

Schlussbericht Oktober 2005

E-Management-Integration

Serie Hybrid E-Fahrrad-Antrieb

ausgearbeitet durch
Fuchs Andreas
Hochschule für Technik und Informatik Bern
Quellgasse 21
2501 Biel

Sperrfrist bis 31.12.2006

Zusammenfassungen

Zusammenfassung deutsch

Hauptziel der Arbeit war die weitere Erforschung des kleinen Serie Hybrid Antriebs mit dem Ziel schlussendlich ein Produkt zu realisieren. Dieser Antrieb ist modular organisiert und empfiehlt sich für das Einbinden von Komponenten Dritter. Die Möglichkeit der Zusammenarbeit von Komponenten-Lieferanten ist interessant aus der Perspektive des Aufbau einer Zulieferindustrie für leichte und kleine Antriebskomponenten. Der Serie Hybrid ist ebenfalls sehr interessant weil aus ihm jede Fahrzeug-Konfiguration ableitbar ist: Hybride, reine Batterie-Fahrzeuge sowie Brennstoffzellen-Fahrzeuge.

Als Komponenten Dritter standen bei Projektdefinition Komponenten des Intellibike sowie, als Hochstrom-fähige Speicher, Supercapacitors im Vordergrund.

Im Laufe des Projektes erfolgte der Wechsel auf andere Komponenten als bsp. den Intellibike Motor da dieses Projekt nicht in eine Produktentwicklung mündete.

Mit dem Aufkommen von mit hohen Strömen lad- und entladbaren Lithium Polymer Zellen wurde fraglich, ob Supercapacitor Speicher (Scap) im kleinen Elektrofahrzeug eine Zukunft haben als Speicher für einmal bis zweimal seine kinetische Energie. Die Machbarkeit verschiedener Topologien des Scap Einbau wurde zwar studiert, aber mangels Nachfrage durch die Industriepartner nicht vertieft.

Zusammen mit den Industriepartnern autork, dann Brüggli und Fuchs, wurden die Antriebs-Komponenten weiterentwickelt und als Prototypen realisiert. Komponenten sind jeweils auf Leerlaufverluste hin untersucht worden da in einem Fahrrad-Serie Hybrid jedes verlorene Watt zählt!

Die Komponenten wurden in ihrem jeweiligen Entwicklungsstand in zwei Muskelkraft-Fahrzeugen, einem Laborzweirad, und einem „Digitrike“, montiert und testgefahren.

Die Bedeutung der Projektresultate für Praxis und Wissenschaft ist mehrfach: Wenn ein Muskelkraftfahrzeug mit bloss 100 bis 300 W Antriebsleistung als Serie Hybrid gebaut werden

kann so heisst dies dass die Grund-Verluste (Leerlaufverluste) sehr klein gemacht werden können. Wäre das effiziente „elektronische Getriebe“ – was der Antrieb eines Serie Hybrid ja ist - auf dem Markt persistent, sänke sein Preis.

Dadurch kann es für weitere Anwendungen erschwinglich werden, bsp. als Erstatz von ineffizienten, auf Reibung basierenden, „stufenlosen“ Getriebe der Benzin-betriebenen Zweiräder mit entsprechenden Nutzen beim Energiesparen und bei der Emissions-Reduktion.

Resumé

Le but principal du travail était de réaliser un petit entraînement hybride serie et d'arriver à un produit fini. Cet entraînement a été réalisé de manière modulaire, ceci dans le but de pouvoir y intégrer d'autres composants fabriqués par d'autres entreprises. La possibilité de collaboration entre les fournisseurs de composants est intéressante, dans la perspective du développement d'une industrie qui fournirait des composants d'entraînements légers et petits.

Une série hybride est également très intéressante du fait que la configuration de chaque véhicule peut varier : hybride, pur véhicule à batteries ou véhicule à piles à combustibles.

En tant que tierce personne, on pourrait proposer dans la définition des composants du projet de l'Intellibike, des Supercapacités ou des accumulateurs à courants élevés.

Pendant le déroulement du projet, il y a eu des changements de composants, par exemple, on ne devait pas déboucher sur le développement d'un moteur pour l'Intellibike.

Avec l'apparition de batteries au Lithium Polymère, chargeables et déchargeables avec des courants élevés, une question s'est posée. Est-ce que l'utilisation d'une batterie de Supercapacités ayant une mémoire de une à deux fois l'énergie cinétique pourrait être une solution d'avenir ?

La faisabilité de différentes topologies de montage avec de tels éléments a certes été étudiée, mais n'a pas été approfondie, faute de demande de nos partenaires industriels.

En collaboration avec les partenaires Autork, Brueggli et Fuchs, les composants de l'entraînement ont été perfectionnés et les prototypes réalisés. Les pertes à vides des sous-composants ont été analysées puisque pour un vélo hybride serie, chaque Watt perdu compte!

Les composants ont été montés et testés à chaque étapes de leurs développements sur deux véhicules à entraînements musculaires; un vélo à deux roues de laboratoire et un „Digitrike“.

La signification des résultats du projet pour la pratique et la science sont multiples:

Les pertes de base (pertes à vides) pouvant être réduites à une très petite valeur, cela signifie que l'on peut construire un véhicule à entraînement musculaire ayant seulement une puissance d'entraînement de 100 à 300W.

S'il existait sur le marché une transmission électronique efficiente et persistante, le prix de revient diminuerait encore.

De cette manière, elle pourrait être utilisée pour d'autres applications, par exemple en remplacement des transmissions à frottements inefficaces qui sont utilisées sur les scooters à l'essence et qui apporterait comme avantages, une économie d'énergie et une réduction des émissions.

Abstract

Main goal of the work was further evaluation and improvement of the small series hybrid drive with the final aim to yield a product. This drive system is modular and is suitable to be coupled with components of third parties. The possibility of collaboration between suppliers of components is interesting insofar as an industry branch for miniaturized drive component can be built up.

Too, the series hybrid is interesting because every configuration of a vehicle can be derived from it: Hybrids, pure battery driven vehicles as well as fuel cell vehicles.

At the time of project definition components of the Intellibike, as well as supercapacitors, should be implemented.

During the project however the change to other components happened since for example the industry was hesitating to transform the Intellibike motor into a product.

It also became questionable if supercapacitors are the only solution for high power energy storage devices in small vehicles for one to two times its kinetic energy since lithium polymer

batteries came up. How to potentially implement supercapacitors into the series hybrid drive system was studied, but so far no realisation of such a storage device happened.

Together with the industry partner autork, then Brüggli and Fuchs, the drive components were developed further and were built as prototypes. Components were evaluated in order to minimize energetic losses (at no load) since in e-bike series hybrids every lost watt counts! The components were mounted for testing into either a laboratory two-wheeler or into a “Digitrike”.

The significance for everyday's life and for science is a multiple one: If series hybrids can be built that efficiently use 100 to 300 W of human pedalling power this means that energetic losses can be minimized extremely. The series hybrid is like an electronic gearing system; if it could be established on the market and if it was persistent on it, its price would decrease. In this way, it could become economically feasible to substitute e.g. the very inefficient continuously variable gears of the gasoline scooters. A lot of energy could be saved and the emissions could be reduced considerably.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassungen	2
Zusammenfassung deutsch	2
Resumé	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis	6
Einleitung	8
Ausgangslage	10
Umfeldbedingungen, 2002	10
Entwicklungsstand von Komponenten für Energiewandlung und -Speicherung, 2002	10
Umfeld heute, 2005	12
Die Situation in den Anwendungsfeldern von Energie-Management-Systemen, 2005	12
Entwicklungsstand von Komponenten, heute, 2005	12
Antriebe, Motoren	12
Energiequellen	13
Energiespeicher	13
System-Steuerungen	13
Ziel der Arbeit	14
Hauptziel	14
Teilziele	14
Lösungsweg	15
Praktische Arbeiten	15
Theoretische Arbeiten und Messungen	15
Ausmessen von Komponenten und des Antriebsstrang von Serie Hybrid Fahrzeugen	16
Weiterentwicklung	21
Konversion mechanische zu elektrische Energie (Tretgenerator)	21
Konversion elektrische zu mechanische Energie (Antrieb)	23
Fahrzeuge	24
Arbeiten auf kommerzieller Seite	26
Investoren-Markt	26
Anwender-Markt	26
Fazit	27
Hauptergebnisse	28
Interessante Messresultate	29
Ausrolltests des Laborzweirad	29
Menschliches Tretverhalten unter Last auf einem Fahrrad	31
Getriebeverluste im Antrieb des Tretgenerator	32
Leerlaufverluste elektrischer Maschinen	33
Messung Radnabenmotor	34
Reichweite	35
Messung der Temperatur der Kühlflächen während des Fahrens	36
Fahrzeuge	37
Laborzweirad	37
Digitrike „Pendolino“	38
Komponenten	40

Tretgenerator, Modell 2004/05	40
Radnabenmotor	42
Bilanzen	45
Gewichtsbilanz Serie Hybrid	45
Typische Energiebilanz eines Tretgenerator	45
Eigene Bewertung der Projektresultate	50
Noch offene Probleme	54
Technisch	54
Oekonomisch	55
Betrieblich	55
Potential	56
Andere Anwendungen für den kompletten oder ergänzten Antriebskit bestehend aus	
Generator, Motor, Batterie und Display inkl. Bedienelemente	56
Teilmenge Generator, Batterie und Display inkl. Bedienelemente	56
Teilmenge Motor, Batterie und Display inkl. Bedienelemente	56
Tretgenerator mit Supercapacitor-Speicher	56
Motorsteuerung	57
Weiteres Vorgehen	58
Produkt-Entwicklung	58
Marketing	58
Organisation	58
Technik	58
Forschung	59
Testen	59
Forschungsthemen	59
Danksagung	60
Symbolverzeichnis	60
Literaturverzeichnis	61
Anhang	63
Personelle Veränderungen im Laufe der Zeit	63
Uebersicht über alle je gebauten Serie Hybrid Muskelkraft Elektro Fahrzeuge	63
Technische Daten der Fahrzeug und ihrer Antriebe	69
Auszessen des Radnabenmotor-Prototyp	72
Bilder	72
Messresultate	73
Publikationen	75
Publiziert	75

Einleitung

Fahrzeuge und Energie-Erzeugungs- Anlagen im Inselbetrieb oder netzgekoppelt könnten dieselbe Steuerungskomponenten anwenden falls der Bus zur Verteilung der Energie eine standardisierte Spannung wie bsp. PowerNet 42V hätte. Dies die Grund-Idee.

Im Rahmen des durchgeführten Projekt ging es insbesondere um Antriebe für Kleinfahrzeuge (welche als Modellsystem für das Entwickeln und Anwenden von Energiemanagement nicht nur für Anwendung in Fahrzeugen dienen können).

Generell wichtig ist Integration der als Prototypen an Hochschulen vorhandenen oder der schon als Produkte erhältlichen Komponenten zur Energie-Speicherung oder zur Energie-Wandlung in Anwendungen, welche Marktauftritt der neuen Technologien erlauben.

Energie-Quellen	Brennstoffzellen oder Antriebsmaschinen-Generator Einheiten, Solargeneratoren, Netzgeräte und Wechselrichter	Antriebsmaschinen: Wasserräder, Windräder, thermische Maschinen – Verbrennungsmotoren jeder Art, Tretpedale
Energie-Wandler	Leistungselektroniken, elektrische Maschinen (Motoren, Generatoren)	
Energie-Speicher	Leistungselektroniken, Batterien und Superkapazitäten	

Tabelle. 1 Typen von Elementen von mobilen oder stationären Energieverteilungsanlagen

Im konkreten Fall stellen sich Fragen von Art und Zahl der Schnittstellen zwischen den Komponenten, sowie vom Regeln des System resp. vom Energie-Management von Systemen welche aus mehreren Komponenten eventuell verschiedener Hersteller bestehen.

Beantwortung dieser Fragen sind sehr wichtig wenn es nicht nur um Prototypen oder Einzelstücke gehen soll sondern um Markt-fähige Produkte.

Ausgangslage

Zur Zeit der Projektdefinition im Jahr 2002 zeigte sich die Situation so:

Umfeldbedingungen, 2002

Technologietransfer und Innovation waren 2002 - wie heute – stark nachgefragt. Das Finden erfolgsversprechender Strategien zur nachhaltigen Vermarktung neuer Energie-Technologien war und ist nach wie vor notwendig, insbesondere für die im Folgenden aufgeführten Typen von Komponenten.

Entwicklungsstand von Komponenten für Energiewandlung und -Speicherung, 2002

Die Energiewandler (E-Motoren) in elektrischen Systemen hatten einen schon hohen Entwicklungsstand. Die jüngsten waren jedoch noch im Stand von Forschungs- oder Pilot-/Demo-Prototypen und deshalb noch nicht auf dem Markt. Bsp. Intellibike Antrieb bestehend aus Motorsteuerung und Motor.

Energiequellen mit Hauptvertreter Brennstoffzelle waren im Bereich von Dutzenden von Kilowatt demonstriert und teilweise – in statischen Anwendungen - auch schon auf dem Markt. Brennstoffzellen angetriebene PKW gab es nur als Prototypen. Kleine, integrierte Brennstoffzellen für Kleinfahrzeuge gab es damals noch nicht.

Energiespeicher. Zum Zeitpunkt der Projektdefinition war der letzte Stand in der Energie-Speicherung die Kombination von Batterien und Supercapacitors. Prototypen gab es, aber keine Markt-gängigen Produkte. Entsprechend entstand die Idee, Supercapacitors in Kleinfahrzeuge einzubringen da in diesen die Chancen auf Vermarktung eventuell grösser sein könnten als bsp. Im Bereich von PKW.

Im Batterie-Sektor tauchten erste Lithium Systeme in Prototypen und Technologie-Demonstratoren wie dem Intellibike auf. Auf dem Markt das Neueste was sich etablierte waren damals, 2002, die NiMH Zellen.

System-Steuerungen für Kleinfahrzeuge. Erste Bus-Systeme tauchten in Prototypen auf. Zu nennen sind da das an der damaligen HTA Bern, Teil der Berner Fachhochschule, für autork ag entwickelte dezentrale Steuerungssystem auf der Basis von CAN und PowerNet 42V (damals „CAN-CoSy“ genannt). Die Steuerung war 2002 in einem Vierrad-Prototypen von Jakob Gilgen vorgestellt worden.

Im Rahmen dieses Projektes sind das System sowie dessen Komponenten weiterentwickelt worden.



Abb. 1 *Vierrad von Jakob Gilgen. Das „Gilgen Vierrad“ stellt den Stand der Arbeiten zum Zeitpunkt der Projektdefinition 2002 dar. Links der Prototyp mit dezentraler Steuerung. Rechts das Design der Karosserie, die ebenfalls als Prototyp existiert (Design ECAL, Bergeron & Clement 1999)*

Umfeld heute, 2005

Bei der Umsetzung von Innovationen (aus den Hochschulen) in den Markt gibt es nach wie vor Schwierigkeiten. Es scheint als ob es keine universellen Modelle gibt für den Prozess „Innovation to Market“ denn viele Prototypen an Hochschulen finden nach wie vor nur zögerlich den Weg auf den Markt.

Die Situation in den Anwendungsfeldern von Energie-Management-Systemen, 2005

In die LEM-Szene Schweiz (Leicht Elektro-Mobile) wurden mit dem Niedergang von SwissLEM resp. dem Herunterfahren der Aktivitäten von Cree Lücken gerissen.

Auf der anderen Seite ist die Nachfrage nach mobilen Energiequellen für mobile devices und autonome Anlagen da. Allerdings sind bsp. Brennstoffzellen vor allem erst in stationären Systemen im Einsatz da die Systeme noch nicht bis auf die für kleine Fahrzeuge notwendig Minimalgrösse integriert sind. An der EVS21 in Monaco wurde in einem Zweirad-Prototypen eine gekapselte, modulare Brennstoffzelle gezeigt (ENV Fahrzeug von Intelligent Energy).

Denkbar wäre sogar die Anwendung beispielsweise von DC Netzen ähnlich zu denen in den Fahrzeugen in Energie-effizienten Häusern. Es gibt jedoch noch keine breite Diskussion darüber ob mittels solcher Netze die vielen Wandler eliminiert werden könnten die wegen der im Haus überall notwendigen Wandlung von 220V AC zu wenigen V DC heute noch notwendig sind (Netzteile mit Standby Verlusten!). Die wenigen wirklich Leistung fressenden Anwendungen in einem Haus wie ein Backofen müsste man ja nicht übers DC Netz speisen.

Entwicklungsstand von Komponenten, heute, 2005

Antriebe, Motoren

Aus dem Intellibike-Motor ist noch kein käufliches Produkt entstanden. Biketec hat den eigenen Motor mit Untersetzungsgetriebe nicht zum Produkt weiterentwickelt (jedoch wurde mit Panasonic zusammengearbeitet, was zum hochwertigen Flyer C Antrieb führte).

Energiequellen

Die Brennstoffzellen-Entwickler brauchen länger als erwartet bis zur Realisation von integrierten, modularen Systemen, welche über Standard-Schnittstellen von beliebigen Benutzern verwendet werden können.

Energiespeicher

Das Aufkommen der Lithium-Systeme, insbesondere aber Lithium Polymer Zellen, wirft viele neue Fragen auf. Die Energie- und Leistungsdichte dieser Batterien ist so gross, dass Motor-Generator-Einheiten, Brennstoffzellen oder hybride Systeme wie bsp. Supercapacitors in Kombination mit Batterien in viel Anwendungen vielleicht nicht mehr die besten Lösungen sind wie man das 2002 annehmen durfte.

Da Lithium Zellen überwacht geladen und entladen werden müssen entstehen Batterie-Management-Systeme BMS. Diese BMS erlauben den Bau „intelligenter“ Batterien. Die BMS sind innerhalb einer Anwendung jedoch ein Sub-System der Steuerung der Anwendung der Batterie.

Im Rahmen eines anderen BFE Projektes, dem Projekt Nr. 47854, energieeffizienter Leicht-Scooter, finden schon im Intellibike angewandte Konzepte zum Batterie Management den Weg in weitere Anwendungen und wahrscheinlich auch in die Industrie: Ein Prototyp ist gebaut worden.

System-Steuerungen

Noch hat sich kein sehr generalisiertes Bus-System zur Energieverteilung und zum Energie-Management auf dem Markt etabliert. Der Anlagen- oder Fahrzeugbauer muss immer noch sein System aus eingekauften Komponenten zusammenstellen und notfalls selber Anpassungsentwicklungen machen und er muss eine Top-level Systemsteuerung selber bauen. Grund dafür ist dass es noch zu wenig standardisierte Schnittstellen gibt und die Systeme und die Software noch zu wenig hoch entwickelt sind.

Das Serie Hybrid Antriebssystem kann nun erstmals in einem Fahrzeug „Pendolino“ (Digitrike) in einer Gestalt gezeigt werden, die in allen wichtigen Formen und Dimensionen Produkt-nah ist. Allerdings soll das System vor der Implementation in ein Produkt nochmals vereinfacht werden.

Ziel der Arbeit

Hauptziel

Eine Plattform für die Implementation von Komponenten in Anwendungen mit realen Marktchancen als marktgängiges Produkt etablieren.

Die Figur der Wertschöpfungskette im Projektantrag illustriert dies. Es muss marktgängige Anwendungen geben die als „Vektoren“ dienen und das Umfeld bieten um neuartige Komponenten zur Energiewandlung und Energiespeicherung zum marktgängigen Produkt zu machen.

Teilziele

1. Energiemanagement-System resp. Fahrzeugantrieb optimieren und generalisieren
2. Machbarkeit der Ankoppelung weiterer Komponenten studieren
3. Integration von Intellibike Komponenten
4. Anwendbarkeit in einem Leicht-Scooter d.h. Leistungssteigerung studieren

Gewisse Ziele sind im Laufe der Projekt-Laufzeit hinfällig geworden aus verschiedenen Gründen:

- Projekte haben sich anders entwickelt als angenommen. Beispielsweise ist Ziel 3 anders gewichtet worden da die BMS Konzepte aus Intellibike ins viel umfassenderen Projekt ULS (energieeffizienter Leicht-Scooter) einfließen. Siehe Schlussbericht des entsprechenden Projekt.

Unerreichbar erscheint im Moment ein Intellibike Motor als Produkt da durch die Industrie der Motor noch nicht zum Produkt weiterentwickelt worden ist.

- Im Projekt energieeffizienter Leicht-Scooter ging man weiter als zur Zeit der Projektdefinition dieses Projektes angenommen (Ziel 4)

Lösungsweg

Praktische Arbeiten

Komponenten wurden evaluiert und ausgemessen. Die ausgewählten Komponenten wurden auf selber aufgebaute Fahrzeuge montiert. Die dezentrale Steuerung wurde in Betrieb genommen und die Fahrzeuge wurden test-gefahren.

Theoretische Arbeiten und Messungen

Verschiedenartige Methoden sind angewendet worden:

- a) Evaluation von Energiewandlern und Energiespeichern sowie Studien mit dem Ziel des Findens sinnvoller technischer Lösungen zu deren Einbindung ins Antriebssystem
- b) Messungen
- c) Analysen von Testresultaten aktueller Fahrzeuge zwecks Identifikation des Stand der Technik und zwecks Benchmarking. Vergleich mit Testresultaten der eigenen Fahrzeuge

Beispiele von Arbeiten

Zu a) Studie möglicher Topologien zur Einbindung von Supercapacitors ins Serie Hybrid Antriebssystem

Zu b) Die Messungen umfassten einerseits Messungen von Leerlaufverlusten und Kennlinien von Komponenten sowie Messung im Rahmen von Fahrversuchen auf den gebauten Fahrzeugen

Zu c) Auswertung von extraenergy Testresultaten von E-Bikes und Pedelecs. Analyse des Zusammenhang von Art des Antriebssystem und der Fahrleistungen. Vergleich mit Resultaten aus Arbeiten gemäss b).

Ausmessen von Komponenten und des Antriebsstrang von Serie Hybrid Fahrzeugen

Ziel ist einerseits Identifikation der bedeutendsten energetischen Schwachstellen im Antriebsstrang und Elimination derselben. Andererseits sollen Vergleichsmessungen ein Benchmarking mit markt-üblichen Fahrzeugen erlauben.

Das hier besprochene Fahrzeug resp. dessen Antrieb ist ein Serie Hybrid. Die Hybrid-Antriebe sind im Allgemeinen nicht einfach auf energetische Effizienz zu untersuchen da die im Hybrid enthaltenen Antriebskomponenten in vielen Kombinationen von Lastpunkten betrieben werden.

Besonders mühsam ist die Untersuchung von Parallel Hybriden da dort in mechanischen Schnittstellen gemessen werden muss will man die Energiebilanz der hybriden Antriebe aufschlüsseln.

Das Serie Hybrid Fahrrad hat den Vorteil dass die so unterschiedlichen „Antriebsmaschinen“ Mensch und E-Motor nicht mechanisch, sondern ausschliessliche elektrisch gekoppelt sind. Sie beeinflussen einander nicht gegenseitig negativ wie in gewissen E-Bikes mit Fahrradkette, sondern Mensch und Maschine arbeiten unabhängig voneinander.

In einem System mit blos elektrischen statt auch mechanischen Schnittstellen wie dem Serie Hybriden:

- a) können Komponenten getrennt vom Rest des System weiterentwickelt werden wenn die Schnittstellen tauglich definiert sind
- b) kann der Wirkungsgrad jedes Teil des System zwischen Schnittstelle und nächster Schnittstelle gemessen werden
- c) kann die gesamte Wirkungsgradkette gemessen werden falls Datalogger unter realen Lasten relevante Daten messen

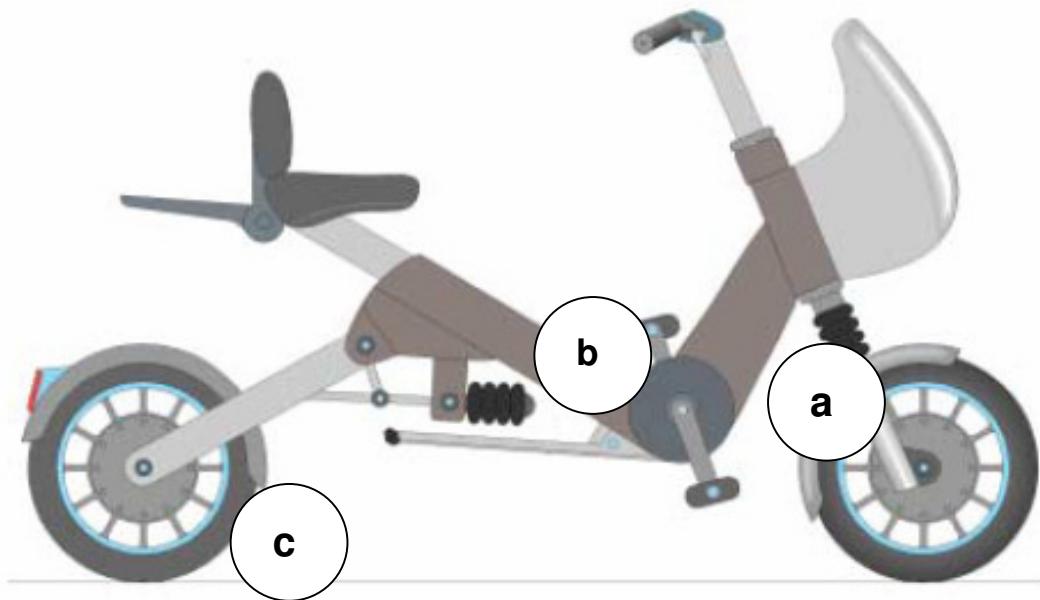


Abb. 2 Messstellen zur Energiebilanz-Messung. Entwurf dieses „electronic scooter bike“ von Harald Kutzke, Bonn

Messstellen am Serie Hybrid und messbare Größen

- Mechanische Eingangsleistung an der Generator-Einheit (Drehmoment und Drehzahl) gemessen beispielsweise mittels SRM Kurbel (vorhanden) oder gemessen auf Prüfständen für Getriebe und Generator inkl. Generatorelektronik (die Getriebe konnten nicht in Kombination mit Generatoren gemessen werden, nur die Generatoren mit der Leistungselektronik)
- Elektrischer Zwischenkreis, Strom und Spannung. Sind bsp. Generatorstrom und Motorstrom bekannt kann der Batteriestrom berechnet werden
- Radaufstandspunkt. Mechanische Ausgangsleistung. Die Fahrleistung kann unter Zuhilfenahme der gemessenen Widerstandsparameter aus Fahrgeschwindigkeit und Steigungswinkel berechnet werden (bei bekannter Luftdichte resp. Temperatur). Oder man misst auf einem Prüfstand

Gemessen wurden die Bilanzen nicht alle an einem Fahrzeug zu einem Zeitpunkt weil im Laufe des Projekt immer wieder einzelne Komponenten des System verbessert worden sind.

Vorgenommene Untersuchungen:

a) Messungen mit dem Zweck der Untersuchung von Teilstrecken der Transmission

Messpunkt a: Die Muskelkraftleistung ist auf dem mit Kette angetriebenen Laborzweirad mit der SRM Messkurbel gemessen worden und wird für die Auslegung des Antriebs mit Tretgenerator verwendet.

Teilstrecken zwischen Messpunkten a und b:

Leerlauf-Widerstands-Messungen elektrischer Maschinen auf Prüfstand

Wirkungsgradmessungen von elektrischen Maschinen auf Prüfstand

Leerlauf-Widerstandsmessungen von Ketten- und Planeten-Getrieben unter Verwendung der SRM Kurbel

Teilstrecke zwischen Messpunkt b und c:

Messung eines Radnabenmotor-Prototypen auf Prüfstand

Messpunkt c: Messung des Leistungsbedarf der Fahraufgabe

Messung des Fahrleistungsbedarf des Laborzweirad mittels SRM Drehmoment-Kurbel durch Fahren mit dem Original-Fahrrad mit Kette und durch Ausrolltests (Bestimmung der Parameter Masse, effektive Stirnfläche, Rollwiderstandskoeffizient) (*)

(*) Wenn mit der SRM Kurbel an einem Fahrrad mit Kette die Eingangsmomente an der Tretkurbel gemessen werden können auch Aussagen gewonnen werden über das Treten an sich. Diese Information ist hoch relevant für die optimale Auslegung und Regelung von Pedelecs/E-Bikes und Fahrzeugen mit Tretgenerator

Begründung des Vorgehens:

Die Leerlaufwiderstände müssen minimalst sein, ansonsten keine Chance auf ansprechende Wirkungsgrade der Energiewandlung im Antriebsstrang von Serie Hybriden besteht.

Da die beiden Hauptverlustquellen in elektrischen Maschinen die Leerlaufverluste sowie die ohm'schen Verluste sind, ist die Messung der Leerlaufverluste in Funktion der Geschwindigkeit sowie die Berechnung der ohm'schen Verluste in Funktion des Stromes ein genügend genaue Bestimmung der Verluste dieser Komponenten über ihren dynamischen Bereich.

b) Gesamt-System-Tests

Diverse Fahrten mit Messung von Fahrtdauer, Geschwindigkeit, Reichweite unter Benutzung von Markt-üblichen Akku wurden mit dem Laborzweirad durchgeführt.

Ziel der Testfahrten ist vor allem der Vergleich mit handelsüblichen Produkten (Benchmark).

Messung auf Rollenprüfstand:

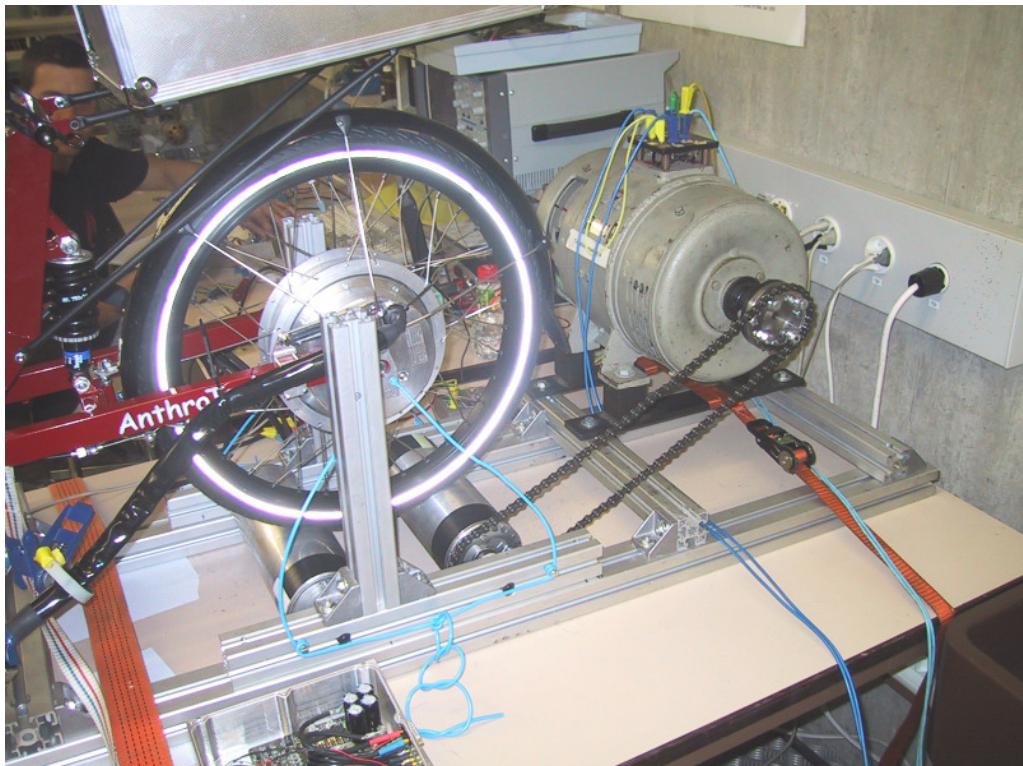


Abb. 3 Rollenprüfstand. Bremsung des Rades über DC-Maschine



Abb. 4 Zu kleinen Rollen lassen Drehmoment-Uebertragung nur bis zu einem bestimmten Betrag zu! Oberhalb einer Grenzlast beginnt der Pneu zu leiden (Belastung der Antriebsseite bis zu einer Steigung von gegen 10 % möglich).

Weiterentwicklung

(Eigenleistung der Industriepartner)

Der Entwicklungsstand war 2002 so dass das „Gilgen Vierrad“ fahrfähig war. Seine Ausrüstung war:

- Fahrzeug und Getriebe der elektrischen Maschinen von Jakob Gilgen
- Elektrische Maschinen von Circlemotor AG
- Serie Hybrid Antrieb, Soft- und Hardware von der HTA Bern, im Auftrag von autork ag entwickelt

In der Periode 2002 bis 2005 gab es mehrere kontinuierliche Ebenen der Weiterentwicklung:

Konversion mechanische zu elektrische Energie (Tretgenerator)

In diesem Entwicklungsprozess wurden die elektrischen Maschinen immer leichter und kleiner, der Tretgenerator immer kompakter. Der Wechsel von durch Circlemotor gelieferten Prototyp-Generatoren zu den nachfolgenden Generatoren war der Wechsel von nicht-kommerziellen Prototypen zu einkaufbaren Maschinen. Zwei der nachfolgend genannten Varianten sind komplette Tretgenerator-Konstruktionen mit gekapseltem Getriebe.

Generator von	Bemerkung	Maschinen-Grösse	Anwendung auf Fahrzeug
Circlemotor	Brushless Maschinen. Schritt für Schritt Reduktion der Grösse des Generator	Durchmesser ursprünglich 28 cm, dann 20 cm (Typ CM 200). Konzipiert, aber nicht realisiert worden ist ein Tretgenerator mit zweistufigem Planetengetriebe basierend auf dem Stator vom Maschinen-Typ CM 120 (12 cm Durchmesser).	Generator mit 28 cm Durchmesser auf dem Gilgen Vierrad, 2002 Für SwissLEM wurde eine CM 200 Maschine mit Wicklung für Hochspannung ausgemessen. Der Tretgenerator auf der Basis von CM 120 wurde für ecomotion bike gmbh entworfen
Perm-Motor	PGS 080 Synchronmaschine	Durchmesser 15.5 cm; Masse des Generators allein 2.9 kg	Laborzweirad
Torcman	Monster TM685	Durchmesser 8.2 cm; Masse der el. Maschine 1.2 kg Konzipiert worden ist ein Tretgenerator zum Nachrüsten an Fahrrad-Standard-Tretlager mit zweistufigem Getriebe, wobei die erste Stufe ein abgedecktes Kettengetriebe, die zweite Stufe ein Planetengetriebe ist.	Digitrike „Pendolino“

Tabelle. 2 Elektrische Maschinen für Tretgenerator-Prototypen

Konversion elektrische zu mechanische Energie (Antrieb)

Wie beim Generator auch wurde im Laufe des Entwicklungsprozess auf der Antriebsseite von nicht-kommerziellen zu kommerziellen Maschinen gewechselt.

Der Antrieb konnte im letzten Schritt (2004/05) auch gekapselt werden (Erstmaliger Einsatz des Radnabenmotor DiscPower von Perm-Motor GmbH und Framo Morat GmbH in einem Fahrrad)

Motor von	Bemerkung	Maschinen-Grösse	Anwendung auf Fahrzeug
Circlemotor	Brushless Maschinen	Durchmesser 20 cm (Typ CM 200)	Gilgen Vierrad, 2002
Perm-Motor	PMS 100 Synchronmaschine	Durchmesser 18.8 cm; Masse der el. Maschine 5.5 kg Nennleistung 0.8 kW	Laborzweirad
Perm-Motor	Erstmalige Anwendung des Disc Power Radnabenmotor DP 080G-12. Zweistufiges Planeten-Getriebe von Framo Morat. Vorgaben für Einbau in Fahrrad von Fuchs	Durchmesser 17 cm; Masse der Radnabe in der Form für das Fahrrad 6.6 kg (*) Nennleistung 1.2 kW	Digitrike „Pendolino“

Tabelle. 3 Elektrische Maschinen auf der Antriebsseite in den Fahrzeug-Prototypen

(*) Vergleich: Die im Projekt-Jahresbericht 2004 noch fehlende Angabe des Gewicht des wavecreslab/tidalforce 750 W Motor konnte eingeholt werden. Das Gewicht beträgt 23 lbs (10.4 kg), was aus der Sicht der Anwendung im Fahrrad oder Mofa als sehr hoch zu bezeichnen ist, für getriebelose Motoren aber normal ist !

Fahrzeuge

Die Arbeiten an den Komponenten erforderten dass Fahrzeuge aufgebaut wurden zum Testen der Resultate der Weiterentwicklungs-Schritte:

	Anzahl	Fahrzeugbasis
Laborzweirad, 2002/03	Einzelstück	Easy Racers EZ1
Digitrike „Pendolino“, 2004/05	Kleinserie von 4 Stück	Anthrotech

Tabelle. 4 Für das Projekt aufgebaute Fahrzeuge

Laborzweirad EZ1

Das Laborzweirad wurde mit dem Ziel gebaut, über eine fahrbare Versuchsplattform zu verfügen. Mechanisch ist dieses Fahrzeug noch weit vom Produkt entfernt da es nur einen zentralen Kasten hat in dem alle Komponenten in einem Labor-Setup montiert sind.

Aber das Laborzweirad erlaubte Testfahrten mit dem Zweck eines Benchmark mit bestehenden E-Bikes und Pedelecs (Wäre das Laborzweirad wesentlich weniger weit fahren als marktgängige Fahrzeuge wäre das Projekt abgebrochen worden).

Digitrikes „Pendolino“

Die Digitrikes „Pendolino“ wurden gebaut um über erstmals ansprechend aussehende Prototypen zu verfügen: Die Komponenten sind in Gehäusen verbaut, nicht mehr offen liegend wie auf früheren Funktionsmodellen und Prototypen.

Nicht optimal ist die Anbringung der Batterie im Heckkoffer auf dem Gepäckträger. Die Lage relativ zum Fahrzeugschwerpunkt soll im nächsten Produktentwicklungsschritt verbessert werden.

- Von den „Pendolino“ gibt es vier Prototyp-Fahrzeuge mit 1. Versionen von:
 - der dezentralen Steuerung mit CAN-Bus-Kommunikationsverbindung
 - Software
 - mechanisch integrierten Energie-Wandlern (Tret-Generator, Radnaben-Motor)
- Die Fahrzeuge weisen einen Kabelbaum auf mit Steckern damit für Messungen, Tests, die Weiterentwicklung eine mechanische Schnittstelle vorhanden ist (die Stecker sind allerdings noch nicht Regen-tauglich)
- Der Grad an Vereinfachung und Zusammenfassung von Prints und den entsprechenden Gehäusen ist noch zu klein im Vergleich zu einem Produkt



Abb. 5 Bild Zwei der Pendolino Digitrikes bei der Inbetriebnahme durch Dipl.Ing. Kurt Wenger im Labor der HTI Biel.

Arbeiten auf kommerzieller Seite

(Eigenleistung der Industriepartner)

Das Projekt musste sich auf zwei Märkten bewähren:

Investoren-Markt

Ein riesiges Problem, wenn nicht das Hauptproblem für autork in der Phase 2002 bis 2004 war der Niedergang von SwissLem. Dies bedeutete Verlust eines Hauptaktionär.

Nach dem Ende der New Economy Phase war Re-Finanzierung von Start-Up Projekten kaum möglich bis unmöglich. Investoren prüften das Projekt zwar, doch wollten alle potentiellen Investoren einen finanziellen Return nach 12 bis 24 Monaten, so dass es 2003 unrealistisch war einen Abschluss zu tätigen.

In diesem Jahr wurde versucht, gewisse Fahrrad-Branchen-nahe Industriefirmen oder grosse Fahrradfirmen, welche als Produzenten oder als Anwender der Antriebstechnologie in Frage hätten kommen können, für einen Einstieg zu gewinnen. Die wollten aber ein fertiges Produkt bereit zur Produktion und Vermarktung.

Im Jahr 2004 wurde Autork von SKPartners gekauft. Im Sommer 2004 entschied sich Brüggli zum Bau der Digitrikes.

Zur Verstärkung des Team wurde Kurt Wenger eingearbeitet. Ende 2004/Anfang 2005 zog sich Jürg Blatter aus dem Projekt und aus Autork zurück, worauf SKPartners Autork aus dem Projekt nahmen aufgrund der Einschätzung es gehe nicht ohne J. Blatter.

Brüggli und Andreas Fuchs einigten sich das Projekt weiter durchzuführen und dazu in die Rolle der Industriepartner zu schlüpfen.

Anwender-Markt

Der Serie Hybrid E-Fahrrad Antrieb wurde 2003 an Messen nicht öffentlich mehreren potentiellen Anwendern vorgestellt. Das Interesse am Einsatz des fertig entwickelten Antriebsstrang in eigenen Prototyp-Fahrzeugen war so riesig, so dass nach wenigen Kontakten damit aufgehört wurde, weitere Anwender zu suchen da ja alle das FERTIGE Produkt wollten!

Fazit

Die kommerzielle Seite des Projekts könnte ein Lehrstück sein für die Schwierigkeiten, welche Start-Up Firmen erleben (und meistens nicht über-leben).

Investoren wie Anwender wollen weitestgehend FERTIGE Projekte, erklären aber nie wie denn ein Projekt ohne Kapital in den Zustand von „Fertig“ kommen solle...

Hauptergebnisse

Schluss-Stand der Arbeiten:

- Zahlreiche Komponenten (Energiewandler, Energiespeicher) evaluiert und/oder ausgemessen, darunter ein neuartiger, kompletter Radnabenmotor
- Studie über die Einbindung von Supercapacitors als Speicher der kinetischen Energie des Fahrzeug durchgeführt. Wegen Aufkommens hochstromfähiger Batterietypen mit Implementation von Supercapacitors zur Rekuperation jedoch zugewartet
- Produktnaher Tretgenerator konstruiert, gebaut und getestet
- Zwei Fahrzeug-Typen inkl. Gehäuse (Kühlung!) für elektrische und elektronische Komponenten sind aufgebaut worden. Gehäuse auf Laborzweirad Labor-mässig aussehend, Gehäuse auf Digitrike vorzeigbar
- In beiden Fahrzeugen die dezentrale Steuerung in Betrieb genommen und parametriert. Auf dem Digitrike sind die Steuerungen soweit ohne Neu-Layout möglich entstört worden
- Testfahrten mit Fahrzeugen
- Vergleich Parallel Hybrid und Serie Hybrid in Bezug auf die Effizienz der Mensch-Maschinen-Kopplung und die Fahrleistung
- Benchmark mit marktgängigen Fahrzeugen

Interessante Messresultate

Ausrolltests des Laborzweirad

Vor dem Umbau des Liegezweirad zum Laborzweirad wurde es in der Version als normales, mit Kette angetriebenes Fahrzeug ausgemessen um später über eine Vergleichsbasis zu verfügen.

Methode:

Mittels Datalogger (SRM Kurbel) wird die Geschwindigkeit während des Ausrollen auf flachen Untergrund bei Windstille gemessen. Aus der Kurve $v(t)$ wird die Beschleunigung $a(t)$ berechnet. Mittels Parameter-Variation eines Modells für die Fahrwiderstände wird der komplette Satz von Fahrzeugparametern bestimmt.

- Masse fahrbereit inkl. A. Fuchs (Fahrzeug mit Kette vor dem Umbau zum Serie Hybrid): 117 kg
- Effektive Stirnfläche (mit A. Fuchs als Testfahrer, Körpergrösse nahezu 2m): 0.52 m² (Luft-Temperatur 26 Grad C)
- Rollwiderstands-Koeffizient: 8.3 Promille

EZ1 Ausrolltest

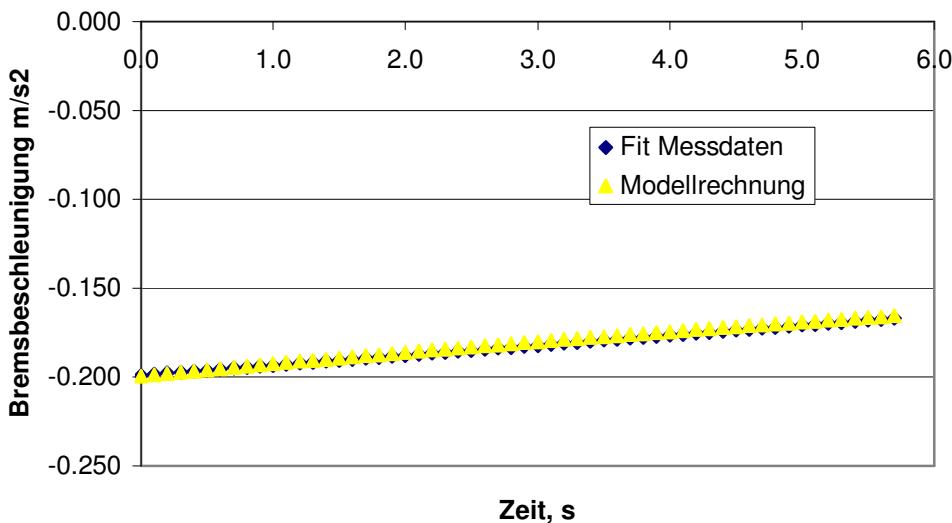


Abb. 6 Beispiel von Ausrolltest-Resultaten des Laborzweirad

Verwendung: Der Fahrleistungsbedarf kann nun mithilfe der bestimmten Parameter berechnet werden und es können die elektrische Eingangsleistung des Fahrzeugantrieb mit der bei derselben Geschwindigkeit berechneten Fahrleistung verglichen werden zwecks Bestimmung des Antriebswirkungsgrad, oder es kann bei konstanter Geschwindigkeit die Antriebsenergie verglichen werden mit dem Integral (Fahrleistung * Fahrzeit).

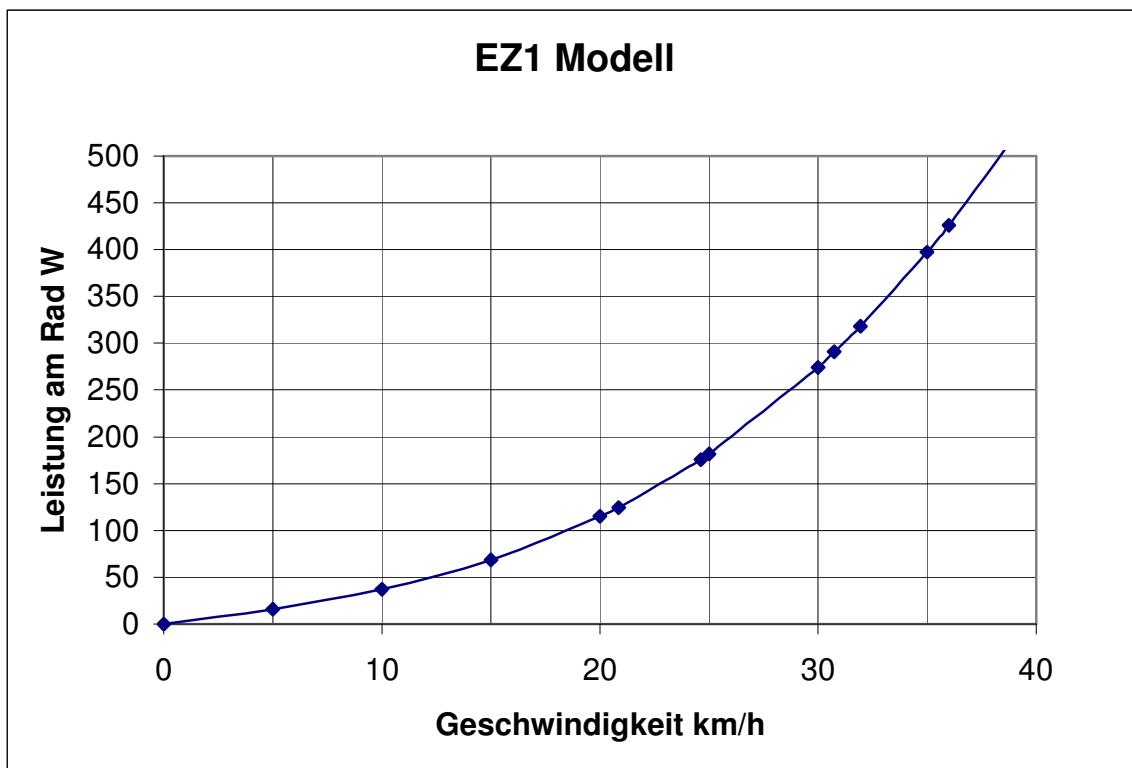


Abb. 7 Aus den Parametern gerechneter Fahrleistungsbedarf des Laborzweirad

Mit knapp 300W Fahrleistung kann man mit dem Laborzweirad 30 km/h schnell fahren. Stammt die Hälfte davon aus Muskelkraft, sind vom elektrischen Antrieb die verbleibenden 150 W zu liefern. Mit auf e-Bikes/Pedelecs typisch installierten Batteriekapazitäten von 150 bis 200 Wh kann man rund 1 Stunde lang fahren sollte der Wirkungsgrad exzellent sein.

Menschliches Tretverhalten unter Last auf einem Fahrrad

Das Laborzweirad wurde vor dem Umbau in einen Serie Hybrid (ohne Kettenantrieb) ausgemessen.

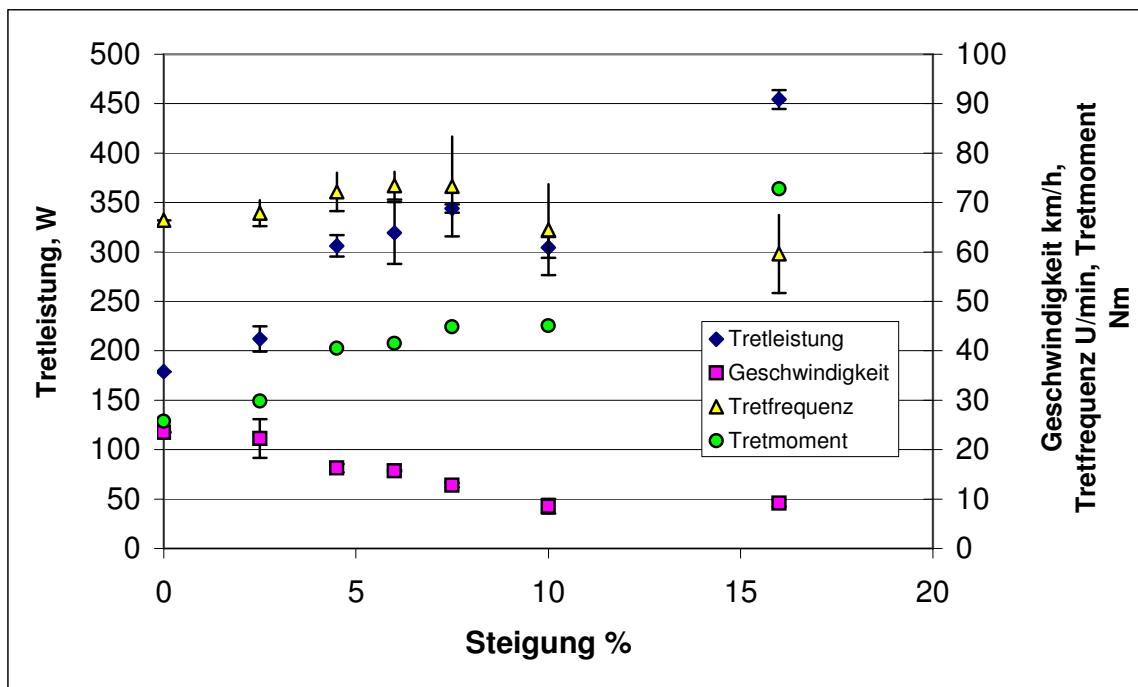


Abb. 8 Antriebsleistung, Tret-Frequenz, Tret-Moment (berechnet aus Leistung und Frequenz), sowie gefahrene Geschwindigkeit des Laborzweirad in Abhängigkeit der Last (proportional der Steigung, hier in %)

Interessant ist dass der Mensch erhöhten Leistungsanforderungen beim Treten nicht durch eine Tretfrequenz-Aenderung begegnet, sondern durch erhöhtes Tretmoment. Dass der Anstieg des Tretmoment mit der Steigung nicht linear ist hat damit zu tun dass bei ansteigendem Tretmoment körperliche Positionswechsel erfolgen.

Im E-Bike/Pedelec übernimmt der Motor die Steigerung des Tretmoment welche parallel zu einer Lasterhöhung geht, so dass der Mensch auch an der Steigung (oder beim Beschleunigen) nicht wesentlich stärker als mit dem Moment bei 0% Steigung treten muss.

Getriebeverluste im Antrieb des Tretgenerator

Die beiden Formen Leerlaufwiderstand und Widerstand unter Last bewirken die unerwünschte Wirkungsgrad-Reduktion. Leerlaufwiderstände müssen also soweit als überhaupt möglich reduziert werden; entsprechend unser Interesse an dieser Widerstandsart und demzufolge die Leerlauf-Last Messungen.

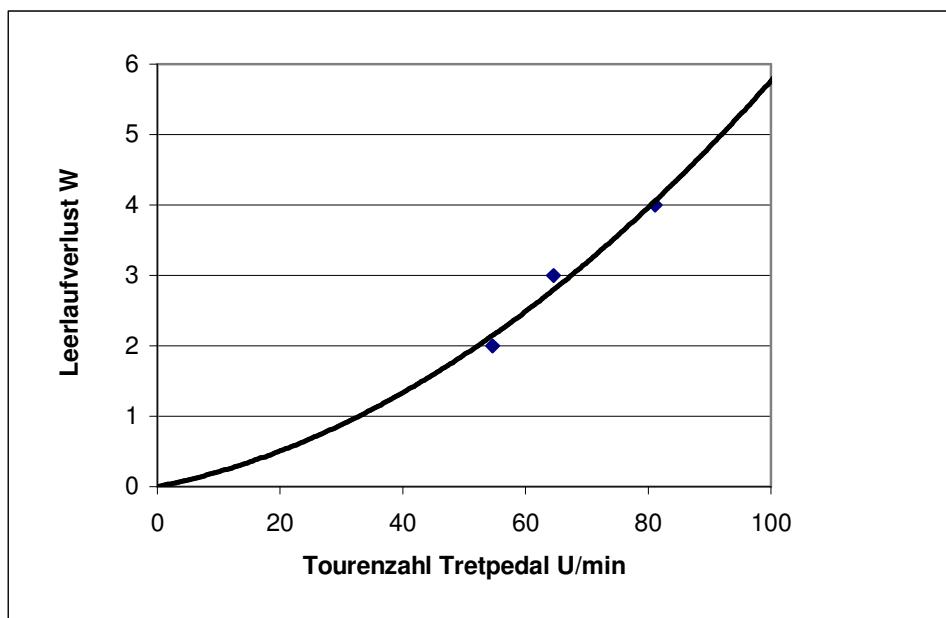


Abb. 9 Leerlaufwiderstand des Getriebe des Tretgenerator Modell 2004/05 (Leerlaufwid.xls)

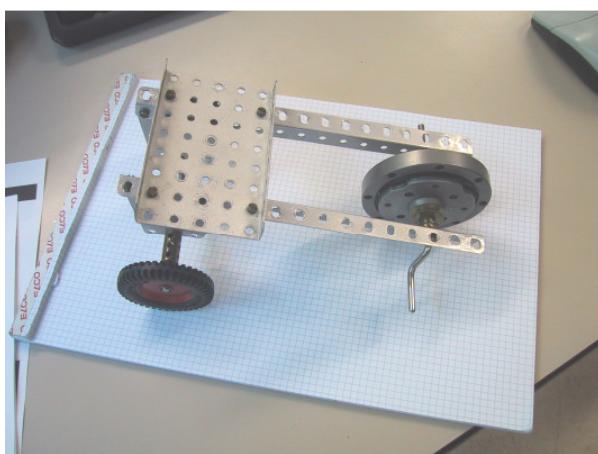


Abb. 10 Messwagen zur Untersuchung der Unterschiede in der Reibung aufgrund verschiedener Schmiermittel.
Das eine „Vorderrad“ ist das eingekaufte Planetengetriebe des Tretgenerator

Es zeigt sich dass die Getriebe-Leerlaufverluste gemessen an der Muskelkraft, 50 bis 300 W typischerweise, klein sein können. Die Verluste gewichten bei geringen Tretleistungen in Bezug auf den Wirkungsgrad mehr. Unter Last ist das Getriebe noch nicht befriedigend. Die Ursachen sind klar und können behoben werden. Das Optimierungspotential soll im finalen Industriealisierungs-Schritt ausgeschöpft werden.

Leerlaufverluste elektrischer Maschinen

Messung kleiner Drehmomente ist schwierig da man, ausser man verfügt über spezialisierte Messmittel, nur im Teillastbereich misst. Misst man wenigsten alle Maschinen auf derselben Messeinrichtung (alle ohne PMS 100) so sind Messwerte in sich vergleichbar.

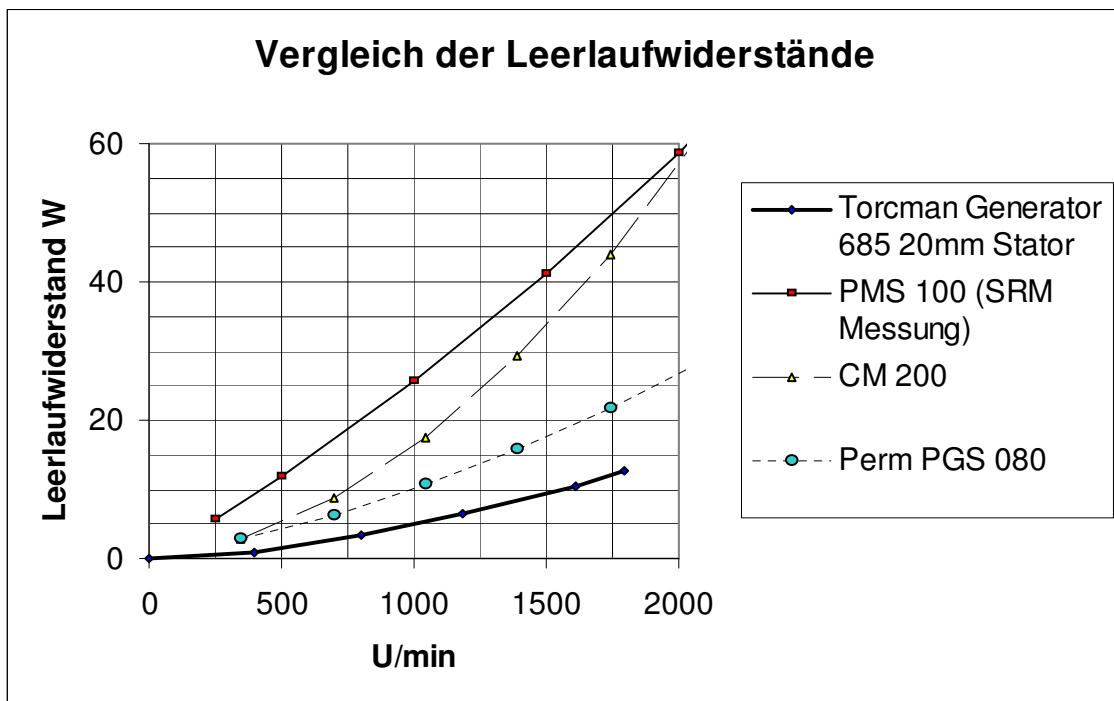


Abb. 11 Leerlaufverluste von als Generator und als Motor (PMS 100) evaluierten, elektrischen Maschinen.
leerlaufverl_vergleich.xls

Im Tretgenerator gibt es zwei weitere wichtige Verlustquellen, die Wirbelstromverluste, sowie die ohm'schen Verluste. Wie obige Grafik zeigt können bei gewissen elektrischen Maschinen die Wirbelstromverluste klein sein im Vergleich zur Leistung der Muskelkraft.

Elektrische Verluste unter Last:

Bei 36V Bordspannung kommen aus dem Tretgenerator 4 bis 5 A Strom. Mit Innenwiderständen von Bruchteilen eines Ohm ergibt dies zusätzliche Verluste in der Größenordnung von 5 bis 10W.

Messung Radnabenmotor

=> Resultate, siehe Anhang

Vom Radnabenmotor DiscPower gibt es unterschiedliche Versionen. Sie unterscheiden sich in

- Anzahl Statoren der Axialfluss-Synchronmaschine sowie Baugröße der elektrischen Machine
- Getriebeuntersetzung

Vom Radnabenmotor ist eine Version für Rollstühle vermessen worden. Resultate: Siehe Anhang.

Aus diesen Messungen können durch Umrechnung die Eigenschaften des Motors für Fahrräder recht genau abgeschätzt werden. In der Version für das Pendolino-Dreirad hat der Radnabenmotor 2 statt nur 1 Stator. D.h. die möglichen Drehmomente verdoppeln sich.

Resultat, zusammengefasst:

Der gemessene Radnabenmotor weist einen guten Wirkungsgrad auf über einen grossen Drehmomentbereich. Diese Kategorie von Antrieben ist deshalb geeignet für Serie Hybrid Fahrzeuge.

Reichweite

Die Tests wurden mit dem Laborzweirad gefahren welches mit 36V NiMH Akku von 8Ah Nennkapazität ausgerüstet war (die effektiv gespeicherte Kapazität kann weniger sein, sie wurde nicht überprüft).

Es ist zu bemerken dass wegen nicht optimaler Abstimmung von elektrischer Maschine (PMS 100) und elektronischer Kommutierung der Antrieb des Laborzweirad lärmte. D.h. dass bei Verbesserung der Kommutierung die Reichweite gesteigert werden kann weil Energieverluste durch Lärm dann reduziert oder eliminiert sind.

Das Laborzweirad wies auf der Generator-Seite noch kein optimales Regelverhalten auf da die Software vom Gilgen Vierrad umparametert wurde, nicht jedoch neue Steuerungs-Algorithmen, optimiert für Zweiräder implementiert waren (Arbeiten zu diesem Thema finden an der HTI Biel im Sommer 2005 statt).

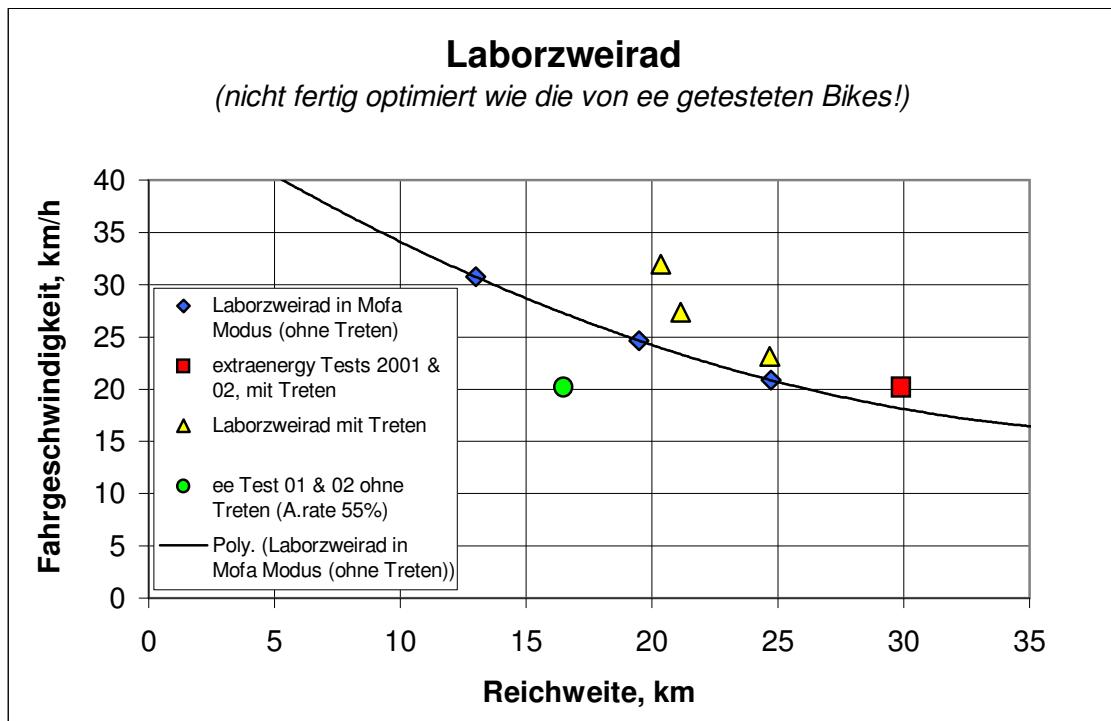


Abb. 12 Fahrtests mit Laborzweirad und Vergleichswerte marktüblicher E-Bikes/Pedelecs, gemessen von Extraenergy 2001 und 2002

Man kann feststellen dass ohne Treten das über Gasgriff gesteuerte Laborzweirad weiter fährt als die existierenden E-Bikes/Pedelecs wenn auf denen nicht getreten würde. Die Resultate mit Treten sind nicht eindeutig. Mehr Tests sind notwendig. Würde man aber auch wie bei den Messungen „ohne Treten“ ein Modell für den Zusammenhang von Geschwindigkeit

und Reichweite durch die Messwerte „mit Treten“ legen stellte man fest dass das Serie Hybrid E-Fahrrad mindestens ungefähr gleich weit fahren wird wie die Parallel Hybrid E-Fahrräder.

Da der Motor des Laborzweirad überdimensioniert ist und da auf Seite Generator optimiert werden kann besteht immer noch Optimierungspotential. Schöpft man dieses aus, so liegen die Fahrleistungen des Serie Hybrie E-Bike in der Hälfte der besseren Parallel-Hybride.

Messung der Tempertur der Kühlflächen während des Fahrens

Trotz allgemein hoher Wirkungsgrade treten wegen der hohen Drehmomente und der entsprechenden Ströme doch ohmsche Verluste auf welche nicht vernachlässigt werden dürfen will man die Komponenten dauerhaft, ohne Ausfälle, einsetzen.

Mit dem Digitrike sind längere Bergfahrten an Steigungen von ca. 10 Prozent vorgenommen wurden (HTI Biel Hauptgebäude bis Spital). Die Erwärmung der Kühlfläche direkt unter der Leistungsstufe der Motorsteuerung betrug blass wenige Grad Celsius. Der Radnabenmotor wurde kaum spürbar warm.

Der Antrieb des Digitrike ist wegen besserer Abstimmung von elektrischer Machine und Motorsteuerung leiser als derjenige des Laborzweirad. Die energetischen Verluste konnten somit entsprechend reduziert werden.

Fahrzeuge

Technische Daten der Komponenten finden sich in den Spezifikationstabellen der Fahrzeuge im Anhang.

Laborzweirad

Fahrzeug: Easy Racers EZ1

Erbauer Laborzweirad: A. Fuchs



Abb. 13 Laborzweirad mit Peter J. Schmid als Testfahrer

Digitrike „Pendolino“

Fahrzeugbasis: Anthrotech

Erbauer Digitrike Serie Hybrid: 3 Stück Brüggli, 1 Stück A. Fuchs



Abb. 14 Digitrike Nr. 2 (3. Juni 2005)

Das Digitrike (blaues Fahrzeug Nr. 3) wiegt ohne Person 46.5 kg (mit 36V / 15Ah NiMH Akku).



Abb. 15 Frontansicht des Digitrike Nr. 2 (3. Juni 2005)



Abb. 16 Display des Digitrike Nr. 2 (3. Juni 2005). Unten ist der Tretgenerator sichtbar

Komponenten

Technische Daten der Komponenten finden sich in den Spezifikationstabellen der Fahrzeuge im Anhang.

Tretgenerator, Modell 2004/05

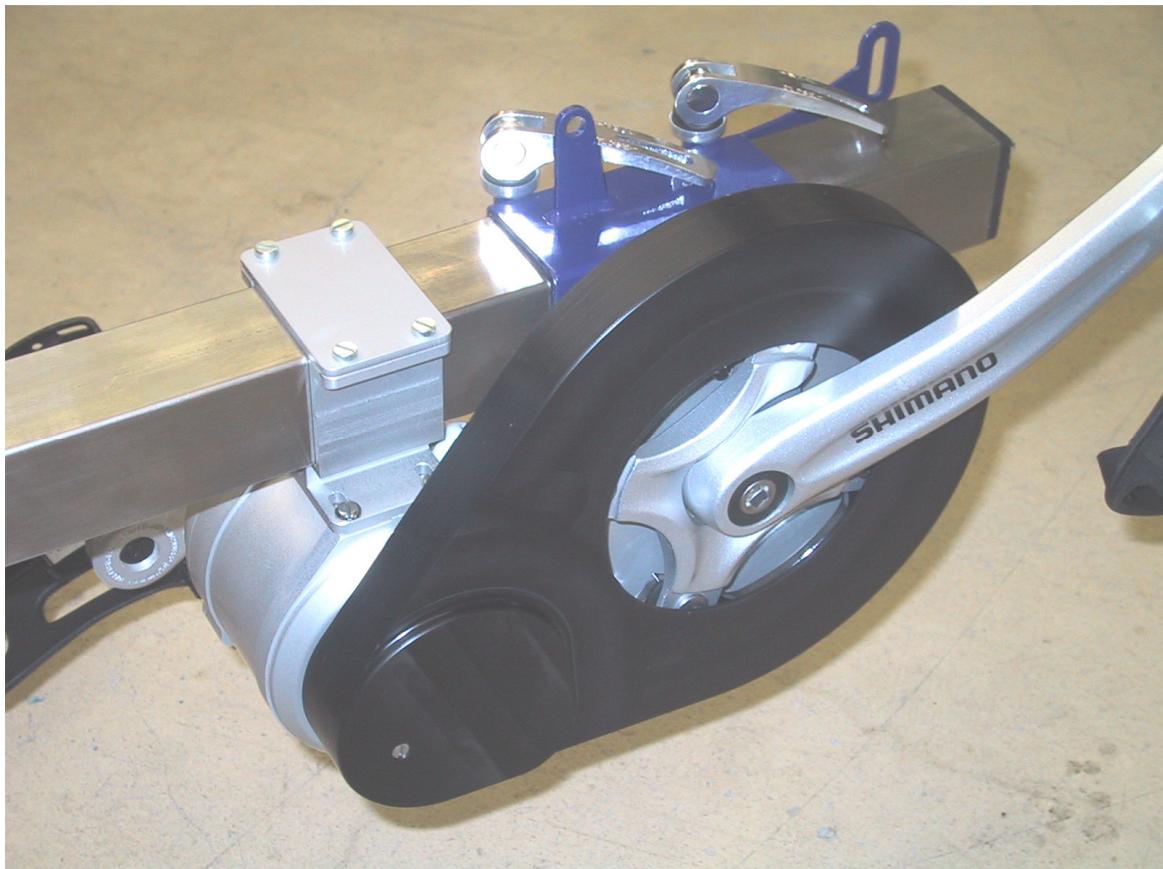


Abb. 17 Rechte Seite des Tretgenerator (kein Display montiert).

Unter der schwarzen Abdeckung: 1. Getriebestufe (Kette). Dank der Kette kann der Tretgenerator in dieser Bauform an normale Tretlager von Fahrrädern montiert werden.

Im silberfarbenen Zylinder: 2. Getriebestufe (Planetengetriebe) und Generator
(Nur die Pedale sind von Shimano, nicht der Tretgenerator!)



Abb. 18 Ansicht des Tretgenerator von links (Das Display des Digitrike ist hier nicht montiert). Im zylindrischen Gehäuse befinden sich die 2. Getriebestufe (Planetengetriebe) sowie der Generator (Nur die Pedale sind von Shimano, nicht der Tretgenerator!)

Radnabenmotor

Der Motor an sich ist kein Eigenprodukt der Projekt-Teilnehmer. Die mechanischen und elektrischen Schnittstellen sind jedoch von den Projekt-Teilnehmern definiert worden:

- Speichenflansch und Drehmoment-Stütze
- Anordnung der Hallsensoren in der elektrischen Maschine
- Stern-Wicklung

Technische Daten des Motors im Anhang (Spezifikationen des Pendolino).



Abb. 19 Radnabenmotor DiscPower in der Schwinge des Digitrike. Der Hebel verhindert Drehung des Motor in der Schwinge. Unter dem nach vorne kommenden, zylindrischen Gehäuse verbirgt sich die elektrische Maschine (PMS 080).



Abb. 20 Rechte Seite (zweistufiges Planetengetriebe) des DiscPower Radnabenmotor

Motor-Sensorik:

Sensorik zur Messung der Rotorstellung: standardmäßig 3 Hallsensoren

Temperatursensor: Ein interner Sensor konnte in den Prototypen aus Platzgründen nicht montiert werden. Stattdessen sollen externe Sensoren nachgerüstet werden.

Gewicht: Der Radnabenmotor mit einer Nennleistung von 1.2 kW wiegt 6.6 kg.

Vergleiche: Der Tretlagermotor des Flyer F wiegt 6.5 kg, darf aber nur 250 W freisetzen!

	Laborzweirad	Pendolino	Bemerkung
Tret-generator	Offenliegende Getriebe, induktive Näherungsschalter (Contrinex)	Gekapselter Tretgenerator, ein Hallsensor	
Rad-Antrieb	PMS 100 E-Motor in Dreieckwicklung treibt über eine Kette das Hinterrad	Radnabenmotor mit PMS 080 E-Motor in Sternwicklung, 2-stufiges Planetengetriebe	Lärm durch elektronisches Kommutieren ist weg!
Display & Controls	Display an Lenker, Bedienelemente auf Display (abgesehen von «Gas-Griff»)	Display an Fahrzeug-Rahmen, Bedienelemente an Lenkerende	
Gehäuse	Ein Schaltkasten in Rahmen-Viereck	Hübsche Gehäuse unter Sitz, mehrere Gehäuse	Nachteil Pendolino: längere Kabel => Tendenz zu Störanfälligkeit
Ver-Kabelung	Zuleitung von el. Maschinen zu Schaltkasten; «chaotische» Verkabelung intern in Schaltkasten	Kabelbaum mit Steckern	

Tabelle. 5 Änderungen resp. Verbesserungen beim Schritt vom Laborzweirad (2002/03) zum Pendolino (2004/05)

Bilanzen

Gewichtsbilanz Serie Hybrid

Die Funktion, welche im Serie Hybrid E-Fahrrad der Tretgenerator ausübt, nämlich die Uebertragung der Muskelkraft, übernimmt im herkömmlichen Parallel Hybrid Fahrrad der Kettenantrieb. Direktvergleich der Gewichte ist daher zulässig und sinnvoll.

Kettenantriebs-Typ	Kettenantrieb mit Kettenwerfer	3 x 7 Antrieb	12 Gang Nabenschaltung
Gewicht, kg (inkl. Pedalarme und Pedale)	4.3	4.6	6.3

Der Tretgenerator Modell 2004/05 wiegt 4.3 kg inkl. Pedale. Die Uebertragung der Muskelkraft geschieht resp. das Bremsmoment ändert wegen der 8 bit-Auflösung quasi stufenlos.

Ersetzt man die Hinterradnabe von 460g im Kettenantrieb mit Kettenwerfer durch die Velocity Nabe (rund 1.9 kg) erhält man ein Totalgewicht nur des Muskelkraftantrieb von 5.7 kg. Der Vergleich ist insofern interessant als der Velocity Antrieb auch stufenlos ist.

Wenn man sich überlegt wie schwer ein stufenloser mechanischer Antrieb wäre ist man vom geringen Gewicht des Tretgenerator angenehm überrascht!

Typische Energiebilanz eines Tretgenerator

Muskelkraftleistungen liegen im Bereich von 1 bis 600 W auf, wobei Alltagsradfahrer zwischen 100 und 200 W Leistung abgeben.

	Verluste, Watt	Bemerkungen
	typisch	
Getriebe	10	6
Leerlaufverluste Generator	10	7
Ohmsche Verluste Generator	10	6 (< 0.5 Ohm Innenwiderstand)
TOTAL	30 W	19 W

Tabelle. 6 Verluste im Tretgenerator

Radfahrer 100W	Verlust 20 bis 30%	Wirkungsgrad 70 bis 80%
Radfahrer 200W	Verlust 10% bis 15%	Wirkungsgrad 85 bis 90%
Rennradfahrer 300 bis 400W	Verlust < 10%	Wirkungsgrad > 90%

Tabelle. 7 Umrechnung auf Wirkungsgrade des Tretgenerators. Die tiefen Verluste und hohen Wirkungsgrade gelten für optimierten elektrischen Maschinen und Getriebe. Die höheren Verluste und tieferen Wirkungsgrade können mit eingekauften Komponenten erzielt werden

Vergleiche:

- Verluste in unmotorisierten Fahrrädern. Schaltanlagen weisen Wirkungsgrade im Bereich von 75 bis 95 % auf
- Laut Jan Cappelle und Kollegen (VU Brüssel, EVS 19, 2002) weisen die Kettenantriebe der von VUB gemessenen Pedelecs Wirkungsgrade von ca. 57 bis 93% auf. Die Mehrzahl der gemessenen Pedelecs hatte den Motor im Tretlagerbereich, d.h. der Motor benutzt den Tretantrieb ab Tretlagerwelle ebenfalls als Transmission. Dies bedeutet, dass nicht nur für den Tretantrieb, sondern auch für den elektrischen Antrieb die Wirkungsgrade klein sind.
Die schlechten Wirkungsgrade sind durch die mechanische Kopplung von Mensch und Maschine mittels in der Regel mehrerer Zwischenwellen und Getriebestufen bedingt.
- Bemerkung: Vergleicht man Tretgenerator und traditionelle Fahrradgetriebe vergleicht man Ungleiches: Es gibt keine mechanischen, stufenlose, gekapselte Fahrradantriebe.

Parallel Hybrid E-Bike/Pedelec

Der Mensch tritt in einem individuellen, engen Tretfrequenzband, ein Radfahrer tritt bsp. mit 75 +/- 5 U/min. Sein dynamischer Bereich geht also in der Drehzahldimension von 93% bis 107 % der Nenndrehzahl (siehe vorn, Abb. 8).
Verschiedene Menschen treten verschieden schnell, der Bereich reicht von unter 50 U/min bei Sonntagsfahrern bis 120 U/min bei Rennfahrern.

Im Parallel Hybrid e-Bike/Pedelec muss die elektrische Maschine in allen Fahrzeugen, welche den Motor im Bereich des Tretlagers montiert haben, in einem bestimmten Drehzahl-Verhältnis zum Menschen schnell drehen. Da das Tretfrequenz-Band des Menschen eng ist, muss die elektrische Maschine bei fast konstanter Drehzahl drehen (ausser beim Anfahren). Änderungen der nachgefragten Motorleistung können also nur in der Drehmoment-Dimension erfolgen. D.h. wird bsp. doppelt soviel Leistung nachgefragt muss doppelt soviel Drehmoment erzeugt werden. Drehmoment ist proportional zu Strom. Leistungsverdoppelung bedeutet Stromverdoppelung und entsprechend Vervierfachung der ohmschen Verluste.

Das Drehzahlspektrum über die Benutzergruppe aller Menschen überdeckt einen Bereich von 2.5 : 1. Es ist also sehr wohl möglich dass die Antriebsmaschine im Parallel Hybrid im maximalen Wirkungsgrad dann betrieben wird wenn langsam tretende Menschen drauf fahren, nicht aber wenn schnell tretenden Menschen drauf fahren, oder umgekehrt. Grundsätzlich ist Anpassung des Parallel Hybrid an alle Benutzergruppen schwierig.

In der Regel ist die Tretfrequenz von Radfahrern am Berg etwas niedriger als in der Ebene. D.h. die elektrische Maschine von Parallel Hybriden ist gezwungen am Berg langsamer zu drehen als in der Ebene. Die Leistung muss am Berg also über entsprechend mehr Drehmoment erzeugt werden. D.h. für die Auslegung des Parallel Hybrid E-Bike muss ein Kompromiss gesucht werden so dass man nicht nur entweder in der Ebene oder nur am Berg genügend Fahrleistung freisetzen kann sondern sowohl in der Ebene wie auch am Berg trotz mechanischer Kopplung der E-Maschine an den Menschen.

Fazit zu Parallel Hybrid E-Bikes (PHEB)

Der Wirkungsgrad kann bei einem PHEB auf einen Arbeitspunkt maximiert werden. Der Momentanwirkungsgrad ist in diesem Arbeitspunkt sehr gut, oft besser als beim Serie Hybrid. Der Parallel Hybrid kann meist entweder in der Ebene oder am Berg effizient Leistung freisetzen, nicht aber in beide Betriebspunkten. Anpassung an alle Benutzergruppen ist schwer, da die Tretfrequenzen von Menschen von unter 50 U/min bis über 100 U/min variieren.

Serie Hybrid E-Bike/Pedelec (SHEB)

Im Serie Hybrid E-Bike/Pedelec gibt es keine mechanische Kopplung von Mensch und Maschine da die Muskelkraft elektrisch übertragen wird.

Die Antriebsmaschine ist deshalb in der Drehzahldimension nicht in ein enges Drehzahlband gezwängt und kann im gesamten Drehzahlbereich zwischen Stand und maximaler Fahrzeuggeschwindigkeit Leistung abgeben. Vom Motor bis zum Rad genügen eine oder zwei fixe (nicht schaltbare) Untersetzungsstufen. (Bei den Parallel Hybrid E-Bikes/Pedelec mit Motor im Tretlagerbereich kommen zu der Übersetzung des Kettenantrieb meist noch Untersetzungsstufen hinzu welche die Motordrehzahl auf die Drehzahl der Tretlagerwelle reduzieren, mit entsprechender Verkleinerung des Wirkungsgrad für die elektrische Seite des Antrieb!).

Der Serie Hybrid ist geeignet für schnelle E-Bikes welche ein beliebiges Verhältnis zwischen Tretleistung und elektrischer Leistung erfordern als im Parallel Hybrid mit enger Kopplung von Mensch und Maschine möglich.

(Bezüglich Situation auf der Antriebsseite ist der Serie Hybrid identisch mit den Parallel Hybriden mit Radnabenmotor im Vorderrad oder Hinterrad).

Der Motor des Serie Hybrid muss gross dimensioniert werden, da sowohl die Tretleistung des Menschen wie auch die Leistung aus der Batterie übertragen werden muss.

Die Grösse des Motors ist nicht nur ein Nachteil, sondern führt dazu dass im Teillastbereich die tiefen Ströme wegen der tiefen Innenwiderstände nur geringe ohm'sche Verluste erzeugen. Am Berg ist die Kühlung wegen der Scheiben-Förmigkeit der im Serie Hybrid eingesetzten elektrischen Maschinen gut, so dass sich ihr Kupfer (auch aufgrund der Wärmekapazität der Maschine) nicht so stark erwärmt und die Maschine auch am Berg mit akzeptablem Wirkungsgrad arbeitet.

Auf der Seite des Tretpedal erlaubt der Serie Hybrid dem Mensch stufenloses Treten. Es gibt Verluste wegen der Wandlung von mechanischer in elektrische Leistung wie oben beschrieben. Es gibt keine jedoch keine Übertragungsverluste wegen Schaltpausen beim Beschleunigen wie

beim E-Bike mit Kettenantrieb, und der Tretgenerator kann nach dem Anfahren sehr schnell in den Nenn-Arbeitspunkt des Menschen gefahren werden.

Vergleich Serie Hybrid E-Bike mit Parallel Hybrid E-Bike

Ein direkter Vergleich ist nicht einfach da Energieverluste in den beiden verschiedenen Typen von Fahrzeugen davon abhängen in welchem Lastpunkt das Fahrzeug einerseits, aber auch die Energiequellen Mensch und Batterie sowie die E-Maschine betrieben werden.

Letztlich wird nur die Fahrpraxis auf verschiedenen Strecken mit den verschiedenen Fahrzeugen zeigen welche Antriebsart von E-Bikes und Pedelecs sich wann und wo bewährt.

Vereinfacht kann man sagen dass der E-Bike Parallel Hybrid einen hohen maximalen Wirkungsgrad in einem bestimmten Arbeitspunkt hat (der Arbeitspunkt wird durch die Tretfrequenz des Menschen definiert). Ausserhalb dieses Arbeitspunkt muss der Parallel Hybrid nicht unbedingt effizient sein nur weil er eine Fahrrad-Kette aufweist (von der man sagt sie sei eine effiziente Art der Transmission) !

Für sehr fahrradnahe Muskelkraft Hybride mit gegen oben begrenzten Verstärkungsfaktoren (beschränkte Hilfe durch den Motor) ist der Parallel Hybrid geeignet.

Es gibt sehr gute Parallel Hybride wie bsp. den Flyer C (mit dem Panasonic Antrieb). Der Elektromotor wirkt nicht auf die Tretlagerwelle sondern treibt mittels kleinem Ritzel die Fahrradkette nahe dem Kettenblatt des Tretlager. Somit gibt es nicht zu viele Untersetzungsstufen die Energieverluste erzeugen.

Nachteilig ist dass das Serie Hybrid wegen der zweifachen Wandlung mechanisch-elektrisch resp. umgekehrt auf der Muskelkraftseite immer gewisse minimale Verluste hat.

E-Maschine und E-Generator vom E-Bike Serie Hybriden arbeiten viel unabhängiger voneinander – nur elektrisch, nicht mechanisch gekoppelt - und behindern sich gegenseitig nicht. Elektrisch bremsen ist deshalb möglich da der Motor nicht an den Menschen gekoppelt ist. Der Serie Hybrid ist besonders geeignet für Muskelkraft Elektro Hybride welche in der Muskelkraft-Verstärkung hohe Dynamik aufweisen.

Parallel Hybrid	Maximaler Wirkungsgrad in einem Arbeitspunkt. Bei direkter mechanischer Kopplung (ohne Freilauf) behindert der Mensch die Maschine bei der Leistungsentfaltung ausserhalb des optimalen Arbeitspunkt Nicht stufenloses Getriebe mit negativen Einflüssen auf Fahrzeug-Design, Produktionsfreundlichkeit, Ergonomie und Wartung des Fahrzeug
Serie Hybrid	Wandlungsverluste mechanisch-elektrisch beim Tretgenerator. Keine gegenseitige Behinderung von Mensch und Maschine, d.h. die Maschine kann über einen grossen Drehzahlbereich effizient Leistung freisetzen Stufenloses, gekapseltes Getriebe, welches grosse Freiheiten gibt in Design, Fabrikation, Gebrauch und Wartung des Fahrzeug

Die Energiebilanz („Wirkungsgrad“ über eine in der Zeit andauernde Fahrt) hängt also vom Einsatz-Spektrum ab. Der Parallel-Hybrid kann im optimalen Arbeitspunkt sehr weit fahren, erreicht jedoch dann keine grosse Reichweite wenn der Benutzer ihn jenseits vom Optimum betreibt.

Der Serie Hybrid ist unempfindlicher gegenüber dem Benuterverhalten. Die minimale Reichweite ist garantiert durch die Energie der Batterie, der Tretgenerator als Energiequelle liefert umso mehr Energie je länger die Fahrt dauert.

Eigene Bewertung der Projektresultate

Konzept

Die Grund-Idee, dass Basis-Komponenten in mehreren Anwendungen mit offenen Architekturen – mobilen und stationären - angewendet werden könnten, ist immer noch eine gute Idee sofern man davon ausgeht dass sich Standard-Schnittstellen etablieren lassen.

Allerdings ist das Etablieren von Standards schwierig, insbesondere für KMU und Start-Up's denen die finanzielle Kraft fehlt. Auch haben gewisse Marktteilnehmer kein Interesse daran dass sich Standards etablieren denn dann würde sich der Wettbewerb intensivieren und durch die Economies of Scale für Komponenten würden gewisse Preise zu stark sinken.

Der Serie Hybrid hat Nachteile, bietet aber dank der Tatsache dass jede Fahrzeug-Topologie aus ihm abgeleitet werden kann, den Vorteil der Flexibilität. Die Schnittstellen sind nur elektrischer, nicht jedoch mechanischer Natur was Montage und Wartung vereinfacht.

Der Serie-Hybrid kann wegen seiner Universalität als Modell-System und als Umgebung für die Einbettung neuer Komponenten verwendet werden. Hat ein Steuerungssystem einen genug hohen Entwicklungsstand so sind sie gute Umgebungen zur Implementation von neuartigen, Energie-effizienten Komponenten in Produkte. Die Versuchung und die Not, dass Komponenten-Hersteller ein System selber rund um Ihr Kernprodukt herumbauen müssen um auf den Markt zu gelangen, sinkt (ein Problem bsp. für Hersteller effizienter Motoren wie bsp. Perm-Motor ist genau dies: dass es noch zuwenig Anbieter von Motorsteuerungen gibt die mit den Synchronmaschinen optimal kompatibel sind).

Oekonomie und Oekologie

Wenn Serie Hybrid Muskelkraftfahrzeuge sogar auf dem Markt existieren könnten würden effiziente elektronische Getriebe mit der Zeit eher auch für Fahrzeuge erschwinglich, bei denen man heute nicht bereit ist einen Mehrpreis für Effizienz zu bezahlen.

Bemerkung: Muskelkraftfahrzeuge sind (pro Kilogramm Gewicht) die teuersten Fahrzeuge und eignen sich daher sehr viel besser als Autos oder Motorräder zur Markteinführung von Effizienz-Technologien.

Produkt

Zu Projektende ist die Machbarkeit mehrspuriger Serie-Hybrid E-Fahrzeuge demonstriert. Die Kosten der Komponenten sind für kleine Stückzahlen bekannt. Das Kostenreduktions-Potential lässt sich abschätzen, und entsprechend lassen sich Business-Pläne nun auf sehr viel soliderer Basis rechnen als in den Frühzeiten dieses Innovationsprojektes.

Der Entwicklungsstand erlaubt, die noch zu lösenden Probleme genau zu identifizieren und erlaubt somit das Abschätzen der Risiken der finalen Schritte der Industrialisierung.

	Prädikat	Bemerkung
Fahrzeug als Testplattform	Top!	Wär auch als Produkt top!
Komponenten-Anordnung auf Fahrzeug & Verkabelung	Noch mehr zusammen-fassen und vereinfachen!	<ul style="list-style-type: none"> • Motorsteuerung direkt auf Motorgehäuse von Radnabenmotor montieren (Idee Kurt Wenger) • Prints zusammenfassen • Elimination/Reduktion von Störungen: Ueberarbeitung Verkabelungskonzept, Erdung, ...
Ergonomie	Ok! Lenkerendschalter sind bedien-freundlich	Eingekaufte Bedienelemente sind gut aber nicht optimal. Intelligente Bedienelemente entwickeln (so dass zum Verkabeln kein Display in der Nähe sein muss)?
Tretgenerator Konstr. Fuchs/Roder	Ok! (noch nicht Produkt-Reife)	<ul style="list-style-type: none"> • Zu filigran konstruiert (bsp. Verschraubung) => Robuster konstruieren • Schmierung gibt relativ viel Leerlaufwiderstand im Planetengetriebe => Sonnenrad nicht zwischen Endplatten von Planeten laern
Radnabenmotor	Ok! (noch nicht Produkt-Reife)	<ul style="list-style-type: none"> • Erst eine einfache, noch keine teure Verzahnung: Optimierungspotential beim verbleibenden Geräusch! • Für Testphase noch mit Temperatur Sensor ausrüsten
Batteriekoffer	Ok für Prototyp!	Muss im Produkt besser luftgekühlt sein

Tabelle. 8 Bewertung der Eigenschaften des Pendolino unter den Geschichtspunkten eines Produktes

Im Rahmen des Projektes wurde die Erfahrung gemacht, dass die Zahl der Schnittstellen auch in einem dezentralen System minimal gehalten werden muss. Weist ein E-Management-System zu viele Schnittstellen auf, ist es zu verteilt, benötigt man extrem hoch entwickelte Software und Testumgebungen sowie viel Erfahrung bei der Inbetriebnahme und dem Debuggen solcher Systeme.

Die Wirkungsgrade entlang der Transmission sind gut genug um brauchbare Serie Hybrid Fahrzeuge zu bauen. Dies zeigt der direkte Vergleich mit den E-Bikes und Pedelecs mit Kette.

Bis zum physikalisch möglichen Maximum des Wirkungsgrad kann man beim heutigen Entwicklungsstand jedoch immer noch einige Prozent Wirkungsgrad aus den Komponenten und aus dem System herauskitzeln.

Der Nutzen dieses Projektes besteht, auch wenn im Projekt vor allem die Energiewandler, weniger die Energiespeicher (*), verbessert worden sind:

Erstmals können die Komponenten sowie der Antriebsstrang des „weltkleinste Serie Hybrid“, des „Ketten-losen E-Fahrrad“ oder – nach Harald Kutzke – des „electronic bike“, auf einem ansehnlichen Prototyp-Fahrzeug gezeigt werden.

(*) Grosses Thema im Rahmen der Machbarkeitsstudie „Energie-effizienter Leichtscooter“

Zielerreichung, Hauptziel:

Für die Energiewandler Generator und Antriebsmotor konnte das Ziel der Integration ins System erreicht werden.

Da nicht mehr neugebaute Fahrzeuge von Jakob Gilgen mit dem Antrieb ausgerüstet wurden, sondern käufliche Fahrzeuge, konnten wegen des viel kleineren Fahrzeug-Gestehungspreis sogar zwei Fahrzeuge gebaut werden (Laborzweirad & Digitrike „Pendolino“).

Komponenten, die am Ende des Projektes viel weiter sind als zu Beginn:

- Tretgenerator Modell 2004/05 wurde von Fuchs konzipiert; Teileherstellung für die Tretgenerator-Prototypen des Digitrike durch Brüggli.
- In Ermangelung eines Motors aus CH-Entwicklung mit passendem Reifegrad wurde der Disc Power Motor der deutschen Firmen Perm-Motor und Framo Morat eingesetzt

Auf Seite Energiequelle (bsp. Brennstoffzelle) gelang es nicht einen Partner konkret zu gewinnen eine Komponente für den Einbau bereit zu machen. Das Interesse der Brennstoffzellen-Entwickler ist aber vorhanden, nach der Lösung von doch noch vorhandenen Kinderkrankheiten von Brennstoffzellensystemen im Kleinleistungsbereich über Testumgebungen wie den vorliegenden Serie Hybrid verfügen zu können.

Topologien für die Einbindung von Supercapacitors ins System sind studiert worden, aber weil die Projektpartner nicht auf Supercapacitors drängten und stattdessen nach besseren Batterien verlangten wurde die Kombination von Batterien mit Supercapacitors nicht weiterverfolgt.

Ein Erfolg ist sicher dass das Serie Hybrid E-Fahrrad, dessen Entwicklungsursprünge am „Abend-Technikum“ in Bern waren, während der Projektlaufdauer Eingang in eines der grundlegendsten Bücher über Fahrräder gefunden hat: Bicycling Science aus dem MIT Verlag (Siehe Ref. 9).

Noch offene Probleme

Technisch

Steuerung, Regeltechnik

Die für das Fahren wichtigen Parameter Iststrom, Isttemperatur, Sollstrom etc. werden via den Hauptschalter (Processmodul, früher Peripheriemodul genannt) kommuniziert. Dies erzeugt eine Totzeit im dezentralen System welche Regelungs-technisch problematisch ist. Massnahme: Kommunikationsverbindungen im System reorganisieren

Die „Generation 0“ Prints der Hardware sind noch zu wenig störfest. Massnahme: Hardware fertig industrialisieren (die EMV Regeln sind beim Bau der Komponenten berücksichtigt worden, da aber die Hardware als „Kit für Prototypen“ konzipiert ist konnten nicht alle möglichen EMV Massnahmen realisiert werden)

Es gibt zu viele Schnittstellen und Prints im System. Grund: Das Konzept war das eines flexiblen Kit zum Bau von Prototypen von Fahrzeugen verschiedster Art. Massnahme: Reduktion auf das für ein spezifisches Produkt Notwendige

Getriebe

Das eingekaufte Planetengetriebe des Tretgenerator hat unter Last noch zu viel Reibung und es schlägt mit reibungssarmer Fettung zu schnell aus. Massnahme: Optimierte Getriebe mit korrektem Spiel und besserer Zahnform konstruieren und bauen

Im Produkt den Generator leicht grösser wählen als der Torcman Monster ist so dass das Uebersetzungsverhältnis nicht höher als zirka 20 gewählt werden muss

Der Radnabenmotor kann laut Getriebehersteller noch leiser werden. Massnahme: Optimierung der Verzahnung

Elektrische Maschinen

Der Generator hat den Vorteil ein einkaufbares Teil zu sein; der Wirkungsgrad könnte jedoch durch Optimierungen wahrscheinlich um ca. 5 bis 10% verbessert werden

Kurzfristige Massnahme: Eventuell doch keine so kleine Maschine wie den Torcman wählen, sondern bsp. eine grössere Maschine wie den PMS 080 von Perm-Motor GmbH

Mittelfristige Massnahme: Optimierungsrechnung eines optimalen Tretgenerator und Bau eines noch besseren Generator

Datalogging

Realisation eines Data Logging System via CAN-Bus das nicht so schlagempfindlich ist wie ein Laptop

Entwicklungsumgebung

Für nachfolgende Arbeiten benötigt man einen Prüfstand für die Generator-Einheit als Ganzes (inkl. Getriebe) um realistische Dauertests machen zu können

Der Rollenprüfstand kann die Räder zur Fahrsimulation grosser Steigungen zu wenig bremsen. Massnahme: Prüfstand ohne Rolle, mit direkter Kopplung von Radnabenmotoren und Bremsmaschine so dass Drehmomente gemessen werden können welche 20% oder noch mehr Steigung entsprechen. Direkte Drehmoment-Messung statt indirekte über die Bremsmaschine

Minimale Anzahl der computergestützten Entwicklungstools um Zeit und Kosten zu sparen

Oekonomisch

Marketing

Für die Weiterentwicklung sind nun Angaben zu Marktsegment und zu Product Placement gefragt so dass ein Produkt entwickelt werden kann welches bezüglich Komplexität und Kosten optimiert ist

Wartbarkeit

Die Software ist als „umfassend“ zu bezeichnen weil in der Anfangsphase der Systementwicklung ein sehr breites Anforderungsspektrum bestand. Bsp. hätte das Antriebssystem auch in Booten mit bis zu 14 Generatoren angewendet werden sollen. Deren Wartung, Test sowie Weiterentwicklung ist teurer als wenn minimale, auf eine spezifische Anwendung hin optimierte Software vorhanden wäre.

Massnahme: Die Anzahl Module von Hardware und Software müssen auf das notwendige Minimum reduziert werden so dass die Anzahl Fehlermöglichkeiten minimal werden, so dass der Aufwand zur Wartung und Weiterentwicklung minimal wird

Betrieblich

Für die Durchführung der eigentlichen Produkt-Entwicklung ist die FH möglicherweise nicht der ideale Ort. Massnahme: Trennung in Forschung und Entwicklung, Forschung eventuell in der FH behalten, Entwicklung in die Industrie auslagern

Potential

Aus dem Antrieb bestehend aus Generator, Motor, Batterie und Display inkl. Bedienelemente können diverseste Produkte abgeleitet werden.

Andere Anwendungen für den kompletten oder ergänzten Antriebskit bestehend aus Generator, Motor, Batterie und Display inkl. Bedienelemente

Radnabenmotor mit Finne und Schiffschaube zum elektrischen Aussenbord-Motor umbauen. Einsatz in Faltbooten, Kanu, etc. und als Schleppmotor für kleinere Segelschiffe

Mehrere Tretgeneratoren kombiniert mit einem oder mehreren Motoren in allen Arten von Mehrpersonenfahrzeugen

Teilmenge Generator, Batterie und Display inkl. Bedienelemente

Dezentrale Energie-Erzeugungsanlage

Notstrom-Anlage für remote places (Alphütten, Yachten, Notunterkünfte)

Trainingsgeräte und Reha-Geräte (Generator kann auch als Motor eingesetzt werden im Fall von Bewegungsentrainern)

Einsatz zur Stromversorgung von Fernseher, Laptop

Teilmenge Motor, Batterie und Display inkl. Bedienelemente

Kleine Elektrofahrzeuge aller Art

Tretgenerator mit Supercapacitor-Speicher

Ein Tretgenerator mit Supercapacitor-Speicher stellt eine lagerbare Energiequelle dar, insbesondere für Notstromeinsätze

Einsatz in den Ländern des Südens als Energiequelle für LED Beleuchtung, Internetstationen, eventuell kleine elektrische Werkzeuge

Motorsteuerung

Einsatz mit bürstenlosen Motoren und permanentmagnetisch erregten Synchronmaschinen
(Lieferung an Kunden von Herstellern von solchen Maschinen, bsp. Perm-Motor)

Weiteres Vorgehen

Produkt-Entwicklung

Marketing

Gewünschte Art des Produkt definieren damit spezifisch entwickelt werden kann

Organisation

Definieren welche Tätigkeiten als Kernkompetenz weiter selber ausgeführt werden sollen

Partner finden welche sich optimal ergänzen

Technik

Komplexitätsgrad optimal wählen

Produkt spezifizieren

Prüfungen und Tests spezifizieren

Prüfstände bauen, auch für Dauertest

Finales Produkt entwickeln

Forschung

Testen

Weiterhin Testfahren des Digitrike „Pendolino“

Forschungsthemen

Supercapacitors

Eventuell einsetzen direkt im Tretgenerator so dass die potentielle Energie eines Menschen beim Anfahren niederohmig aufgenommen werden kann (und eventuell beim Bremsen die rekuperierbare, kinetische Energie des Fahrzeug) => Stand-alone Tretgenerator als eine hochmobile, lagerbare Energiequelle mit „Auto-Boot Funktion“

Funktionen des Tretgenerator entwickeln welche in Training und Rehabilitation angewendet werden können wie bsp.: Programmiergerät bauen so dass Maximaldrehmoment, Maximaltretleistung, Tretmoment in Abhängigkeit der Pedalstellung von Benutzern oder medizinischem Personal vorgegeben werden können

Info:

Die Tretgenerator-Elektronik resp. die Generator-Regelalgorithmen werden weiterentwickelt, bezahlt von Swissmove AG (Eine im Jahresbericht 2003 rapportierte Schlussfolgerung wird umgesetzt).

Danksagung

Wir danken den Projektpartnern, insbesondere

Autork (Praktische Arbeit durch Jakob Gilgen und Andreas Fuchs)

Biketec für das zur Verfügung stellen von 36V 8Ah NiMH Flyer F Akku

Kurt Fischer und Adrian Hungerbühler von Brüggli sowie Andreas Fuchs („Industriepartner“ nach dem Rückzug von Autork AG)

Und last but not least danken wir den Verantwortlichen der Abteilung EKT, Elektro- und Kommunikationstechnik der HTI, Hochschule für Technik und Informatik, dass das Projekt trotz Umstrukturierung der Schule bis mindestens zum Ende der technischen und ökonomischen Machbarkeit (*) weitergeführt werden konnte.

() Die Machbarkeit mit weniger komplexer Technologie ist erstmals 1998 gezeigt worden, auf Stufe Funktionsmodell, mit jedoch nicht produkt-tauglichen Komponenten und System-Architekturen. In der Zwischenzeit sind die Komponenten so weit gebracht worden dass Industrialisierung eines Produkts erfolgen kann*

Symbolverzeichnis

BMS	Batterie Management System
PHEB	Parallel Hybrid E-Bike/Pedelec
SHEB	Serie Hybrid E-Bike/Pedelec

Literaturverzeichnis

a) Bücher

Frank E. Jamerson, **Electric Bikes Worldwide Reports 2004**, Electric Bicycle Battery Company, Naples, Florida / Petoskey, Michigan, Juni 2004, <http://www.ebwr.com/>

b) Artikel in Zeitschriften und Konferenzbänden

(Frühe Artikel sind hier nicht zitiert, lassen sich aber auf der unten angegebenen Internetseite finden)

- [1] J. Blatter and A.W. Fuchs: **The smallest series Hybrid vehicle in the world is a PowerNet compatible, fully electronical, chainless cycle!** Published in the book: Graf, Alfons, *The New Automotive 42V PowerNet Becomes Reality. Stepping into Mass Production*. In coop. w. 24 co-authors, 2003, ISBN 3-8169-2170-1
- [2] J. Blatter: **Elektronische Transmission, ein technischer Ueberblick**, aus *Infobit, der Hauszeitung, Hochschule für Technik und Architektur Bern HTA Bern - Infobit*, Heft 1/2003, Seiten 10 – 13, 2003.
- [3] J. Capelle, P. Lataire, G. Maggetto, R. Meeusen, F. Kempenaers: **Characterisation of Electric Bicycle Performances**, aus *Proceedings of EVS19*, 2002.
- [4] A. Fuchs: **Baukastensystem für Antriebe von Kleinfahrzeugen**, SIA-gii, Wettbewerbseingabe Eingabe für das Preisauftschreiben „In Bewegung“, Kategorie: Antriebe für Fahrzeuge, Juli 2003.
- [5] A. Fuchs: **Modular Propulsion System for Series Hybrid Electronic Cycles, Series Hybrid Scooters and many other kinds of small vehicles**, Article for the proceedings of evs 20, 2003.
- [6] A. Fuchs: **Modular Propulsion System for Series Hybrid Electronic Cycles, Series Hybrid Scooters and many other kinds of small vehicles**, Poster for the small lectures series of evs 20, 2003.
- [7] A. Fuchs: **Komplett-Antrieb für E-Fahrzeuge**, autork, 2004.
- [8] A. Fuchs und Kurt Wenger: **Generatorische Messung des Radnabenmotor – Version für Rollstuhl**, HTI Biel, Oktober 2004.
- [9] D.G. Wilson: **Bicycling Science, Third Edition**, p. 337 bis 340, The MIT Press, Cambridge, 2004

c) **Links**

Internetsites der ehemaligen HTA Bern: <http://www.hta-be.bfh.ch/~fuchs/Transmission/>
(seit Anfang 2004 nicht mehr gewartet)

d) **Videos**

Videos sind vorhanden von allen Prototyp-Fahrzeugen die je mit dem Serie Hybrid E-Fahrradantrieb ausgerüstet worden sind. Auf Nachfrage bei Andreas Fuchs (andreas.fuchs@bluewin.ch)

Anhang

Personelle Veränderungen im Laufe der Zeit

Periode	Projekt-Dach	Gesamt-Projekt-Leitung	Techn. Leitung	Eigenleistung erbringende Industrie-Partner	Bemerkungen
2002 bis Ende 2003	HTA Bern	Dr. A. Fuchs	Dipl. Ing. Jürg Blatter	Autork ag, Dr. A. Fuchs	Jakob Gilgen arbeitete bis ca. Quartal 1 von 2003 technisch mit
1. Hälfte 2004	EKT, HTI Burgdorf	Dr. A. Fuchs	Dipl. Ing. Jürg Blatter	Autork ag, Dr. A. Fuchs	
Sommer 2004 bis Januar 2005	EKT, HTI Biel	Dr. A. Fuchs	Dipl. Ing. Jürg Blatter	Autork ag, Dr. A. Fuchs	Jürg Blatter entscheidet sich gegen einen Einstieg bei autork ag
Januar bis Sommer 2005	EKT, HTI Biel	Dr. A. Fuchs	Dipl. Ing. Kurt Wenger	Brüggli und Dr. A. Fuchs	

Uebersicht über alle je gebauten Serie Hybrid Muskelkraft Elektro Fahrzeuge

(siehe folgende Seiten)

Periode	Name	Foto	Komponenten
1996-97 (abgebaut)	„Ur-Funktionsmodell“		<p>Dunkermotor DC Motor als Generator Heinzmann DC Motor Motor exzentrisch zu Rad</p> <p>Beide Getriebe: Kettengetriebe mit Planetengetriebe kombiniert, Planetengetriebe direkt auf E-Maschine (Generatorplanetengetriebe 1:50 !)</p> <p>Generator exzentrisch zu Tretlager</p>
1997-98 (fährt 2005 immer noch!)	Kettenlose E-Leitra		<p>Bosch-DC Motor als Generator Heinzmann DC Motor wie auf Ur-Funktionsmodell</p> <p>Beide Getriebe: Kettengetriebe mit Planetengetriebe kombiniert Generator exzentrisch zu Tretlager</p>

2001-02 (abgebaut)	Gilgen Vierrad		<p>Circlemotor 280 als Generator; zweistufiges Kettengetriebe Generator konzentrisch zu Tretlager</p> <p>Circlemotor 200 als Motor; Zahnriemen einstufig Motor exzentrisch zu Rad</p>
2002-03 (fährt 2005 noch)	Laborzweirad EZ1		<p>Generator: Perm-Motor PGS 080; zweistufiges Kettengetriebe Generator exzentrisch zu Tretlager</p> <p>Motor: Perm-Motor PMG 100; einstufiges Kettengetriebe Motor exzentrisch zu Rad</p>

2004-05	Digitrike "Pendolino"		<p>Torcman Monster 20mm als Generator; Kettengetriebe und Planetengetriebe Generator exzentrisch zu Tretlager</p> <p>DiscPower DP 080G-12 (Radnabe mit zweistufigem Planetengetriebe) Motor konzentrisch zu Rad</p>
---------	-----------------------	--	---

Uebersetzungsverhältnisse Generator-seitig:

Fahrzeuge	Uebersetzung, Grössenordnung	Bewertung
Ur-Funktionsmodell und Leitra	1:50	Viel zu grosse Uebersetzung wegen zu kleinem Generatormoment bei zu hohen Nenndrehzahlen von ca. 3000 U/min
Gilgen Vierrad und Laborzweirad EZ1	< 1:20	Gilgen Vierrad: Langsam drehender Generator tauglich für ein Vierrad, jedoch zu schwer für ein Zweirad. Laborzweirad: Dank drehmomentstarkem Synchrongenerator kleines Uebersetzungsverhältnis
Pendolino	1:28.5	Der Tretgenerator ist leichter als ein E-Bike Kettenantrieb. Es muss untersucht werden ob die Dimensionierung des Generator auf dem Pendolino besser ist als diejenige des Generator auf dem EZ1 oder umgekehrt.

Untersetzungsverhältnisse Motor-seitig:

Fahrzeuge	Untersetzung, Grössenordnung	Bewertung
Ur-Funktionsmodell und Leitra	1:10 bis 1:20	Trotz grosser Untersetzung und trotz dem Motor Heinzmann SL120-2NFB nicht genügend drehmomentstark am Berg
Gilgen Vierrad und Laborzweirad EZ1	< 1:10	Gilgen Vierrad: Riemenantrieb Laborzweirad: Kettenantrieb Akzeptabel als technische Lösung
Pendolino	1:12	Radnabe DiscPower mit PMS 080 Motor. Ideal. Offen ist per August 2005 die Standfestigkeit / Dauerhaftigkeit des Getriebe; muss durch Tests „erfahren“ werden

Technische Daten der Fahrzeug und ihrer Antriebe

(Provisorisch)

Fahrzeug	EZ-1	
Hersteller Fahrzeug	Easy Racers Inc., www.easyracers.com	
Verantwortung Fahrzeug	A. Fuchs	
Lieferant elektrische Maschinen	Perm Motor GmbH, www.perm-motor.de	
Typ Tretgenerator	Nackte Maschine, zweistufiges Kettengetriebe Flevo-Bike Tretlager als Zwischenachse	
Anzahl Generatoren	1	-
Tretkurbellänge	175	mm
Typ Getriebe	Zweistufiges Kettengetriebe, Kette 1/2", Freilauf	Name
Uebersetzung	17.4	-
Typ Generator	PGS 080, 0.35 kW, 25V	Name
Typ Antriebsmodul	Motor, Kettengetriebe 1-stufig	
Anzahl Motoren	1	-
Typ Motor	PMS 100	Name
Typ Getriebe	Kette 1/2"	Name
Untersetzung	5.9	-
Raddradius	240	mm
Energiespeicher	Flyer Akkupack	
Typ Energiespeicher	NiMH, Nominal 8 Ah, faktisch ca. 7 Ah	Name
Nennspannung	36	V
Kapazität	8	Ah
Nenn-Entladestrom	nicht def.	A
Masse	ca. 6 kg	Kg
Generator	PGS 080	
Leistung	0.35	KW
Nennmoment	2.8	Nm
Nennstrom	8.5	A
Nenndrehzahl	1200	U/min
Nennspannung	25	V
Motor	PMS 100	
Leistung	0.8	KW
Nennmoment	2.71	Nm
Nennstrom	25	A
Nenndrehzahl	2820	U/min
Nennspannung	24	V

Grob-Spezifikationen der elektronischen Muskelkraftransmission auf Pendolino

Data may be subject to change

Data by suppliers to validate

10.10.2004, mod. 21.06.05

Komponenten für	Integrierten, kettenlosen E-Antrieb mit Tretgenerator für
Fahrzeugtyp	Muskelkraftfahrzeug, 3- oder 4-Rad
Funktionalität	Automatisches, stufenloses, elektronisches Getriebe
Preis	ohne Kette oder Kardanwelle (Prototyp)

Anzahl Komponenten:

Tretgenerator	1	Stück
Radnabenmotor	1	Stück
Batterie	1	Stück
Display mit Bedienelementen	1	Stück
Verkabelung	1	Satz
Mech. Fahrradkomponentensatz	0	Satz

Tretgenerator

Gewicht exkl. Tretpedale	ca. 3	kg
Tretkurbellänge typisch	175	mm
Nennleistung	ca. 150	W
Nenn-Tretfrequenz	ca. 75	U/min
Typ el. Maschine	bürstenlos, permanentmagnetisch erregt	-
Typ Getriebe	zweistufig übersetzend	-

Radnabenmotor

Durchmesser inkl. Speichenflansch	208.2	mm
Gewicht ohne Speichenflansch, Speichen, Felge, Drehmomentstuetze 6.6 (mit 1:12 Unterstellung)		kg
Typ el. Maschine	Synchronmaschine, permanentmagnetisch erregt	
Max. Leistung bei max. Speed	bis 1.2	kW
Anpassung an nationale Vorschriften	durch elektronische Begrenzung	
Typ Getriebe	Planetengetriebe max. zweistufig unterstellt (1:12)	
Raddurchmesser	47.4 (ETRTO 40-406)	cm
Drehmoment am Motor	2.55	Nm
Max. Speed Ebene	33.5	km/h
Max. bergab	ca. 45	km/h
Max. Motorstrom AC-seitig (Phasenstrom)	85	A
Max. Motorstrom DC-seitig (Batt & Tretgenerator)	25	A

Batterie

Batterietyp	NiMH	
Gewicht	15 (2 Batterien zu 12Ah)	kg
Nennspannung	36	V
Nennkapazität	2 x 12Ah	Ah
Maximalstrom	mind. 30	A

Display & Bedienelemente

Betriebsmodi	Pedelec (Tretpedal-gesteuert) oder Gasgriff-gesteuert (oder kundenspez.)
Anzeige von	Geschwindigkeit, Strecke, Tretleistung, Tretfrequenz, Motorleistung

Bem. Der Tretgenerator ersetzt einen Kettenantrieb von (inkl. Tretpedale)

ca. 4.3 kg, Kettenantrieb

oder ca. 4.6 kg, 3x7 Antrieb mit Nabenschaltung

oder 6.3 kg, 12-Gang Nabenantrieb

Ausmessen des Radnabenmotor-Prototyp

Die Firma Perm-Motor GmbH in Breisach bei Freiburg im Breisgau lieferte der HTI Biel einerseits für das SafeChair Projekt aber auch für weitere Projekte wie dieses hier den Prototyp eines neuartigen Fahrradantriebes. Der Prototyp welcher an der HTI Biel vermessen wurde ist als Rollstuhlmotor im oberen Leistungsbereich konfiguriert (Hohe Untersetzung von 1:21, Dauerleistung 500W).

Bilder



Abb. 21 Der Radnabenmotor im Größen-Vergleich zu einem 20" Fahrrad-Rad. Die linke Geäusehälfte enthält den eigentlichen Elektromotor mit der Verbindung zum Fahrzeugchassis (im Bild mit Schraubverbindung zu Supportplatte). Im rechten Gehäuseteil ist das Untersetzungsgetriebe untergebracht, welches direkt mit einer Radfelge verbunden werden kann.



Abb. 22 Der Radnabenmotor mit montierter Roller-Felge

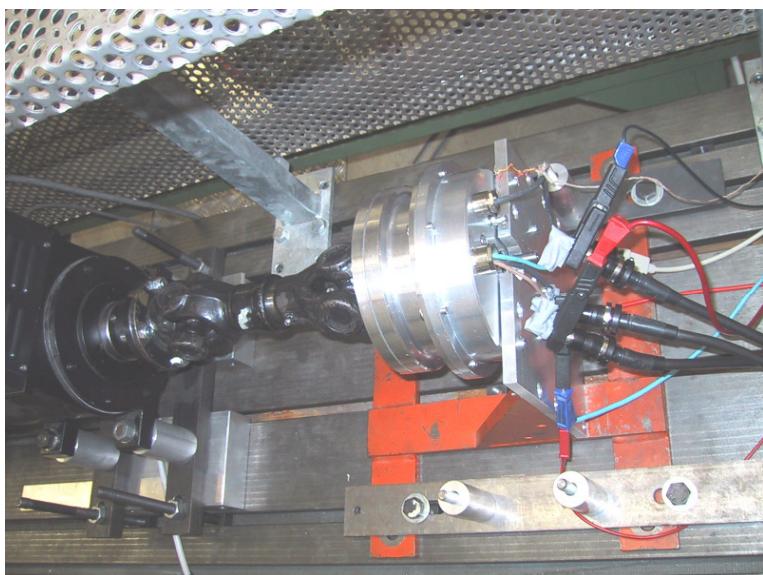


Abb. 23 Der Radnabenmotor auf dem Prüfstand im Labor Industrie-Elektronik der HTI Biel. Links die Drehmoment-Messwelle, rechts der Motor bestehend aus Getriebe und Motor-Gehäuse.

Messresultate

Der Prototyp des Radnabenmotors wurde generatorisch vermessen. Dies bedeutet, dass die hier dargestellten Wirkungsgrade tiefer sind als diejenigen, welche im Motorbetrieb erreicht werden können.

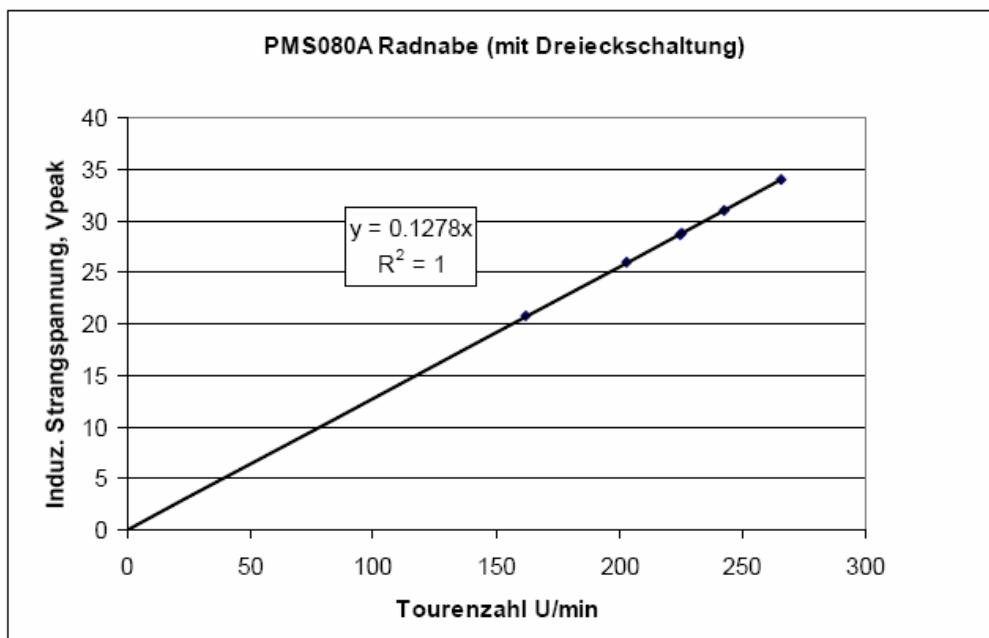


Abb. 24 Spannung in Funktion der Drehzahl. Bei 24V Batteriespannung (Effektivwert der Spannung) dreht der Nabenumotor mit ca. 265 U/min.

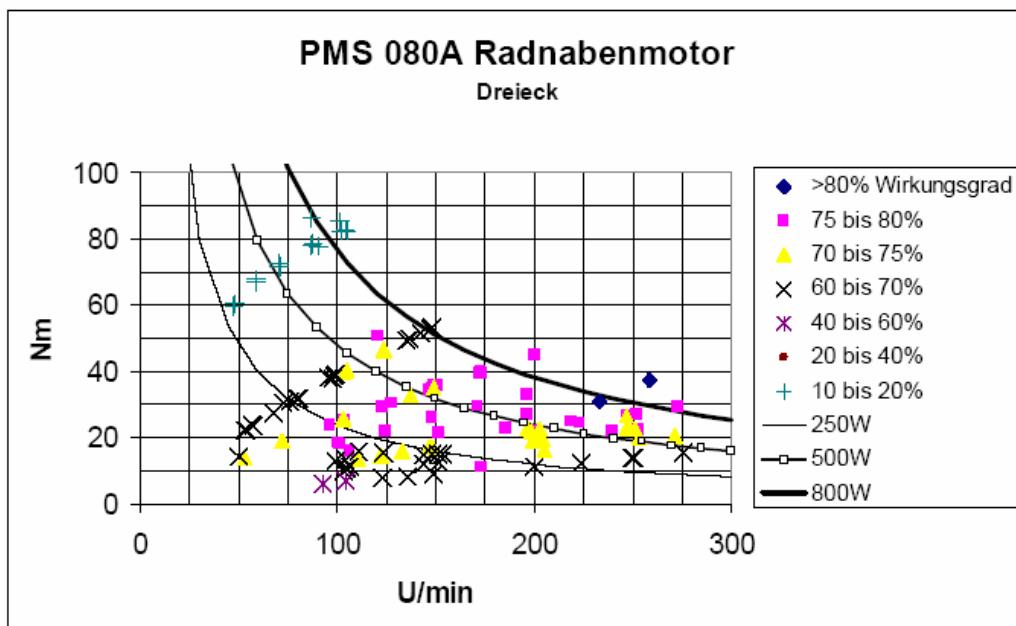


Abb. 25 Wirkungsgrade von Arbeitspunkten (U/min / Nm).

Typische Arbeitspunkte von Rollstuhlrädern liegen bei bis 200W Leistung; an 10% Steigung werden ca. 30 Nm benötigt. Das Bild zeigt, dass in diesem Bereich die Wirkungsgrad bei 70 bis 80% liegen, was im Vergleich zum Stand der Technik hoch ist.

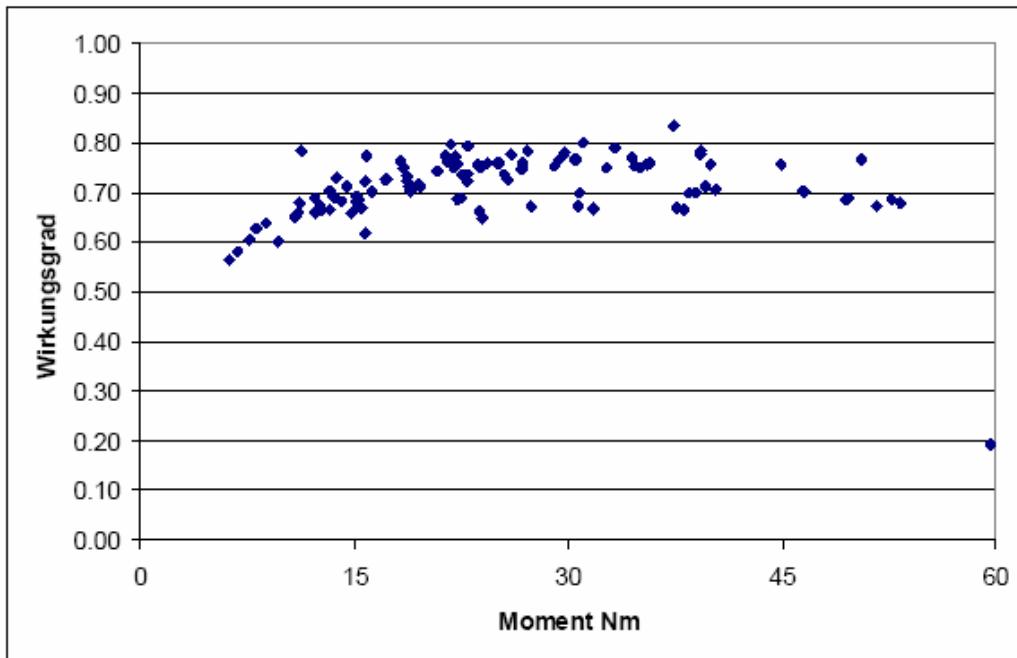


Abb. 26 Dynamisches Verhalten des Motor. Das Bild zeigt, dass der Motor über einen weiten Drehmoment-Bereich gute Wirkungsgrade hat. Vergleich: Marktüblich sind 60 bis 75% Wirkungsgrad bei 5 bis 20 Nm bei grossen Motoren (schwer).

Publikationen

Publiziert

Publiziert im Rahmen der EVS20 Konferenz. Scheinbar fehlt aber das Paper auf der CD Rom mit den Konferenzberichten:

Andreas Fuchs. ***Modular Propulsion System for Series Hybrid Electronic Cycles, Series Hybrid Scooters and many other kinds of small vehicles.*** EVS 20, Long Beach, 2003

Publiziert als Paper No. 9 im „Human Power eJournal“ des „Human Power Institute“ (www.hupi.org):

Andreas Fuchs: ***Analysis and Visualisation of Data Collected from Human-Electric Hybrid Bicycle-Tests.*** Hupi.org, Herbst 2005

Modular Propulsion System for Series Hybrid Electronic Cycles, Series Hybrid Scooters and many other kinds of small vehicles

Andreas Fuchs, PhD
Berner Fachhochschule – University of Applied Sciences Berne
Hochschule fuer Technik und Architektur Bern, HTA-BE
Morgartenstrasse 2c, CH-3000 Bern 25, Switzerland
andreas.fuchs@hta-be.bfh.ch
private e-mail: andreas.fuchs@bluewin.ch
Phone# +41 31 335 54 31, Fax# +41 31 333 20 03

ABSTRACT

Modern technologies are best implemented first in small vehicles rather than in automobiles because the risk is much smaller due to the smaller project size and the higher price of those small vehicles per unit weight than automobiles.

This paper presents a modular system for the propulsion of small vehicles that uses the PowerNet 42V standard for its main DC net and a CAN-bus for the information distribution to the modular components of the drive system. The system was developed at the University of Applied Sciences in Berne for autork ltd., a start-up company.

Development-goals were: good performance-to-price-ratio, safety, modularity, scalability. The system is ready to be applied to customer applications like (bi)cycles, mopeds, scooters, fork lifts, golf carts, wheelchairs, etc.

A prominent application of this system is the chainless series hybrid electronic cycle. For the elimination of the traditional chain on e-cycles autork won the Wall Street Journal Europe Innovation Award 2001 in the category Business/Transportation.

Keywords: bicycle, LEV, Series HEV, intelligent control system, module

INTRODUCTION

Field trials with various kinds of new vehicles in Mendrisio and other towns in Switzerland showed that energy efficient hybrid vehicles and small vehicles like scooters and electric bicycles are preferred by consumers over purely electric cars (Ref. 4).

This confirms that the applied research performed since 1996 at the University of Applied Sciences in Berne with the aim to increase energy-efficiency, to reduce costs and to improve the ergonomics of small urban vehicles makes sense. Such research had been started to improve a prototype of an all-weather all-seasons human-electric-hybrid in order to make industrialisation, distribution, everyday-use and maintenance economically feasible.

It was recognized that mechanical transmissions were too expensive and too maintenance-intensive to be practical. Therefore an electronic transmission for human power was conceptualized 1995/96 and actually built by Jürg Blatter at HTA Bern in 1997. This transmission is probably the first ever properly working electronic, continuously variable human power transmission (CVT) for cycles which transmits human power from the pedalled generator directly into the vehicles motor. To be industrialized, the working model from 1997 was too expensive, and therefore a widely applicable system with distributed control was developed.

MODULAR CONTROL-, ENERGY-DISTRIBUTION AND ENERGY-MANAGEMENT-SYSTEM FOR SMALL VEHICLES

The system controls distributed components aboard vehicles or in stationary installations and apparatus. It manages and brings to use electric power very efficiently and controls the components of the system in a coordinated manner according to rules programmed into a central process module.

Applications:

- Control of decentralized systems
- Machines with electric rather than mechanical transmissions
- Drive axles with electronic differential
- Vehicles with electric traction and any power source such as fuel cells or batteries or generators propelled by any mechanical means
- Apparatus and installations for electric energy generation, distribution, storage and use in the range up to several kilowatts

Examples for applications:

- Vehicles with 1 to 4 electric motors
- Battery or fuel cell driven vehicles or hybrid vehicles - either pedal powered or with combustion engine powered generator units
- Combination of batteries or fuel cells with supercapacitor modules for efficient electrical braking and recuperation
- Systems for harvesting and use of renewable energy using wind or water generators or solar panels to operate pumps, electric coolers, etc.

The vehicles may be electronic cycles, scooters, golf carts, wheel-chairs, fork-lifts, tractors, industrial hauling vehicles, mobile robots, self-propelled hospital beds, pedal powered cars, boats, off-road vehicles, etc.

A spectacular application is the chainless series-hybrid electronic cycle with continuously variable transmission, with one motor or even all-wheel drive and anti-slip braking as well as electronic traction control.

Features of this control system:

- The operating system is free of licensing fees to third parties since it was developed on purpose for a robust and reliable system
- The system architecture is designed for safe operation of the application and ease of maintenance
- The probably first power-bus designed for low to medium power distribution in applications proposed by the author, being compatible to the new automotive standard PowerNet 42V
- The consequent modularity for fast time to market of customers applications
- Energy-efficiency is good so that even series-hybrid electronic cycles are possible (for this idea, autork won the WALL STREET JOURNAL EUROPE INNOVATION AWARD 2001 in the category business/transportation, Ref. 5)

System design criteria were:

- Modular system to which new components are easily hooked up: "Plug and Play"
- Reliability and safety
- Ease of maintenance
- Good price-performance ratio
- Small, lightweight and energy-efficient components

Advantages for the implementation in customers applications are:

- Modular system easy to customize
- Boot-load of software into every module using CAN-bus
- Parameterisation and monitoring of the components using the CAN-bus and e.g. a personal computer or a personal digital assistant as an external service module

Advantages during use and maintenance:

- Allows to actually build fully or semi-automated and self-monitored and ergonomic applications. Modes of operation by the user depend on the kind and number of (manual) controls added to the control- and display-module. E.g. a fully automated bicycle mode where mainly pedaling influences motor power was tried and was found to be very nice to ride. An additional throttle allows to operate the quadricycle in the EV mode without pedaling.
- Energy-flows are managed such as to maximize system-efficiency
- Hardware identification and software version control are prerequisites for ease of maintenance
- Components can be replaced by plug-and-play means

The system architecture is as follows and consists of three levels:

- 1) Level 1: Information-bus on CAN-basis (Controller Area Network). This bus connects the decentralized controllers and handles the flows of information. The embedded software controls the dynamics of local electronic circuitry as well as also of the decentralized system. The man-machine-interface consists of a control- and display-module.
- 2) Level 2: Main power-bus. Over this bus flows electric power up to several kilowatts. The bus existing today is compatible to the PowerNet 42V automotive standard.
- 3) Level 3: Auxiliary power-bus. The auxiliary power bus feeds the decentralized controllers and any 12V (14V) electrical consumers such as e.g. lights and blinkers.

The CAN bus and the controller boards can be used to control decentralized systems of nearly any kind.

Together with the main 42V and auxiliary 14V power-buses the system is e.g. a complete series-hybrid vehicle propulsion system.

The system architecture was chosen such as to maintain safe system behaviour even in case of errors and for easy maintenance of the system.

The system may consist of many kinds of different modules. Some peripheral modules may be programmed as unspecifically as possible in order to be easily replaceable whereas others, like the “process-module”, contain the system model and state-machine and act as the top-level controller of the system.

Exchange of defect peripheral modules for new modules is simple in that no specific programming of peripheral modules is needed. For example, a motor control is such a peripheral module.

The process-module contains the model of the system and therefore determines whether the system is a system to harvest and manage energy flows in a stationary application or a drive-train for lightweight electric scooters or any other vehicles with electric traction. Therefore there is only one such process-module in the system.

Real-time control is performed by the local controllers whereas the CAN-bus is only used to prescribe set-values to local controllers. If the communication over the CAN-bus is disturbed the local controllers steer the local components into their own safe states.

Software:

In any component of the system there is basically the same modular software. Since it is modular new components with customized functionality can be implemented very fast.

The monitoring software runs on PC's and allows to monitor the information flow over the CAN-bus and to set parameters like wheel radius, which is needed to calibrate the tachometer.

Hardware:

In all components of the system the same controller is used except in those where more computing-power and computing-speed, such as in motor controls, is needed. The basic module is called *Can Controller Module CCM 2000* and uses a Motorola MC68HC908AZ60 controller.

In the existing system for small series hybrid vehicles the *Can Controller Module CCM 2000* is used on various kinds of electronic boards:

- Main switch (Process Module) of the system which monitors energy sources and storage devices such as batteries or fuel cells
- Control- and Display-Module
- Controlled DC/DC converter to control a 3-phase electrical generator
- Switchbox to switch on and off 12V consumers such as front and rear lights

In the motor control for 3-phase electric motor-generators a dedicated controller is used.

The Existing system for small series hybrid vehicles:

The system is also described in Ref. 1 and 3 (These references contain many references to earlier papers describing the original work on the Berne electronic transmission). The components already existing are shown in Fig. 1. Their technical specifications are (subject to change):

- Main switch (“process-module”): Continuous current of 45A, short term current 90A and peak currents up to 500A
- Motor control: For brushless DC and synchronous electric machines in motor and generator mode. Power up to 2 Kilowatts per motor. Safeguarded against short-circuiting and over and under-voltage.
- Generator control: For brushless DC and synchronous electric machines in generator mode. Controlled DC/DC-converter to feed current from the variable generator voltage level to the voltage level of the power-bus. Peak power of 700 W in human power applications. For other applications (e.g. with internal combustion engines) power would be scaled up. Default operation mode such that the generator is always operated at maximum efficiency.
- Control- and Display module to which controls such as throttle, push-buttons or any other kind of control are connected.

- Switchbox with 8 connectors for 12V consumers e.g. to connect the lights of a vehicle. Dependent on applications, power of the power electronics is scaled up or down.

The efficiency of the transmission when applied in series-hybrid pedaled cycles is questioned by many. Before discussing shortly the efficiency of conversion of mechanical to electrical power at small – 100W to 200W only – power levels, please note:

- a) The electronic transmission was not made to replace a bicycle chain as such, but to replace a combination of chain drive and electric motor in a common parallel-hybrid e-cycle. Basically, in a traditional e-cycle, a varying torque of a human is mechanically added to a constant torque of an electric machine. The overall efficiency of the system depends very much on the kind of mechanism used for the hybridisation. In a series-hybrid electronic cycle coupling of man and machine happens in the DC powerbus by adding DC currents. This is a very efficient scheme of coupling.
- b) Efficiencies of chain drives for cycles vary between about 75% and at most 98% depending on load, gear ratio, design of internal gear in rear hub, wear of chain and chain-wheels etc.
- c) Lowering aerodynamic drag by changing from an upright bicycle to a recumbent bicycle would lower the need for human propulsion power much more than would increasing the efficiency of chain drive by a few percent by optimization (statement is true except on hills, of course). Adding a power-assist system to a recumbent makes much more sense than adding one to an upright bicycle.
- d) The range of an electric cycle, when defined as the range achievable with a certain battery capacity, depends mainly on the efficiency of the e-motor drive-train, especially in stop-and-go traffic or on slopes. The efficiency of the human power drive-train is important in the flat areas.
- e) In the power range of 100 to 200 W there exists no continuously variable mechanical or hydraulical transmissions that are as simple to build and maintain as are electronical transmissions.
- f) We favour pedaled generators with speed-increasing gears and (hub) motors with speed-reducing gears over directly driven electric machines.

The efficiency of the electronic transmission depends on the combined efficiency of power electronics, gears and electrical machines. The efficiency of electric machines depends on weight, volume and cost. Cost depends on cost of materials (magnets, iron lamination, copper) and geometrical complexity, influencing the price of assembly of the electrical machine.

On small low-cost generators weighing between about 1 kg and 2 kg efficiencies of 82 to 90% have been measured. It is known from Finite Element Analysis of generators and motors that peak efficiencies of small machines can even be higher if geometrical complexity and thus cost of manufacturing is no limiting factor.

Including the losses of encapsulated gears and power electronics a total efficiency from pedal to wheel of 70 to 80% is achievable at weights and at costs comparable to todays parallel hybrid cycles.

FIRST APPLICATIONS OF AND FIRST EXPERIENCES WITH THE NEW CONTROL SYSTEM

The first vehicle equipped with the control system described above is the prototype quadracycle shown in Fig. 2. It is a human-electric hybrid in that the human pedals and his or her human power is transmitted via electrical cable into the motor that propels the rear wheel(s). When accelerating and climbing additional electrical energy comes from a battery (or alternative energy sources such as a fuel cell) as is common in electric bikes.

Of course, this vehicle, especially its design and styling, needed to be improved before being marketed. But the following is quite evident after the first few tests:

- The simple operation is well liked by the test riders. No manual gear selection is needed!
- Even though the vehicle shown in Fig. 2 is only a prototype and is not yet fully industrialized, reliability is good !
- Volume and weight of the pedalled generator can be made much smaller, in fact so small that use of pedalled generators on electric bicycles is feasible.
- Cost-down engineering is still possible, but even now the costs are reasonable compared to drive systems with mechanical transmissions. Cost reductions result also during vehicle development – frames may be made much simpler than in the case of mechanical transmissions – and during assembly of the vehicle since installing an electrical cable in a vehicle is much faster and simpler than installing a mechanical transmission.

A prototype of a single-track vehicle works in the laboratory. Once fully industrialized, it may look like the scooterbike designed by Harald Kutzke and shown in Fig. 3. The elimination of chain drives from human electric hybrids opens many new possibilities for vehicle designs.

FURTHER POTENTIAL APPLICATIONS

With the existing modules, other kinds of vehicles (such as shown in Ref. 2) and apparatus might be built:

- Pure electric vehicles
- Fuel cell driven vehicles
- Combination of batteries or fuel cells with supercapacitors is being studied.
- Installations for harvesting and storing energy e.g. at remote places or on yachts and ships
- Assembly of pedaled generators in fitness studios coupled to the electrical grid
- Fuel cells in any kind of system having a DC-power bus
- Etc.

CONCLUSIONS

New automotive technologies such as PowerNet 42V and CAN-bus are easily applied to small vehicles and yield dramatic improvements by reducing costs, module volume and weight.

ACKNOWLEDGEMENT

The development of the system was funded by autork ltd., www.autork.com

The Swiss Federal Energy Agency (Bundesamt für Energie BFE) supports applied research at the University of Applied Science of Berne, HTA Berne, in order to implement the system in new applications with new components.

FIGURES

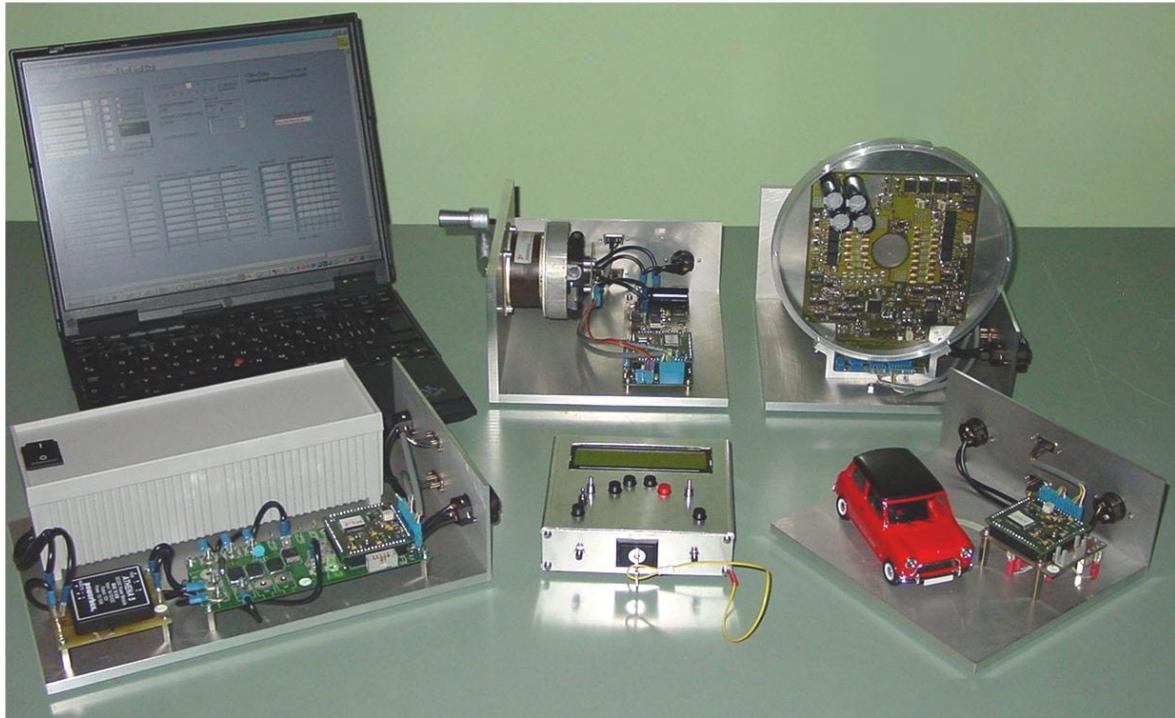


Figure 1 The demonstration-version of the control system shown consists of all kinds of modules needed to build a series-hybrid vehicle with one single motor.

Left to right, in the back:

- a) Laptop being the service module of the system. The software is downloaded into all modules using the CAN-bus and the parameters of the system are set using a Labview tool.
- b) Generator module. The generator shown is the one of the demo-version of the system and as such is being operated using a hand crank. In cycles the cranking is by foot-pedals, in hybrid vehicles by combustion engines.
- c) Motor module. This module converts the energy from the generator into mechanical energy to turn the wheel and propel the vehicle.
- d) Left to right, in the front:
- e) Process module and energy storage (in the case of the demo-version a 36V NiCd battery): The process module is the main switch of the drive power bus of the vehicle (42V PowerNet) and at the same time the top-level-dynamic controller.
- f) Display and control module: this is the man-machine-interface. Controls like throttles or brake lever status switches are directly connected to this module.
- g) Switchbox for 12V consumers. In this demo-version a model Mini Cooper is equipped with LEDS to demonstrate that the blinkers and the high and low beams of vehicles are switched by using the CAN-bus to send the signals from the controls near the handlebar to the rear and front lights.

Foto: Jürg Blatter, HTA Bern, Berne, Switzerland



Figure 2

Prototype quadracycle equipped with the drive system as shown in Fig. 1 and described in the text. Energy sources: Pedalled generator and battery. Energy sinks: BLDC motor (42V, approx. 1 kW peak power) and vehicle lighting (14V).

Main vehicle specifications: Maximum legal speed 45 km/h (28 mph). Wheel size 16", track width 80 cm (32 inches). Empty weight 100 kg (220 lbs) including battery of 30 kg (66 lbs.). A textile fairing for weather protection can easily be mounted on the vehicle chassis.

Remark: The huge print below the pedalled generator is the one of the 200W DC/DC converter for the vehicle lighting! 200W correspond to about the drive power needed at bicycle speeds. Obviously LED lighting would be preferred, but at the moment is still illegal.

Foto: Andreas Fuchs, HTA Bern, Berne, Switzerland

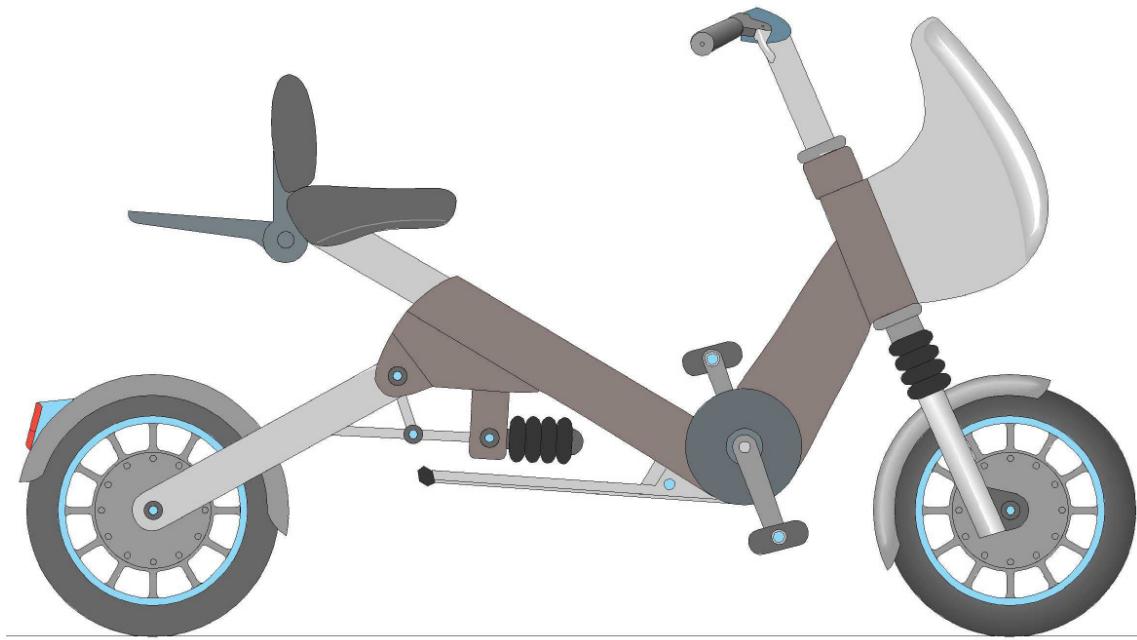


Figure 3

An electronic bike with chainless transmission of human power to the – in that case both (!) - wheels with hub wheel motors. Extra energy comes from a lithium polymer or other modern kind of battery. Anti-slip braking and traction control forseen.

Picture: Harald Kutzke, ecomotion design, Bonn, Germany

REFERENCES

- [1] Blatter, Jürg. Elektronische Transmission – Ein technischer Ueberblick. Article in German in the periodical “Infobit” of the University of Applied Sciences Berne, No. 1, Vol. 2003
- [2] Fuchs, A. and Schmidt, Th. Assisted Human Powered Vehicles. Proceedings of the 4th Velomobile Seminar, Future Bike Switzerland 1999, www.futurebike.ch. ISBN 3-9520694-1-8
- [3] Graf, Alfons. The New Automotive 42V PowerNet Becomes Reality - Stepping into Mass Production. In coop. w. 67 co-authors. Expert-Verlag, 2003. ISBN 3-8169-2170-1
- [4] Info VEL 2001. Final Report on the electric and hybrid vehicle field trial from 1995 to 2001 at Mendrisio, Switzerland, supported by the Swiss Federal Energy Agency. Available from BBL/EDMZ 3003 Bern, Switzerland
- [5] Taylor, E. Swiss Firm Yanks the Chain - Autork fills the Old-Style Bike with High Tech Wizardry. The Wall Street Journal Europe, November 26, 2001

Human Power eJournal

[Contents](#) | [About](#) | [Contact](#)

article 09, issue 02

Analysis and Visualisation of Data Collected from Human-Electric Hybrid Bicycle-Tests

Andreas Fuchs
October 15, 2005

Abstract

The German non-profit organization [ExtraEnergy](#) tested human-electric hybrid vehicles in 2001 and in 2002, (e-bikes and pedelecs, see [note](#)). This paper compiles, visualizes and discusses the resulting data. Such compilations are helpful to benchmark new vehicles or drive systems, to show what levels of performance are common and to identify what kind of products are best suited for the user's intended application.



The Dolphin is an example of a commercially produced electric bike

Test Methods

A detailed description of these tests appears in ExtraEnergy's test reports [\[1\]](#) and [\[2\]](#). Both trial series took place in realistic field conditions with many different riders. The tests were conducted both on mainly level and on mainly constant slope courses. On a "mixed track" portion of the testing, the riders stopped several times to simulate red lights. The distance vehicles were able to travel (range) was determined by riding until the batteries were considered discharged.

Differences between both tests were:

1. In the 2001 test the assist ratio of electric power to human power wasn't measured. Climbing speed was recorded on two different ascending grades; one had an average 6.3% slope (max 8%), the other exhibited an average 8% slope

- (max 12%). Range on slopes was not recorded.
2. In the 2002 test the assist-ratio was measured by comparing the power assisted vehicles with similar unassisted bicycles. All vehicles were equipped with force-measuring pedals. Power (product of pedaling torque and cadence) was measured at three different speeds of the unassisted reference bike and for all assisted bikes. Electrical power used by the system was measured at the battery.

Test Data

The format in which the test data was reported was different in 2001 and 2002. For easier analysis most of the data of both tests was compiled into a table. See [Appendix](#).

In 2002 the amount of power assist was reported using the assist rate (R) and the assist factor (F). The assist rate is the ratio of the electric drive power (Pe), measured at the battery to the total mechanical power delivered to the drive wheel (Pw). The assist factor is the ratio of electric drive power (Pe) to the human supplied power as measured at the pedals (Php). If the assist factor is greater than 1, then the electric power is greater than the human's power contribution.

The assist rate and factor are derived as follows:

Php = Human power (pedalling power)

Pe = Power of the electric drive

Pw = Total drive power at wheel

R = Assist rate = Pe / Pw

F = Assist factor = Pe / Php = R / (1-R)

Because the human energy contribution (Php) is measured at the pedals instead of at the drive wheel, these relationships assume a pedal drive efficiency of 100% whereas the efficiency of the motor drive is unknown. [This means that the assist factor measured here is higher than the actual effective assist factor. Ed.]

These factors can be used to estimate the contributions of human power and electric power to range (at the same speeds):

Range using electric power only = total range * assist rate

Range using human power only = total range - range using electric power only

Analysis

Drive Performance and Energy Expenditure

It was found that most parameters hardly differed between the two tests.

However, in 2002 the average battery capacity was higher than in 2001: 193 Wh instead of 155 Wh.

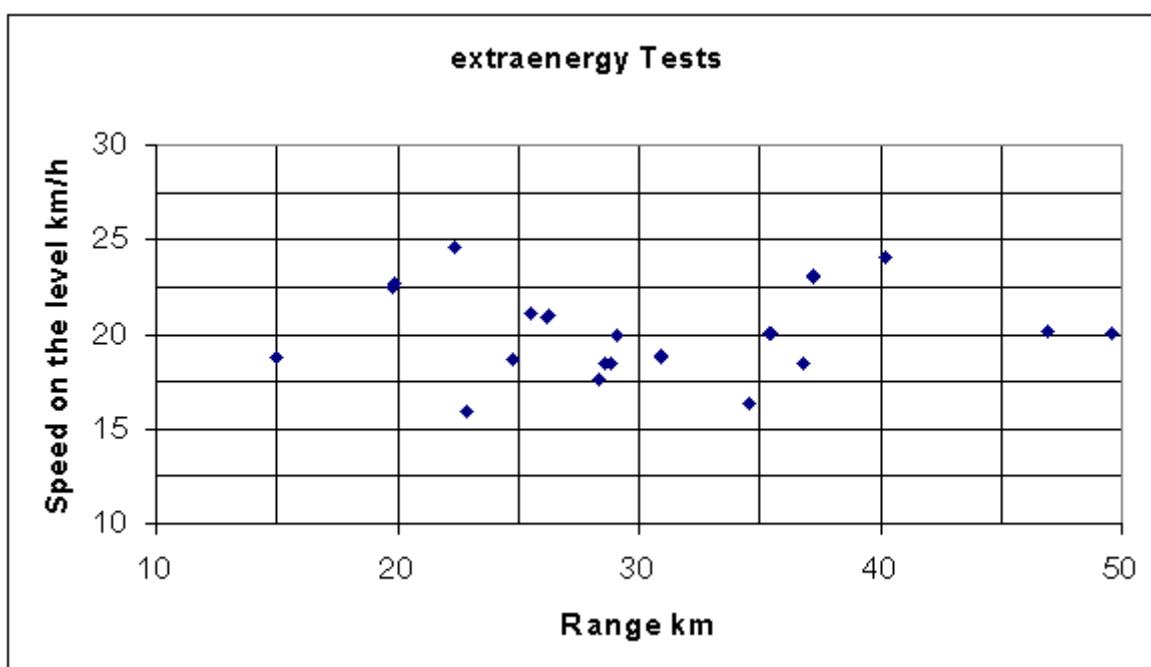
Bike prices didn't vary much within the same classes. The average price, excepting the fast Swiss bikes, was about 1500 Euro.

Key results for both 2001 and 2002 were:

- About 30 km range and 20 km/h average speed on level/mixed-track
- About 7 km range at a speed of 11 km/h on slope of 7% [about 500 m altitude gain, i.e. total range back to starting altitude would be at least 14 km, with higher average speed. Ed.]

In detail:					
	X	Average	Standard Deviation	Min	Max
2001 & 2002	Vehicle mass (kg)	29.1	5.6	18.1	42.5
	Battery mass (kg)	5.9	3.2	2.2	15.6
	Range on the level (km)	29.9	8.3	15.0	49.6
	Speed on the level (km/h)	20.2	2.5	15.9	24.6
2002 only	Range on slope 7% (km)	7.3	2.3	3.7	11.6
	Speed on slope 7% (km/h)	10.8	2.1	7.7	13.8

[Table 1] The highest variation (standard deviation divided by average) is found in weight of battery. Average speed varies relatively little.



[Figure 1] Ranges and average speeds of the tested bikes on the level. The average of ranges was about 30km and the average of average speeds was about 20 km/h. The top speed of most vehicles was (by law) under 24km/h in hybrid mode; that of the Dolphin 39 km/h.

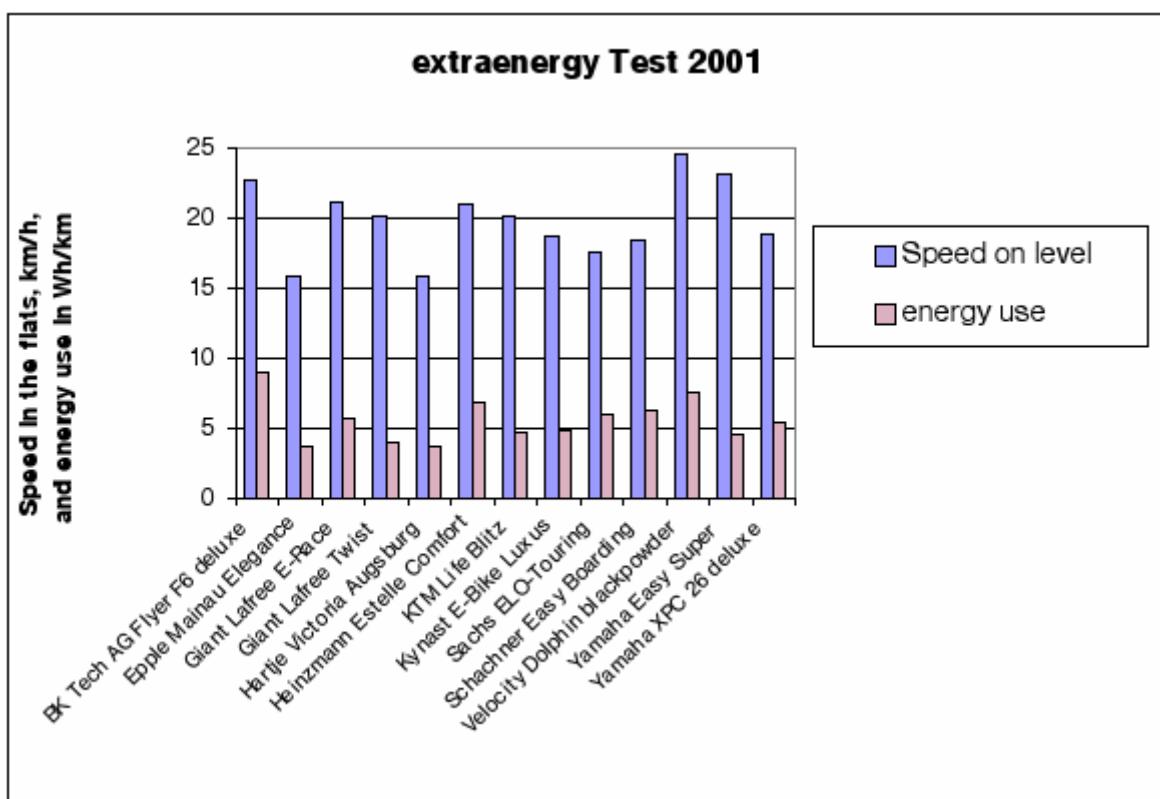
Dividing range by battery capacity (see [Appendix](#)) gives energy use (including human power but not considering this in the calculation):

- Energy use is about 0.18 km/Wh or 6 Wh/km on the level

- Energy use is about 0.04 km/Wh or 27 Wh/km on the slopes

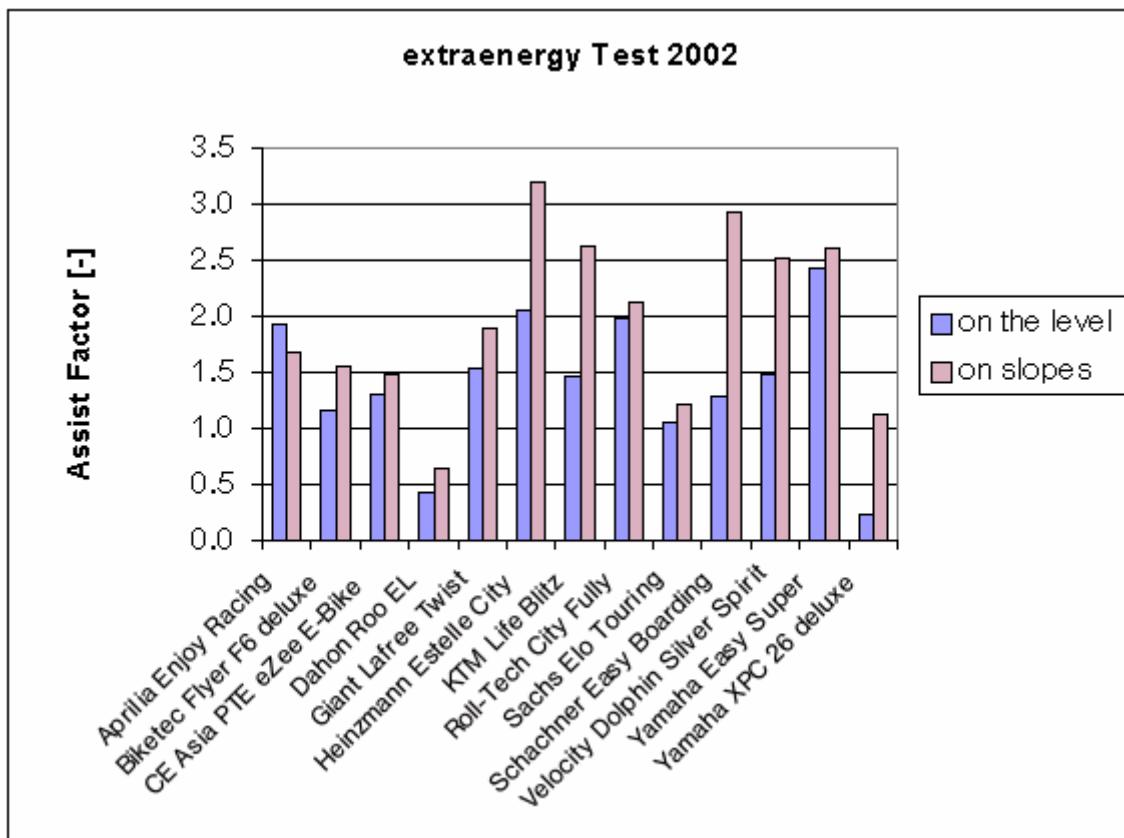
Using the assist rate (calculated from data in Appendix) one can easily estimate how far the human electric hybrids would have gone using only electric power (at the same speed): (Range * Assist rate) = Range using electric power only. The "purely electric range" would average 16.5 km and the energy use would average 12.4 Wh/km on the level.

If it is assumed that all tested bikes would have the same aerodynamic drag (effective frontal area assumed to be 0.5 m²) and rolling resistance (coefficient of rolling resistance assumed to be 0.007), then the ratio of the power needed to go on the level and to climb can be estimated. On the 7% slope at 11 km/h the total power required is about 2.5 times larger than on the level at 20 km/h. The ratio of energy use measured above is however 27 / 6 = 4.5. This is probably because at higher power levels the actual (in)efficiency of the electric drive weighs more strongly.



[Figure 2] Average speed and energy use for various models.

This shows that in general higher average speed leads to higher energy use (Wh/km) when riding on the level, but with considerable variations.



[Figure 3] Assist factor on the level and on the slope for various models.

On average, the assistance does not change much from the level to the slope: on the level the assist factor is 1.23, and on the slopes 1.77. These ratios are higher than the 1 : 1 factor much promoted and discussed in the 1990's.

These figures also show that while in many cases the assist factors do not differ much between level and slope, those of vehicles made in the hilly and alpine regions of Europe have much higher assist factors on slopes than on the level.

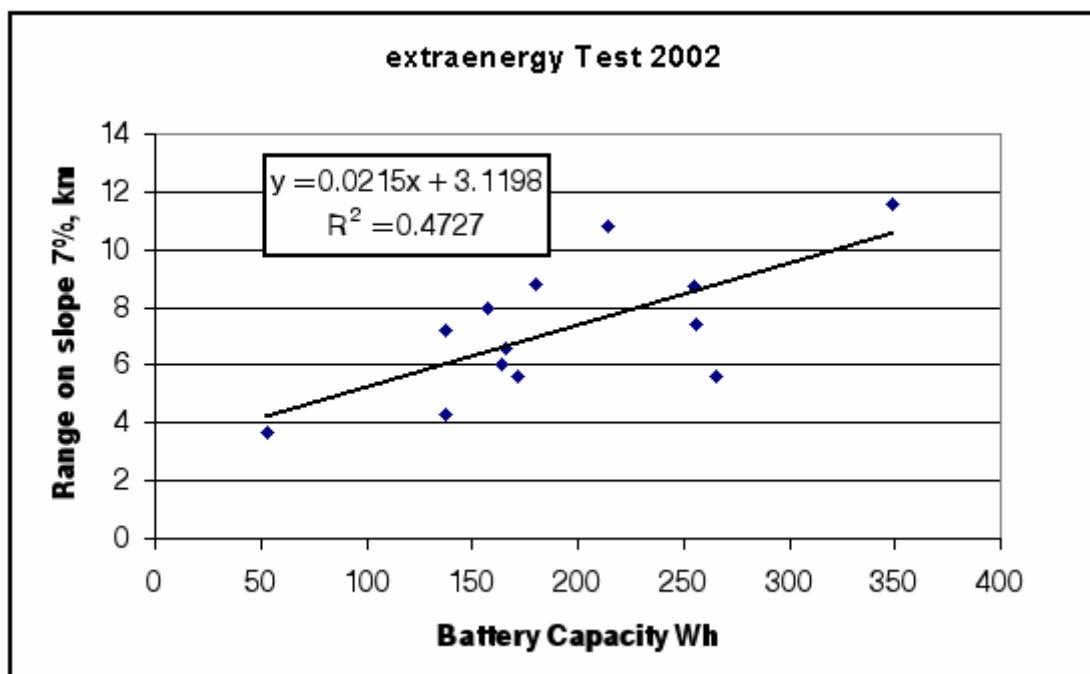
Dependencies between Parameters

By plotting parameters against others one can try to identify those most important for the performance.

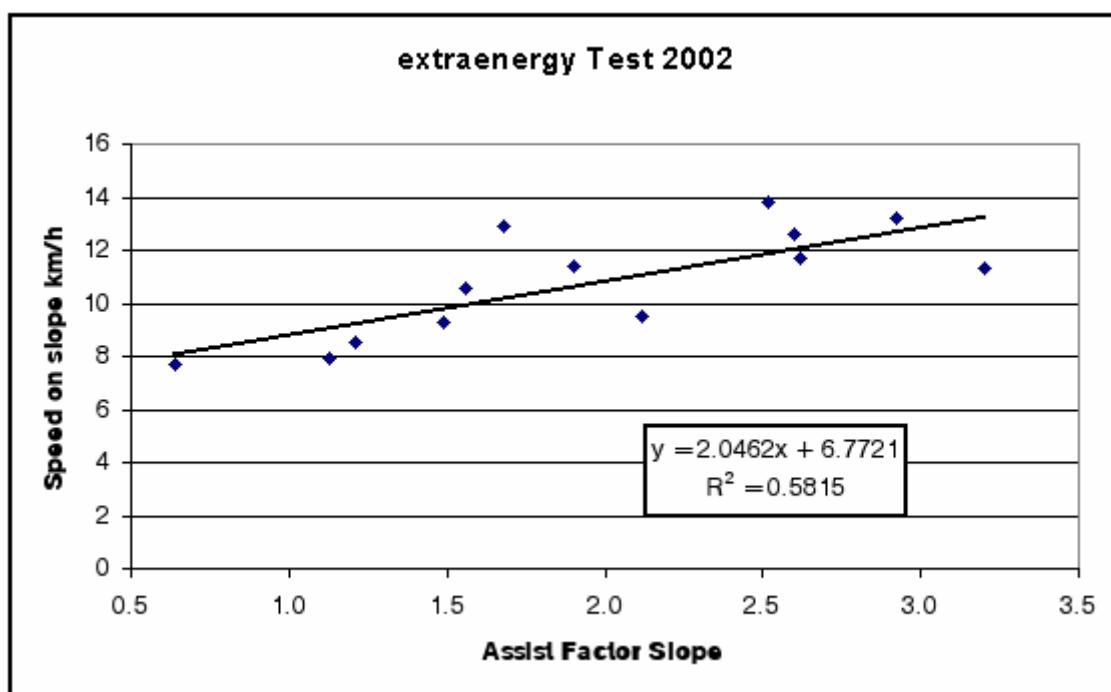
We plotted the "performance parameters" like range and speed over the "feature parameters" like price, weight of vehicle, weight of battery, assist factors in order to identify trends that could exist. Here are some results of interest.

We would like to know the answers to questions like: "Do the lighter or the heavier bikes climb better?" "Does range on the level change much with average speed ?"

In the graphs below, a linear regression line with an upward slope shows a positive correlation. The figure R^2 gives the degree correlation between the parameters, from 0 (no correlation) to 1 (strong correlation).



[Figure 4] Speed on slope vs. battery capacity.



[Figure 5] Speed on slope vs. assist factor.

Other (mainly expected) correlations:

Year of Test	Parameter 2	Parameter 1	Slope	R^2
2001	Max. speed	Price	0.007 km/h/Euro	0.72
2001	Speed on slope	Battery capacity	0.04 km/h/Wh	0.38
2001	Speed on slope	Mass of Bike	0.32 km/h/kg	0.36

Both years	Range on the level	Battery capacity	0.074 km/Wh	0.29
2002	Speed on the level	Assist factor	1.94 km/h/[-]	0.24
2002	Range on the level	Assist factor	6.5 km/[-]	0.19
Both years	Energy use on the level	Speed on the level	0.3 Wh/km/km/h	0.17

[Table 2] Examples of some stronger correlations between features and performance of vehicles

Examples for unexpectedly weak correlations:

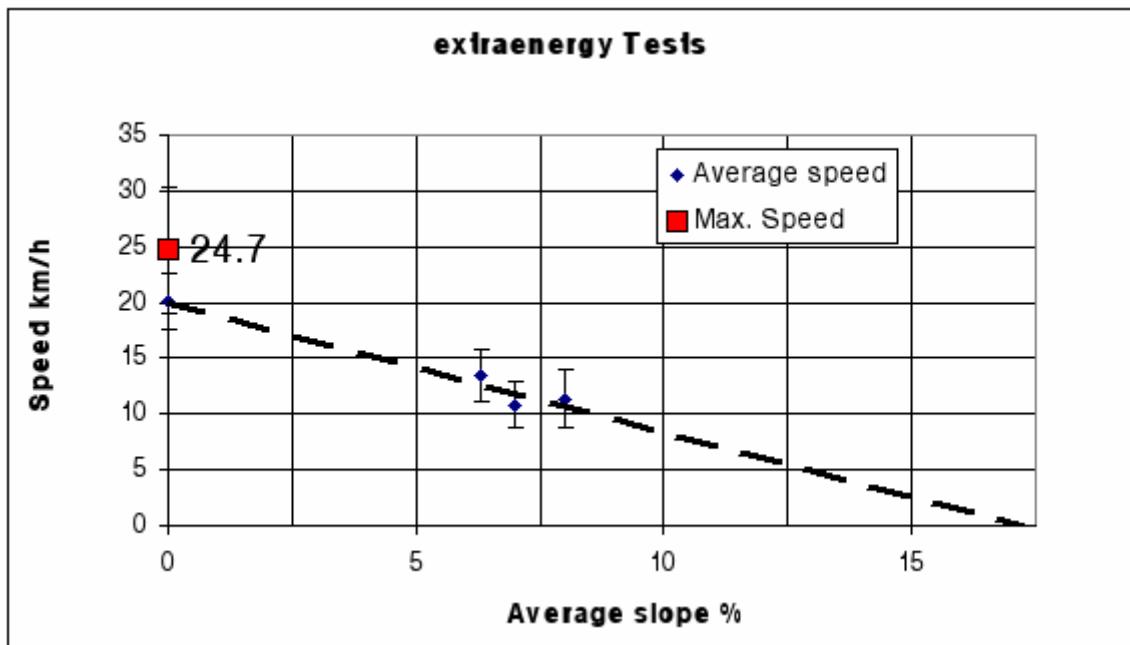
- Energy use on slope [Wh/km] versus assist factor [no units]
- Energy use on slope [Wh/km] versus speed [km/h]

The vehicles in the 2001 test climbed faster the heavier they were, since the available power depends on the mass of the motors and batteries, in contrast to unassisted bikes, where the opposite is true. [This implies an optimum configuration for each hybrid operating point. Ed.]

Additionally, if batteries are dimensioned too small, the discharge efficiency is low at high power levels and therefore the range on slopes decreases.

Visualisation

The data may also be used to visualize general facts for individual vehicles or average values.

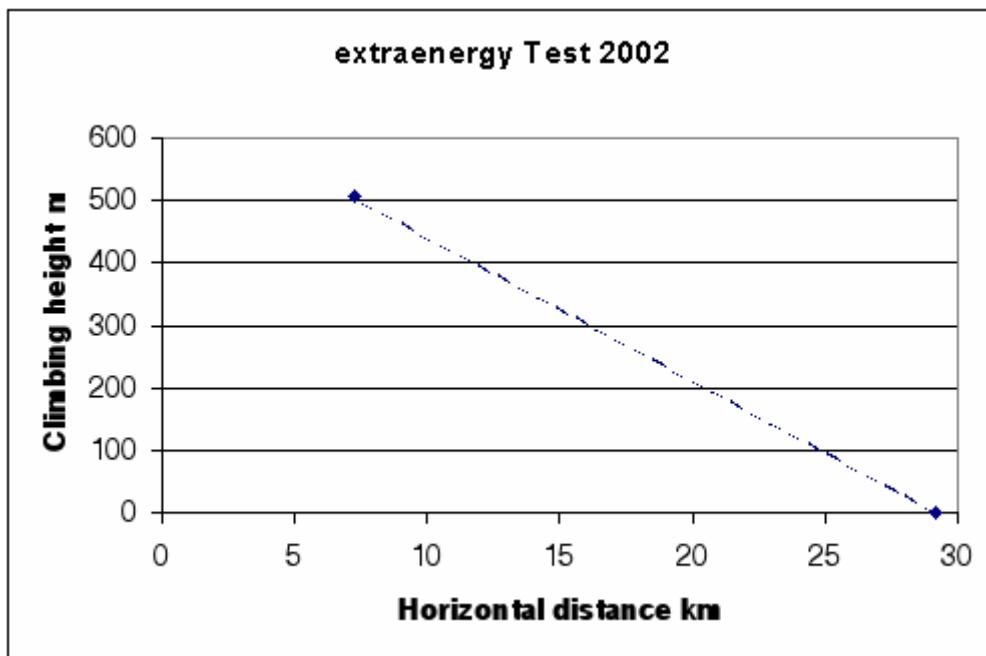


[Figure 6] Averages of average speed vs. average slope.

Average speed on the level is about 20 km/h (all samples), the maximum average speed 24.7 km/h (Velocity Dolphin). [Personal experience with the Dolphin also shows a much flatter curve. Ed.]

At 10 % slope the tested vehicles go nearly 10 km/h.

The dashed line is an extrapolation and suggests a maximum climbing slope of 18%. Exact values would depend on the actual gearing.



[Figure 7] Average climbing height vs. horizontal distance.

Such graphs in sales literature would help consumers decide on the suitability of vehicles for the planned usage.

Note:

An e-bike may be defined as a bicycle equipped with an auxiliary electrical motor which operates independently from human power input. A pedelec (pedal electric) is a vehicle equipped with an auxiliary electric motor that operates only when the rider pedals. A legal definition of a pedelec at: ExtraEnergy.org.

References:

[TOP OF PAGE](#)

[1] 2001 Test, Extra Energy e.V., [Testbericht.pdf](#)

[2] Pedelec / E-Bike-Test 2002, Extra Energy e.V., [TestberichtRaeder.pdf](#)

Appendix:

Spreadsheet of 2001 and 2002 tabulated results; public access (zipped XML) format ([appendix.sxc](#) 11 KB) or proprietary format ([appendix.xls](#) 16KB)

About the author:

Dr. Andreas Fuchs (1963) currently works as a researcher at the the [Berne University of](#)

[Applied Sciences](#), School of Engineering and Information Technology in Biel, Switzerland, and leads projects with human electric hybrid vehicles. Fuchs and Juerg Blatter developed a [chainless transmission](#) for pedal powered machines in the periods 1996 to 1998 and 2000 to 2002.

Andreas may be contacted at:

Gutenbergstrasse 24, CH-3011 Bern, Switzerland, +41 79 294 06 93,
andreas.fuchs AT bluewin DOT ch

[Contents](#) | [About](#) | [Contact](#)

Human Power eJournal

Appendix to HPeJ article 0009, issue 02

"Visualisation and Analysis of Data collected from Human-Electric Hybrid Bicycles" by Andreas Fuchs
10.05

2001 RESULTS	Vehicle mass (kg)	Type of electric drive	Battery mass (kg)	Battery Capacity (Wh)	Battery type	Price (Euro)	Range, 0% slope (km)	Maximum speed, 0% slope (km/h)	Average speed, 8% slope (km/h)	Average speed, 12% slope (km/h)	Average speed, 0% slope (km/h)
<i>BK Tech AG Flyer F6 deluxe</i>	33.5	<i>chain</i>	7.3	180	<i>NiCd</i>	3574	19.9	33.6	13.4	13.4	22.7
<i>Epple Mainau Elegance</i>	22.4	<i>rear</i>	2.3	86	<i>Pb</i>	1449	22.9	18.5	10	7.3	15.9
<i>Giant Lafree E-Race</i>	38.2	<i>chain</i>	10.6	144	<i>Pb</i>	1409	25.5	24	15.9	13.8	21.1
<i>Giant Lafree Twist</i>	21.9	<i>chain</i>	3.9	144	<i>NiMH</i>	1425	35.5	24.5	11.8	8.9	20.1
<i>Hartje Victoria Augsburg</i>	23.9	<i>chain</i>	2.3	86	<i>Pb</i>	1499	22.9	18.5	10	7.3	15.9
<i>Heinzmann Estelle Comfort</i>	28.5	<i>rear</i>	5.3	180	<i>NiCd</i>	1839	26.3	24.3	16.4	14.5	21
<i>KTM Life Blitz</i>	29.4	<i>front</i>	7.1	218	<i>NiCd</i>	1687	46.9	23.5	13.3	10.9	20.2
<i>Kynast E-Bike Luxus</i>	29	<i>chain</i>	3.6	120	<i>NiCd</i>	1500	24.8	23.5	12.8	10.8	18.7
<i>Sachs ELO-Touring</i>	32.9	<i>rear</i>	5.4	168	<i>NiCd</i>	1473	28.3	21.8	14.9	11.5	17.6
<i>Schachner Easy Boarding</i>	26.3	<i>front</i>	5.3	180	<i>NiCd</i>	1256	28.8	21.5	14.3	12.1	18.5
<i>Velocity Dolphin blackpowder</i>	26.8	<i>rear</i>	7.5	168	<i>NiCd</i>	2846	22.4	39	17.7	15.5	24.6
<i>Yamaha Easy Super</i>	29.8	<i>chain</i>	4	168	<i>NiMH</i>	1891	37.2	24.6	13.5	12.4	23.1
<i>Yamaha XPC 26 deluxe</i>	26.4	<i>chain</i>	3.6	168	<i>NiMH</i>	1406	30.9	24	11.5	9.8	18.9

Appendix to HPeJ article 0009, issue 02

"Visualisation and Analysis of Data collected from Human-Electric Hybrid Bicycles" by Andreas Fuchs

10.05

2002 RESULTS	Vehicle mass (kg)	Type of electric drive	Battery mass (kg)	Battery Capacity (Wh)	Battery type	Price (Euro)	Assist. Factor, 0% slope	Assist Factor, 7% slope	Range, 0% slope (km)	Range, 7% slope (km)	Average speed, 7% slope (km/h)	Average speed, 0% slope (km/h)
Aprilia Enjoy Racing	31	chain	6	256	NiMH	1399	1.92	1.68	36.8	7.4	12.9	18.5
Biketec Flyer F6 deluxe	33.5	chain	7.3	180	NiCd	3900	1.16	1.56	19.8	8.8	10.6	22.5
CE Asia PTE eZee E-Bike	39.7	rear	12.8	265	Pb	1000	1.3	1.49	29.1	5.6	9.3	20
Dahon Roo EL	18.1	rear	2.2	53	Pb	1299	0.43	0.64	15	3.7	7.7	18.8
Giant Lafree Twist	21.9	chain	3.9	137	NiMH	1425	1.54	1.9	35.4	7.2	11.4	20.1
Heinzmann Estelle City	31	front	5.3	172	NiCd	1689	2.06	3.2	26.2	5.6	11.3	20.9
KTM Life Blitz	29.3	front	7.1	214	NiCd	1699	1.46	2.62	49.6	10.8	11.7	20.1
Roll-Tech City Fully	42.5	front	15.6	349	Pb	2195	1.98	2.12	40.2	11.6	9.5	24.1
Sachs Elo Touring	32.6	rear	5.4	255	NiCd	1599	1.06	1.21	34.6	8.7	8.5	16.3
Schachner Easy Boarding	26.3	front	5.3	164	NiCd	1307	1.29	2.92	28.6	6	13.2	18.5
Velocity Dolphin Silver Spirit	26.7	rear	7.5	166	NiCd	3800	1.48	2.52	22.4	6.6	13.8	24.6
Yamaha Easy Super	29.8	chain	4	137	NiMH	1891	2.43	2.6	37.2	4.3	12.6	23
Yamaha XPC 26 deluxe	26.4	chain	3.6	157	NiMH	1406	0.23	1.13	30.9	8	7.9	18.8

Neue Abstracts

Noch un-publiziert:

Andreas Fuchs: ***The main tasks for e-bikes and pedelecs: Accelerate horizontally and vertically (climbing).*** Publication open, Date open

Andreas Fuchs: ***Base configurations of e-bikes and pedelecs.*** Publication open, Date open

Andreas Fuchs: ***Indication that nearly constant individual pedalling cadence hinders power production by e-bike/pedelec electric bottom bracket motor.*** Publication open, Date open

27.7.2005
revisited 7.8.05

The main tasks for e-bikes and pedelecs: Accelerate horizontally and vertically (climbing)

Dr. Andreas Fuchs, Gutenbergstrasse 24, 3011 Bern, Switzerland

ABSTRACT

Measurements show that with increasing load a pedaller of a bicycle changes time averaged torque relatively much more than cadence (pedalling speed).

The load on the pedaller comes from either accelerating or from climbing. (Accelerating in the flats can be compared to climbing since climbing is nothing else than accelerating in vertical direction.)

The fact of only slightly variable pedalling speed but highly variable pedalling torque is then used to discuss the basic tasks of an e-bike resp. pedelec: To produce torque when it is needed, that is mainly during phases of acceleration and during climbs!

The paper also promotes urgently to think more about "torque" rather than solely "power" when designing human electric hybrids.

Content:

Ergonomics of pedalling (variation of torque and cadence with age, sex, probability of bike use, size, etc.)

Measurements of pedalling torque with slope (or acceleration) performed using EZ1 laboratory bike

Acceleration and climbing compared

Torque in dependence of speed and slope, power in dependence of speed and slope

Comparison with measurements of assist factor by Univ. of Brussels

pap_ebike_basics

27.7.2005
revisited 7.8.05

Base configurations of e-bikes and pedelecs

Dr. Andreas Fuchs, Gutenbergstrasse 24, 3011 Bern, Switzerland

ABSTRACT

This paper discusses base configurations of human electric hybrid vehicles (e-bikes or pedelecs). The e-bikes on the market today are parallel hybrids. In parallel hybrids it is attempted to mechanically add the – in time - highly variable torque of a pedalling human with a constant torque of an electric motor.

There are two classes of parallel hybrids, one with vehicles having the motor near the bottom bracket, the other with vehicles having the motor either in the front or rear wheel. The first class can further be subdivided into vehicles where the speed of the motor is reduced to the speed of the pedal, where the speed of the motor is the same as the pedel, or where the speed of the motor is reduced but only to the speed of the chain going around the chain wheel of the pedal.

A special case is Michael Kutters bike where electric and human power are mixed using a planetary gearset in rear wheel hub; still this vehicle is also a parallel hybrid.

In a series hybrid human electric hybrid (SHEB, series hybrid e-bike) human power is converted into electric power using an electric generator driven by the pedals. Mechanical drive power to move the series hybrid vehicle is produced by a motor driving the wheel just as is the case with the parallel hybrids having either a front wheel or rear wheel (hub) motor.

Content:

Conceptual models of e-bikes with motor near bottom brackets

Torque-speed-efficiency diagram of electric machine, stable pedalling frequency

pap_pedelecbasics

27.7.2005
revisited 7.8.05

Indication that nearly constant individual pedalling cadence hinders power production by e-bike/pedelec electric bottom bracket motor

Dr. Andreas Fuchs, Gutenbergstrasse 24, 3011 Bern, Switzerland

ABSTRACT

Comparing performance in the flat and performance on slopes of pedelecs and e-bikes as documented in the extraenergy test reports yields indications that the drive-configuration of an e-bike resp. pedelec determines its dynamic behaviour considerably.

It is shown that in human electric hybrids with tight coupling of "human motor" and electric motor the electric part of the drive system is hindered to set free its full power potential. Tight coupling exists in the case where the motor of the vehicle is located near the bottom bracket of the vehicle rather than in or near the wheels. In that configuration in order to change power the motor is forced to change torque only rather than both speed and torque since the motor speed is bound to nearly constant pedalling speed.

More investigations and measurements are needed in order to analyze in more detail the vehicle concepts where the motor drives the pedal or chain wheel or the chain.

Content:

Extraenergy test results

Analysis with respect to drive configuration (front or rear wheel motor or bottom bracket motor)

pap_dynamicrange

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.