömmlichen Fahrrad ebenbürtig sein, was darauf hinausläuft, dass das mit dem Motor verbundene Getriebe komplett ausgekoppelt werden müßte. Die industrielle Produktion versucht, durch höhere Akkukapazitäten das Problem zu vermeiden. Zugleich sollte aber die (technisch anspruchsvollere) Lösung, wie angedeutet, vorangetrieben werden: das Bike muß im stromlosen Zustand wie ein normales Fahrrad rollen.
- 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. Überdies hätte die Erhöhung der unterstützten Geschwindigkeit den Vorteil, dass (noch) mehr, vor allem berufstätige Menschen, zum E-Bike greifen, mithin der Stadtverkehr der Zukunft im großen und ganzen Fahrrad-basiert, leise und weitgehend abgasfrei, dahinrollen könnte.

9 Zusammenfassung

Das E-Bike macht das Fahren leichter, beeindruckend vor allem das enorme Drehmoment. Außerdem ist es in der Regel doppelt so teuer wie entsprechend ausgerüstete Bergfahrräder und mehr als doppelt so schwer. Gleichwohl – aus meiner Sicht überwiegt eindeutig das Positive. Erleichterung stellt sich ein, wenn die Kräfte am Berg bei langer Bergfahrt nachlassen und die Wahl der nächsten

Unterstützungsstufe das Gefährt nahezu mühelos frische Fahrt aufnehmen läßt! Es ist eben eben diese Möglichkeit, je nach Vermögen den Motor helfen zu lassen, ohne selbst untätig zu werden, mit dem Ergebnis, dass genügend Wahrnehmung bleibt für Natur, Gelände, Felder und Wälder und – für die Begleitung, sofern es sie gibt.

Vor allem aber vermittelt das E-Bike 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. Allerdings sollte die Frage der Rekuperation ernsthaft, auch bei der Welt-Firma Bosch, verfolgt werden. Erst wenn diese ermöglicht worden ist, wird das E-Bike nicht nur ein ideales Mittel der Fortbewegung, sondern zugleich auch ein idealer Umweltschützer sein. Aber schon jetzt, in noch nicht vollkommener Ausführung, dürfte der ökologische Fußabdruck einen kleinen Bruchteil im Vergleich zum Auto ausmachen. Doch das ist eine andere Geschichte.

Anmerkung: Dank geht an Karl Reichmann für zahlreiche und hilfreiche Anregungen.

10 Anhang

Herleitung von Formel (2) und (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 domieren, 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, also für Akku 1: $E_1 = q_1 E_1/(1+q_1)$ und entsprechend für Akku 2: $E_2 = q_2 E_2/(1+q_2)$. Da zur Überwindung einer Höhendifferenz die Hubarbeit $E_1 = E_2$, ergibt sich für den Quotienten E_2/E_1 Gleichung (3).

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).