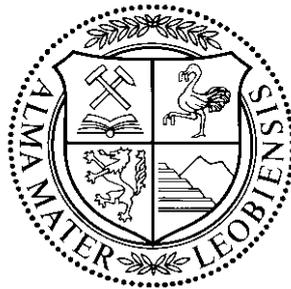


# Elektrofahrrad mit Solarantrieb

– Solar Powered Electric Cycle –

## Diplomarbeit

Durchgeführt am Institut für Elektrotechnik  
der Montanuniversität Leoben



vorgelegt von

**Manfred Neudorfer**  
im November 2002

Betreuer:

AsP., Dipl.-Ing., Dr. mont. Franz Aschenbrenner  
Institut für Elektrotechnik

Begutachter:

O.Univ.Prof., Dipl.-Ing., Dr. techn. Helmut Weiss  
Vorstand des Institutes für Elektrotechnik  
Montanuniversität Leoben

„Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die benutzten Quellen, wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.“

Manfred Neudorfer

## **Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt der Schöpfung dieses wundervollen Sonnensystems mit dem Planeten Erde, auf dem sich eine Vielzahl von Lebensformen in mannigfaltiger Komplexität und Schönheit entwickelt haben. Meine Hochachtung gilt vor allem jenen Kreatur, die aufgrund ihrer geistigen und handwerklichen Fähigkeiten nicht nur nach den Grundbedürfnissen des Überleben sondern auch nach höheren Dingen wie Ästhetik, Eleganz, Liebe und Weisheit trachtet. Mögen diese Wesen in Zukunft noch stärker für die Koexistenz mit den Artgenossen und anderen Lebewesen eintreten und den Weiterbestand dieser wundervollen Erde sichern, in dem sie vermehrt auf umweltfreundliche Technologien umsteigt. Ein energieautarkes, keine (Schad-)Stoffe emittierendes Fortbewegungs(hilfs)mittel wäre ein kleiner Beitrag dazu.

Außerordentlicher Dank gilt meiner lieben Freundin und Verlobten, die mir während meiner Diplomarbeit undenkbar viel Geduld und Verständnis entgegenbrachte und mich bei meiner Arbeit unterstützte und förderte und ihren Eltern, die mich während dieser brotlosen Zeit bereitwillig bei ihnen aufnahmen.

Dank gilt auch Herrn As.Prof., Dipl.-Ing., Dr.mont. Aschenbrenner, der mich motivierte, eine Diplomarbeit über ein einfaches, echtes Solarfahrrad am Institut für Elektrotechnik zu schreiben, der mich während dieser Zeit betreute und mir viele Freiräume ließ, dem Rektor der Universität Leoben, Bergrat h.c., Dipl.-Ing., Dr.mont. Pöhl, dem Vorstand des Institutes für Elektrotechnik, O.Univ.Prof., Dipl.-Ing., Dr.techn. Weiß und dem Vorstand des Institutes für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, O.Univ.Prof., Dipl.-Ing., Dr.mont. Kepplinger unter anderem für die Unterstützung bei der Suche nach Sponsoren, die Mitarbeiter des Institutes für Elektrotechnik, meinem Freund und Studienkollegen Mörtl, der mich in die Messdatenerfassung des Motorenprüfstandes mit LabView einweihte, sowie den Sponsoren, die mich mit Know-how, Ideen und ihren Produkten oder finanziell unterstützten und die unten namentlich angeführt sind, Herrn Stadler vom Bezirks TV Vöcklabruck, der mir ein paar Sendeminuten versprach und alle anderen Personen und Firmen, die mir geistig, ideell oder auf eine andere Art und Weise geholfen haben und hier nicht angeführt sind.

Folgenden Personen und Firmen danke ich für ihre Unterstützung:

Günther Grill  
2Rad Grill Kapfenberg KG  
Grazer Straße 56  
A-8605 Kapfenberg

Uwe Kroiß  
Stromaufwaerts PV GmbH  
Hauptplatz 10  
A-4050 Traun  
<http://www.stromaufwaerts.com>

Andreas Moser  
UBM Umweltberatung Moser  
Moosbrunn 450  
A-6236 Alpbach  
[ubm@uta-net.at](mailto:ubm@uta-net.at)

Fritz Herrmann GmbH & Co  
Elektromagnetische Antriebe  
Am Haselbach 1  
D-79677 Schönau (Schwarzwald)  
<http://www.heinzmann.de>

Günter Beidl und Robert Fruhwirth  
Exide Batteriewerke GmbH  
Puntigamer Str. 127  
A-8055 Graz  
<http://www.exide.at>

Josef Zankl  
Sanyo Energy (Europe) Co.GmbH  
Stahlgruberring 4  
D-81829 München  
<http://www.sanyo.de>

Guido Struss  
Velocab (Flyer-Bike)  
Rösleinweg 10  
D-75334 Straubenhardt  
<http://www.velocab.de>

Franz und Thomas Schachner  
Elektromobilbau Schachner  
Gewerbepark Pölla  
A-3353 Seitenstetten

Josef Kasbauer  
Elektroantrieb  
Hofötzer Str. 34  
A-4783 Wernstein  
<http://www.elektroantrieb.at>

Dietrich Lohmeyer  
Lohmeyer Leichtfahrzeuge  
Geistinger Str. 31  
D-53773 Hennes  
<http://www.leichtfahrzeuge.de>

Wolfgang Anzenruber und Raimund Art  
Kugellager Beham Handelsges.m.b.H.  
Bahnhofstr. 67  
A-4910 Ried  
<http://www.beham.com>

## Kurzfassung

Herkömmliche Solarfahrräder werden mit relativ kleinen Photovoltaikmodulen in Verbindung mit kleinen Akkus und schwachen Motoren mit ungenügendem Wirkungsgrad ausgestattet, um Aussehen und Funktionalität von 0-8-15 Fahrrädern beizubehalten. Durch diese Konfiguration werden nur kleine Reichweiten bei unzureichender Zulade- und Steigfähigkeit erreicht. Außerdem muss ständig am Netz nachgeladen werden. Neuerdings auch als Solarfahrräder bezeichnete Elektroräder, die über ein stationäres Modul geladen werden, können während einer Ausfahrt an einem sonnigen Tag die Sonnenenergie nicht nützen.

Dem entgegen steht das energieautarke, echte Solarfahrrad, das eine ausreichend große Solarzellenfläche von etwa 1 m<sup>2</sup> aufweist, um einen ausreichend großen Akku mit etwa 500 Wh Speicherkapazität über wenige Tage zu laden und das einen ausreichend starken, hoch effizienten Motor hat, um mittelgroße Distanzen bis etwa 50 km zurücklegen und übliche Steigungen mit leichter Beladung bewältigen zu können und das auch für gebrechlichere Menschen einfach zu bedienen ist.

Die Konzeption eines solchen, für unsere Breiten geeigneten Solarfahrrades soll in dieser Arbeit behandelt werden. Die Konstruktion eines leichten, stabilen, nicht seitenwindanfälligen Rahmes mit integrierten Solarzellen bleibt offen.

## Abstract

Most solar bicycles use relatively small photovoltaic modules, small batteries and weak, inefficient electric motors – a configuration that retains look and functionality of ordinary bicycles, permits only small ranges and delivers inadequate load-bearing and hill-climbing capacity. Additionally, such bicycles must be repeatedly recharged from mains electricity. The new generation of so-called “solar bicycles” are electric cycles recharged using stationary solar modules, but they are unable to utilise solar energy while in use on sunny days.

In contrast to this, the “true” solar bicycle is energy self-sufficient, has a solar cell surface of about one square metre (sufficient to charge an adequately-sized battery with about 500 watt hours capacity over a few days) and is equipped with a high efficiency motor to enable travel distances of about 50 kilometres, including ordinary slopes, with everyday loads while making minimal demands on the physical constitution of the rider.

This thesis deals with the conceptual design of such a “true” solar bicycle that is relevant for our regions. Techniques for the construction of a light, stable, crosswind-resistant frame with integrated solar cells remains unsolved.

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Ausgangssituation</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Zur Thematik</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Was ist ein Solarfahrrad?</b> .....	<b>5</b>
2.1.1	Was wird alles als Solarfahrrad bezeichnet? .....	5
2.1.2	Sinnvolle Definition von Solarfahrrad .....	8
2.1.3	Unterschiedliche Definitionen von Elektrofahrrädern .....	10
2.1.4	Gesetzliche Vorschriften in Österreich .....	12
<b>2.2</b>	<b>Haben Solarfahrräder Zukunft?</b> .....	<b>21</b>
2.2.1	Mobilität .....	21
2.2.2	Energieverbrauch .....	22
2.2.3	Kosten .....	24
2.2.4	Individualverkehrsmittel .....	29
2.2.5	Öffentliche Verkehrsmittel .....	33
2.2.5	Alternativen .....	34
<b>2.3</b>	<b>Warum (nur) eine Diplomarbeit?</b> .....	<b>35</b>
<b>2.4</b>	<b>Wie wird es weitergehen?</b> .....	<b>36</b>
<b>2.5</b>	<b>Quellen</b> .....	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>Was bietet der Markt</b>	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b>Fahrrad mit elektrischem Hilfsmotor</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Fahrradtests</b> .....	<b>40</b>
3.2.1	Pedelecs und E-Bike Test 2002 von ExtraEnergy e.V. [3.1] .....	40
3.2.2	Tests von Elektro Bike Shop Wenger, Schweiz [3.4] .....	50
<b>3.3</b>	<b>Alternative Technologien</b> .....	<b>54</b>
<b>3.4</b>	<b>Quellen</b> .....	<b>55</b>
<b>4</b>	<b>Technisches</b>	<b>56</b>
<b>4.1</b>	<b>Auslegung und Dimensionierung</b> .....	<b>57</b>
4.1.1	Fahrwiderstände und Energiebedarf beim Radfahren .....	57
4.1.2	Zusammenfassende Betrachtung der Auslegungskriterien .....	63
<b>4.2</b>	<b>Die wichtigsten Bestandteile</b> .....	<b>65</b>
4.1.1	Rahmen (2rad, 3rad, 4rad) .....	65
4.1.2	Motor und Motorregelung .....	67
4.1.3	Energiespeicher .....	76
4.1.4	Solarzellen .....	98
4.1.5	Laderegler .....	107
<b>4.3</b>	<b>Quellen</b> .....	<b>110</b>

<b>5</b>	<b>Meßwerte, Meßmethoden</b>	<b>113</b>
<b>5.1</b>	<b>Leistungsfähigkeit von Menschen</b>	<b>114</b>
<b>5.2</b>	<b>Motoren</b>	<b>115</b>
5.2.1	Radnabenmotoren	115
5.2.2	Motorprüfstand	116
5.2.3	Radnabenmotor von Heinzmann	120
5.2.4	Radnabenmotor von Schachner	121
<b>5.3</b>	<b>Akkus</b>	<b>125</b>
5.3.1	Gemeinhin bekannte Probleme	125
5.3.2	NiCd-Zellen von Sanyo	126
5.3.3	Gewickelte Blei-Vlies-Akkus von Exide	131
<b>5.4</b>	<b>Laderegler</b>	<b>132</b>
<b>5.5</b>	<b>Quellen</b>	<b>136</b>
<b>6</b>	<b>Technische Daten</b>	<b>137</b>
<b>6.1</b>	<b>Fahrräder</b>	<b>138</b>
6.1.1	Elektrodreirad von Velocab	138
6.1.2	Solarfahrrad Prototyp I	138
<b>6.2</b>	<b>Motoren</b>	<b>140</b>
6.2.1	Fahrrad-Nachrüstsatz von Heinzmann	140
6.2.2	Fahrrad-Nachrüstsatz von Schachner	140
<b>6.3</b>	<b>Akkus</b>	<b>142</b>
6.3.1	Bleiakku von Exide	142
6.3.2	NiCd-Akku von Sanyo	142
<b>6.4</b>	<b>Solarzellen</b>	<b>144</b>
6.4.1	Das von Stromaufwärts gesponserte Kyocera-Solarmodul KC 120-1	144
<b>6.5</b>	<b>Solarladeregler</b>	<b>145</b>
6.5.1	Solarladeregler Solomon SR8	145
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>146</b>
<b>7.1</b>	<b>Fahrradverordnung (gültig sein 1.Mai 2001)</b>	<b>147</b>
<b>7.2</b>	<b>Rechenbeispiele für Hauptschule</b>	<b>151</b>

# 1. Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Als Basis für dieses Werk diente die Diplomarbeit „Entwicklung und Bau eines solarelektrischen Fahrradhilfsantriebs – Bewertung des Projektes aus umwelttechnischer Sicht“ von Alexander Curtis aus Bruck an der Mur, die im März 2000 fertig gestellt und am Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik und dem Institut für Elektrotechnik der Montanuniversität Leoben durchgeführt wurde.

Herr Curtis realisiert ein durchaus praxistaugliches Elektrofahrrad, das als „unechtes Solarfahrrad“ konzipiert wurde und über eine stationäre Solarladestation mit 72 Wp geladen werden konnte. Selbst im Winter war es an sonnigen Tagen möglich, leere Akkus binnen eines Tages aufzuladen.

Angetrieben wurde es mit einem 24 V Gleichstrommotor, der ohne Getriebe mittels Schalthebel über eine Reibrolle direkt auf des Hinterrad wirkte. Durch diese Kopplung sind natürlich die Fahrraddecke und durch mitgenommene Steinchen die Reibrolle einem verstärkten Verschleiß ausgesetzt und müssen regelmäßig getauscht werden. Dafür fallen keine Getriebeverluste an. Mittels Schalthebel kann der Motor angehoben werden, so dass das Elektrofahrrad leichtgängig wie ein normales Fahrrad mit etwas 15 kg Gepäck zu fahren war. Dies ist besonders dann von Vorteil, wenn man das Rad bergab laufen lassen oder schneller fahren will und ermöglichte die einfache Aufrüstung eines käuflichen Elektrofahrrades.

Durch die Eigenart der Gleichstrommaschine und den mit 24 V begrenzten Systemspannung, die auf die Geschwindigkeit von 24 km/h abgestimmt war, unterstützt der Motor bis zu Geschwindigkeiten von etwa 30 km/h. Mit höher werdender Geschwindigkeit stellte sich dann ein immer größer werdendes Bremsmoment ein, da der Motor schließlich als Generator wirkt und eine über der Systemspannung liegenden Generatorspannung erzeugt. Durch den hochklappbaren Motor stellte dies in der Praxis nur ein kleines, leicht zu umgehendes Problem dar.

Bei Versuchsfahrten konnte auf waagrechter Fahrbahn eine maximale Geschwindigkeit von 24 km/h erreicht werden. Durch Mittreten kann über längere Zeit eine Geschwindigkeit von 30 km/h gehalten werden. Beim Befahren von leichten Steigungen kommt man flotter voran als ohne Motorunterstützung. Die Reichweite mit frisch aufgeladenen Pb-Gel-Akkus beträgt ca. 20 km, durch Mittreten kann man 35 km schaffen.

Aus umwelttechnische Sicht stellten sich die verwendeten Blei-Batterien und die Elektronik als Schwachpunkte heraus. Die Praxis hat jedoch gezeigt, dass 90% der Blei-Akkumulatoren, die in Autos eingesetzt wurden, einem Recycling zugeführt werden. Werden, wie

anzunehmen ist, bei Elektrofahrrädern ähnlich hohe Rücklaufquoten erreicht, werden eventuelle, negative Auswirkungen auf die Umwelt stark reduziert. Herr Curtis schreibt selbst, dass für den Fall, wo das Elektrofahrrad teilweise statt einem Auto verwendet wird, die umweltrelevanten Stoffe und Bauteile des Elektrofahrrades praktisch keine Rolle mehr spielen.

## 1.2 Zielsetzung

Als Ziel dieser Arbeit wurde die Auslegung und die Konstruktion eines echten Solarfahrrades, bei dem ein etwa 1 m<sup>2</sup> großes Solarmodul in Form einer Dachkonstruktion ständig mitgeführt wird und zum Laden der Akkus und zur Unterstützung des Antriebes dienen soll, vorgeschlagen. Um aus den Erfahrungen des Vorgängerprojektes einen Nutzen zu ziehen, wurde die Konstruktion einer vom Wirkungsgrad besseren permanent erregten Synchronmaschine (PSM) vorgeschlagen. Bei der vorgeschlagenen Maschine wäre auch ein Getriebe und ein Freilauf notwendig gewesen.

Als Vorarbeit war eine Literaturrecherche und die Suche vergleichbarer, am Markt bestehender oder im Prototypenstadium befindlicher Produkte durchzuführen und wurde in Form der Internetplattform [www.solarcycle.net](http://www.solarcycle.net) umgesetzt.

Mit dieser Arbeit sollte schlussendlich gezeigt werden, dass eine PSM in Kombination mit fix montierten Solarzellen eine gangbare, gut funktionierende Variante eines Elektroleichtmobiles darstellt. Die Alltagstauglichkeit sollte an einem eigens konstruierten Fahrrad unter Beweis gestellt werden.

## **2. Zur Thematik**

Solarfahrrad ist nicht gleich Solarfahrrad. Jeder versteht darunter etwas anderes. Das gilt übrigens auch für Fahrräder mit elektrischem Hilfsmotor. In Österreich dürfen laut KFG §1 (2a) [2.1] Fahrräder mit einem elektrischen Hilfsmotor eine Leistung von 400 W und eine Bauartgeschwindigkeit von 20 km/h mit einem Fahrergewicht von 75 kg auf ebener Fahrbahn bei Windstille nicht überschreiten.

## 2.1 Was ist ein Solarfahrrad?

Man möchte meinen, dass ein Solarfahrrad per Definition mit Solarzellen ausgestattet sein muss, welche die Energiespeicher (Akkus) während des Betriebes oder Nichtbetriebes tagsüber laden. So ein Fahrrad mit einem elektrischen Hilfsmotor, das die elektrische Energie aus einem am Fahrrad montierten Solarpaneel bezieht, wird gerne als „echtes Solarfahrrad“ bezeichnet, wohingegen auch schon ein normales Elektrofahrrad, das mit Solarstrom geladen wird, oft als Solarfahrrad bezeichnet wird.

Die Anzahl der Räder spielt bei Fahrrädern keine Rolle (Solar2rad, Solar3rad, ...), wodurch stabile, kippsichere Räder mit größeren, schwereren Akkus und einer großen Solarzellenfläche für größere Reichweiten und mehr Zuladekapazität konstruiert werden können.



*Bild 2.1: Solardreirad von Greenspeed mit Radnabenmotor von Heinzmann [2.2]*

### 2.1.1 Was wird alles als Solarfahrrad bezeichnet?

Interessanterweise muss aber auf einem Solarfahrrad gar keine Solarzelle montiert sein, um als Solarfahrrad bezeichnet zu werden. Es genügt, wenn ein Elektrofahrrad mit elektrischem Strom von ortsfest montierten Solarmodulen geladen wird. Dies hat den Vorteil, dass der Solarstrom auch dann genutzt werden kann, wenn der Akku des Elektrofahrrades voll geladen ist. Das Modul kann viel größer sein und somit den Akku auch bei bewölktem Himmel in kurzer Zeit laden. Das Elektrofahrrad selbst bleibt leicht und handlich und ist in der Anschaffung um einiges günstiger. Die Solarzellen können an einem idealen, sonnigen Platz montiert werden und werden im Falle eines Unfalles mit dem Solarrad nicht beschädigt. Es können mehrere Fahrräder angeschafft und parallel geladen oder während der hohen Lebensdauer der Solarzellen von über 20 bis 30 Jahren durch neue ersetzt werden.

Die Definition des (unechten) Solarfahrrades ist auch insofern problematisch, wenn versucht wird, die ganze Sache noch ein wenig wirtschaftlicher aufzuziehen. Wie jeder weiß, ist die Errichtung eines zentralistischen Großkraftwerkes viel billiger als die Errichtung vieler kleiner, autonomer Kraftwerke. Wer ökonomisch und kurz- bis mittelfristig denkt, kommt leicht auf die Idee, dass das Laden des Elektrofahrrades mit zugekauftem Solarstrom viel einfacher und besser ist. Solarstrom wird gerne zusammen mit Strom aus anderen Energiequellen und nachwachsenden Energieträgern als Ökostrom verkauft und macht somit das Solarfahrrad zum Ökostrom-Fahrrad. Damit bewegt man sich am ökonomischen Minimum und produziert kaum mehr Überschuss-Solarstrom. Leider kann niemand erkennen, dass mit Ökostrom gefahren wird – schlecht für die Propagierung und Imageaufwertung von Solarenergie.

Und unter Ökostrom fallen neben Photovoltaikkraftwerken zum Beispiel auch Windenergie- und Wasserkraftwerke, womit unser Solarfahrrad zum Wasser- oder Wind-Fahrrad wird. Um nun dieses Gedankenspiel einen Schritt weiter zu spinnen und die Zweifelhaftigkeit dieser laxen Solarfahrraddefinition noch besser vor Augen zu führen, soll nicht unerwähnt bleiben, dass in Biogasanlagen auch Ökostrom produziert werden kann. Dann ist es ökonomisch und ökologisch sinnvoller, ein Fahrrad mit Benzin-Hilfsmotor auf Gasbetrieb umzurüsten und das Biogas gleich vor der Verstromung zu nutzen! Ein Solarfahrrad, das einen Energieträger nutzt, der durch Umwandlung von aus Sonnenenergie (Photosynthese der Pflanzen) entstandenem, organischen Materials gewonnen wird?



*Bild 2.2: „Unechtes“ Solarmotorrad*

Die „unechten“ Solarfahrräder haben wie gewöhnliche Elektroräder den gravierenden Nachteil, dass sie ständig nachgeladen werden müssen. Doch gerade jene Leute, die sich für

Elektroräder mit Hilfsmotor interessieren, wollen ein bequemes, komfortables Fortbewegungsmittel, das ohne viel Service auskommt. Das ständige Aufladen Müssen eines Elektrofahrrad wird trotz erhöhtem Komfort beim Fahren dieser Anforderung nicht gerecht. Gerne wird auf das Aufladen verzichtet oder darauf vergessen, so dass das Rad beim nächsten Ausritt halb leere Akkus hat und über kurz oder lang ungeladen in einer Ecke landet. Je nach Akkutyp kann es sein, dass sie diese Nachlässigkeit nicht lange überleben und schon in den ersten Jahren an Speicherfähigkeit einbüßen oder endgültig den Geist aufgeben.

Werden Bleiakkus benutzt, sollte das Rad am besten nach jeder Ausfahrt aufgeladen werden, da bei nicht ganz vollen Bleiakkus schon nach ein, zwei Tagen der Sulfatierungsprozess einsetzt und Stromdichte und Kapazität messbar sinken, wie Herr Dipl.-Ing. Günter Beidl von der Exide Batteriewerke GmbH erläutert. Bei Verwendung von NiCd-Zellen verhält es sich eher umgekehrt – werden sie immer gleich wieder aufgeladen, macht sich der für diese Zellen typische Memoryeffekt bemerkbar. Wird das Fahrrad halb leer stehen gelassen, dann steht zur nächsten Ausfahrt nicht die volle Akkukapazität zur Verfügung. Auf den Unterschied dieser beiden Akkutypen und die Besonderheiten alternativer Akkus bzw. Energiespeicher soll in Kapitel 4 genauer eingegangen werden.

Das andere Extrem wäre ein Solarfahrrad, das ohne oder mit nur sehr kleinen Akkumulatoren oder Kondensatoren zur Energiezwischenlagerung für den Rekuperationsbetrieb auskommt und dafür eine größere Solarzellenfläche hat. Mit so einem Fahrrad lässt sich nur dann solarbetrieben fahren, wenn die Sonne scheint. Wenngleich das eine interessante Alternative für südliche Gegenden ist, so macht dies im gemäßigten Klima kaum Sinn. Diese Betriebsart ist hierzulande nur für Solarelektroboote interessant, die ohnehin nur an sonnigen Tagen in Verwendung sind und nur einen kleinen Notakku an Bord haben, um bei einem Wetterumsturz, wenn die Sonneneinstrahlung zu gering ist, noch sicher ans Ufer zurück kommen zu können. Zwar spielt bei Booten zusätzliches Akkugewicht weniger Rolle, doch vereinfacht und verbilligt sich dadurch die Wartung neben den viel geringeren Anschaffungskosten. Akkus sind zwar wesentlich billiger als Solarzellen, altern dafür aber relativ schnell und müssen alle paar Jahre entsorgt und durch neue ersetzt werden.



*Bild 2.3: Einfaches Solarrennrad, das für ein Rennen auf geringes Gewicht und Windschlüpfrigkeit optimiert wurde.*

Nun heißt es, den goldenen Weg der Mitte zu finden und weder zu kleine Akkus noch eine zu kleine photovoltaisch aktive Fläche (Solarmodule) zu verwenden. Bei den ersten echten Solarfahrrädern wurde meist am Gepäckträger oder über dem Vorderrad kleine Module montiert. Diesen Rädern wurde sehr bald nachgesagt, dass die Solarzellen nicht einmal zur Erhaltung der Akkuladung reichen. Anders gesagt heißt das, dass das Verhältnis von Solarzellenfläche zu Akkukapazität stimmen muss!

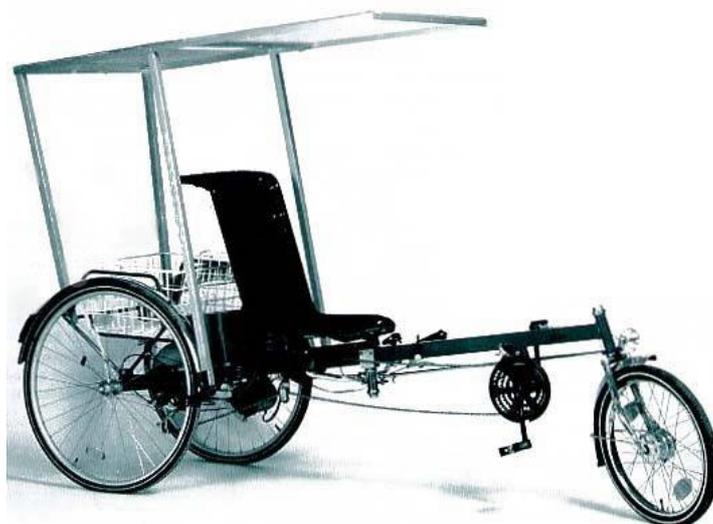
### 2.1.2 Sinnvolle Definition von Solarfahrrad

Wie vorhin schon erwähnt, gibt es leider keine klare Definition von Solarfahrrad. Im Rahmen dieser Arbeit ist jedoch unter Solarfahrrad ein „echtes Solarfahrrad“ zu verstehen. Fahrräder mit stationären, nicht am Fahrzeug montierten Paneelen werden explizit als „unechte Solarfahrräder“ bezeichnet. Außerdem werde ich hier bestimmte, sinnvolle Designgrößen vorschlagen. Und zwar sollte man als echtes Solarfahrrad Räder bezeichnen, mit denen in der gemäßigten Klimazone über das Sommerhalbjahr im Schnitt 1 Stunde oder 20 km täglich gefahren werden kann. Die Akkukapazität sollte für eine halbe Woche reichen und die Akkus sollten an einem sonnigen Tag zu 90% aufgeladen werden können. Das erfordert bei den heutigen Solarzellenwirkungsgraden eine Paneelfläche von etwa  $1 \text{ m}^2$ .



*Bild 2.4: Solarfahrrad aus der Schweiz (Prototyp)*

Erst bei ausreichend leistungsstarken Solarzellen macht ein Solarfahrrad so richtig Sinn. Es ist weniger für den Ausgleichssport in der Freizeit geeignet, da sportlich ambitionierte Fahrer nicht auf Zusatzleistung angewiesen sind und schneller als die für Elektrofahrräder mit Hilfsmotor erlaubten 20 km/h fahren wollen. Ein durchschnittlicher Radfahrer fährt im städtischen Bereich langsamer. Das echte Solarfahrrad scheint daher gerade für den Alltagsverkehr besonders geeignet zu sein, wo täglich viele kurze Strecken zurück gelegt werden müssen, oft Aktenkoffer, Schul- oder Einkaufstaschen oder Mineral- oder Bierkisten zu transportieren sind und wo man entspannt und weder ausgepowert noch verschwitzt in der Arbeit oder in der Schule ankommen will. Das fix montierte Solarzellendach macht das gefährliche und überdies verbotene Mittransportieren eines aufgespannten Regenschirms bei Schlechtwetter überflüssig und schützt gerade während der heißen Mittagszeit vor direkter Sonneneinstrahlung.



*Bild 2.5: Solarliegedreirad des deutschen Vereins ASK*

Solarfahrräder mit nicht am Rad fix angebrachten Solarzellen sollten als das bezeichnet werden, was sie sind, nämlich als „Elektrofahrräder mit (stationärer) Solarladestation“ (oder zumindest als „unechte Solarfahrräder“).

### 2.1.3 Unterschiedliche Definitionen von Elektrofahrrädern

Als die Motorsteuerungen für die Elektrofahrräder besser und besser wurden und den Ein-/Ausschalter endgültig ersetzten, wurde überlegt, mit welchem steuerungstechnischen Trick die Reichweite erhöht und die Radfahrer am besten unterstützt werden könnten. Mitte der 90er Jahre wurde in Japan neben dem bis dorthin als E-Bike bekannten „Elektrofahrrad mit Gasdrehgriff“ das Pedelec erfunden.

Das Pedelec

Pedelec (pedal electric bicycle) ist ein Kunstwort aus den englischen Wörtern „pedal“ (treten) und „electric“ (elektrisch), bei dem der elektrische Hilfsantrieb nur dann dazugeschaltet wird, wenn der Fahrende mittritt. Es wurde von Yamaha 1994 zur Steigerung der Reichweite und des Fahrkomforts von Elektrofahrrädern auf den Markt gebracht. Ausgefeilte Steuerungen unterstützen den Fahrenden meist bis zu 50% mit Motorleistung bis die gesetzlich vorgeschriebenen Höchstgeschwindigkeit erreicht wird. Meist ab 20 km/h wird die Leistung allmählich zurückgenommen und ab 24 km/h wird der Fahrende nicht mehr unterstützt. Auf diese Art wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit relativ leichtfüßig erreicht, stellt aber gleichzeitig eine gewisse Barriere dar. Da darüber hinaus der Motor abgeschaltet ist, muss wegen dem höheren Fahrzeuggewicht stärker als bei einem normalen Fahrrad in die Pedale getreten werden. Die Höchstgeschwindigkeit liegt für Pedelecs mit 24 km/h in Deutschland und vielen anderen Ländern etwas höher als bei E-Bikes mit 20 km/h.

Durchschnittliche, Fahrrad fahrende Personen kommen kaum über die Höchstgeschwindigkeit hinaus, können aber bergauf schnell fahren. Durch diesen Effekt ergibt sich eine erhöhte Verkehrssicherheit wegen der niedrigeren Höchstgeschwindigkeit in der Ebene. Im Schnitt fährt man dennoch schneller. Ein anderer positiver Nebeneffekt ist, dass auf ebenen und vor allem auf abschüssigen Wegen weniger oder gar keine Motorleistung benötigt wird. Die Reichweite erhöht sich dadurch gewaltig.

Leider wird dadurch auch die Vergleichbarkeit durch Praxistests schlechter, wie ein Testfahrer gestand. Ein gut trainierter Testfahrer, der nur bergauf oder beim Beschleunigen unter 24 km/h fährt, benötigt viel weniger Energie als ein Testfahrer, der selbst in der Ebene mit nur 50% Muskelleistung 20 km/h fährt und kaum darüber hinaus kommt. Die erzielbaren

Reichweiten hängen extrem stark von der Verfassung und dem Willen des Fahrers ab. Das ist ein schweres Manko, das nur durch ein normiertes, automatisiertes Prüfverfahren aus dem Weg geschaffen werden kann. Die Reichweitenangaben der 1999 von ExtraEnergy in Modena getesteten Pedelecs und E-Bikes sind äußerster zweifelhaft. Ein Reichweitenvergleich von Pedelecs und E-Bikes ist ebenfalls sinnlos. Abhilfe würden höchstens Leihfahräder schaffen, die für Vergleichstests von Kunden über eine Woche ausgeborgt werden können um sie zuhause zu testen..

Ein weiterer gravierender Nachteil dieser von der Trittleistung abhängigen Technik ist, dass sie kaum bzw. gar nicht für schwächliche Personen geeignet ist, wenngleich gerade diese Leute einen Hilfsantrieb am ehesten brauchen würden. Eine Person, die nur halb so viel Tretleistung erbringt, wird vom Motor auch nur halb so stark unterstützt, wie eine kräftige Person, der damit zum Beispiel beim bergauf fahren (unter 20 km/h) viermal mehr Leistung zur Verfügung steht!

### Das E-Bike

Beim E-Bike wird der elektrische Hilfsantrieb meist durch einen Gasdrehgriff vom Fahrenden wie bei einem Motorrad gesteuert. Das verleitet all zu leicht, gänzlich aufs Mittreten zu verzichten und gemütlich wie mit einem Moped durch die Gegend zu gleiten. Dafür steht auch schwächeren Personen beim Bergfahren die volle Motorleistung zur Verfügung.

Im Normalfall wird die Motorleistung so gewählt, dass mit vollem Akku, 75 kg Beladung (entspricht ungefähr dem durchschnittlichen Körpergewicht), ebener Fahrbahn und bei Windstille die höchstzulässige Geschwindigkeit (20 km/h in Österreich) noch erreicht wird. Das ist nicht nur für untrainierte Personen von Vorteil sondern auch für sportliche Fahrer, da bei Vollgas immer die maximale Motorleistung zur Verfügung steht – auch oberhalb der Höchstgeschwindigkeit.

Diese einfache Steuerung ist besonders für leichte Personen oder beim Bergabfahren von Vorteil. Um auf Bergstrecken oder beim Beschleunigen sollte mehr Leistung zur Verfügung gestellt zu bekommen, wird eine intelligenter Lösung benötigt. In diesem Fall ist es einfacher, den Motor stärker auszulegen und unterhalb der Höchstgeschwindigkeit volle Motorleistung zu Verfügung zu stellen, darüber nur so viel, wie im Normalfall zum Erreichen der 20 km/h nötig ist. Eine elektronische Abschaltung des Motors bei höchstzulässiger Geschwindigkeit hat wie bei Pedelecs den Nachteil, dass bei höherer Geschwindigkeit der zusätzliche Fahrwiderstand wegen des höheren Gewichtes des E-Bikes ganz alleine vom Fahrenden aufzubringen ist.

### Elektrofahrrad allgemein

Soweit zur Theorie, in der Praxis ist ohnehin den gesetzlichen Vorschriften zu entsprechen. Und dass diese von Zeit zu Zeit geändert werden, wissen wir. Wünschenswert wäre zum Beispiel eine Kombination von Pedelec und E-Bike, bei der sowohl die reichweitenerhöhenden Eigenschaften von Pedelecs durch das „erzwungene“ Mittreten als auch die gute Bergeignung von E-Bikes, die besonders für schwächlichere Menschen ein große Hilfe ist, genutzt werden können. Wer nachfragt, bekommt bei einigen Herstellern tatsächlich schon eine entsprechende Lösung angeboten – als normales Elektrofahrrad.

Um Elektrofahrrad fahrenden Personen den Spaß am Fahrrad fahren durch das Zusatzgewicht von Motor, Akku usw. nicht zu verderben, sollte beim Überschreiten der höchstzulässigen Geschwindigkeit soviel an Zusatzleistung bereitgestellt werden, wie durch das Mehrgewicht es E-Bikes zusätzlich benötigt wird. Die nötige Elektronik sollte nachrüstbar sein, denn dann würden sich diese Fahrzeuge trotz Mehrgewicht im höheren Geschwindigkeitsbereich so fahren lassen, wie normale Fahrräder.

### Fahrrad mit elektromotorisch angetriebenen Anhänger

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, gewisse Teile des Solarfahrrades wie zum Beispiel die Akkus oder die Solarzellen auf einen einachsigen, ein- oder mehrspurigen Anhänger auszulagern. Wird auch der Elektromotor in den Anhänger eingebaut, dann kann ein ganz normales Fahrrad verwendet werden, das zum Beispiel durch einen abnehmbaren Gasgriff (oder fix montiertem mit Steckverbindung für das Steuerkabel) und einem Kabeln mit dem Hänger verbunden ist. Von dieser Variante gibt es tatsächlich ein paar Ausführungen verschiedener Bastler. Meines Wissens gibt es keine gesetzliche Regelung für diesen Spezialfall.

#### 2.1.4 Gesetzliche Vorschriften in Österreich

Mit 1.Mai 2001 trat die neue Fahrradverordnung in Kraft. Das ist Grund genug, sie zur Gänze in diese Arbeit aufzunehmen (siehe Anhang). An dieser Stelle möchte ich nur die wichtigsten Bestimmungen für die Dimensionierung von (Solar)Fahrrädern kurz zusammenfassen und kommentieren. Da die Fahrradverordnung nicht alle maßgeblichen Bestimmungen beinhaltet, soll auch auf das Kraftfahrzeuggesetz und die Straßenverkehrsordnung kurz eingegangen werden.

Gemäß FahrradVO §1 Zi. 1 dürfen nur Fahrräder in Verkehr gebracht werden, die mit zwei voneinander unabhängig wirkenden Bremsvorrichtungen ausgestattet sind, mit denen auf

trockener Fahrbahn eine mittlere Bremsverzögerung von  $4 \text{ m/s}^2$  bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von  $20 \text{ km/h}$  erreicht wird. Diese Angaben sind leider nicht für eine einfache Messungen mit Stoppuhr und Maßband geeignet. Einfacher ist es, die Bremszeit zu stoppen oder den Bremsweg zu messen. Dazu geht man von folgender Gleichung aus:  $v - \int a dt = 0$ . Ist die mittlere Verzögerung über die Bremszeit konstant, so dass gilt:  $v - a \cdot t = 0$ . Setzt man die Werte  $v = 20 \text{ km/h} = 5,56 \text{ m/s}$  und  $a = 4 \text{ m/s}^2$  ein, so erhält man nach Umformen für die Bremszeit  $t = v/a = 1,389 \text{ s}$  und für den Bremsweg  $s = v \cdot t - a \cdot t^2 / 2 = 3,858 \text{ m}$ . Um also eine Bremsverzögerung von  $4 \text{ m/s}^2$  zu erreichen, muss der Testfahrer ausgehend von  $20 \text{ km/h}$  innerhalb von  $1,39$  Sekunden zum Stillstand kommen. Der Bremsweg muss unter  $3,86 \text{ m}$  liegen. Die Reaktionszeit und der Reaktionsweg sind in diesem Fall nicht zu berücksichtigen.

Für mehrspurige Fahrzeuge müssen gemäß §2.2 die Bremsen auf alle Räder und innerhalb einer Achse gleichzeitig und gleichmäßig wirken. Gemäß §7 darf das Ladegewicht von  $250 \text{ kg}$  bei der Beförderung von Lasten oder Personen nicht überschritten werden.

Möchte man das Akkugewicht auf einen Anhänger auslagern, so darf das Ladegewicht dieses gemäß §7 bei durchgehend- und auflaufgebremsten Anhängern  $100 \text{ kg}$ , bei ungebremsten Anhängern  $60 \text{ kg}$  nicht überschreiten. Das den Anhänger ziehende Fahrrad muss zumindest eine Gangstufe mit einer Entfaltung von höchstens  $4 \text{ m}$  pro Kurbelumdrehung aufweisen (§3 Abs.1 Zi.1) und einen Ständer aufweisen (§3 Abs.1 Zi.3).

Im österreichischen Kraftfahrsgesetz (KFG) finden sich dann die Rahmenbedingungen für „elektrisch angetriebene Fahrräder“ und somit auch für Solarfahrräder unter §1 Abs. 2a: [2.1]

KFG §1 (2a)

„Nicht als Kraftfahrzeuge, sondern als Fahrräder im Sinne der StVO 1960 gelten auch elektrisch angetriebene Fahrräder mit

1. einer höchsten zulässigen Leistung von nicht mehr als  $400 \text{ Watt}$  und
2. einer Bauartgeschwindigkeit von nicht mehr als  $20 \text{ km/h}$ .“

In der Straßenverkehrsordnung in der gültigen Fassung von 1960 werden die mit Fahrrad in Zusammenhang stehende Begriffe definiert und beschrieben, was mit dem Fahrrad erlaubt ist und was nicht. Ich habe nur die wichtigsten Paragraphen und Absätze in diese Arbeit übernommen, scheint mir doch auch die rechtliche Seite bedeutsam zu sein. Die Texte in den Kästen wurden direkt übernommen, die Kommentare darunter stammen aus eigener Feder. [2.3]

StVO 1960 § 2. Begriffsbestimmungen.

7. Radfahrstreifen: ein für den Fahrradverkehr bestimmter und besonders gekennzeichnete Teil der Fahrbahn, wobei der Verlauf durch wiederholte Markierung mit Fahrradsymbolen und das Ende durch die Schriftzeichenmarkierung „Ende“ angezeigt wird;

7a. Mehrzweckstreifen: ein Radfahrstreifen oder ein Abschnitt eines Radfahrstreifens, der unter besonderer Rücksichtnahme auf die Radfahrer von anderen Fahrzeugen befahren werden darf, wenn für diese der links an den Mehrzweckstreifen angrenzende Fahrstreifen nicht breit genug ist oder wenn das Befahren durch Richtungspfeile auf der Fahrbahn für das Einordnen zur Weiterfahrt angeordnet ist.

8. Radweg: ein für den Verkehr mit Fahrrädern bestimmter und als solcher gekennzeichnete Weg;

11a. Geh- und Radweg: ein für den Fußgänger- und Fahrradverkehr bestimmter und als solcher gekennzeichnete Weg;

11b. Radfahranlage: ein Radfahrstreifen, ein Mehrzweckstreifen, ein Radweg, Geh- und Radweg oder eine Radfahrerüberfahrt;

12a. Radfahrerüberfahrt: ein auf beiden Seiten durch gleichmäßig unterbrochene Quermarkierungen gekennzeichnete, für die Überquerung der Fahrbahn durch Radfahrer bestimmter Fahrbahnteil; ist unmittelbar neben der Radfahrerüberfahrt ein Schutzweg markiert, so kann auf dieser Seite der Radfahrerüberfahrt die Quermarkierung entfallen

19. Fahrzeug: ein zur Verwendung auf Straßen bestimmtes oder auf Straßen verwendetes Beförderungsmittel oder eine fahrbare Arbeitsmaschine, ausgenommen Rollstühle, Kinderwagen, Schubkarren und ähnliche, vorwiegend zur Verwendung außerhalb der Fahrbahn bestimmte Kleinfahrzeuge sowie fahrzeugähnliche Kinderspielzeug (etwa Kinderfahrräder mit einem äußeren Felgendurchmesser von höchstens 300 mm und einer erreichbaren Fahrgeschwindigkeit von höchstens 5 km/h) und Wintersportgeräte.

22. Fahrrad:

a) ein Fahrzeug, das mit einer Vorrichtung zur Übertragung der menschlichen Kraft auf die Antriebsräder ausgestattet ist,

b) ein Fahrzeug nach lit. a, das zusätzlich mit einem elektrischen Antrieb gemäß § 1 Abs. 2a KFG 1967 ausgestattet ist (Elektrofahrrad),

c) ein zweirädriges Fahrzeug, das unmittelbar durch menschliche Kraft angetrieben wird (Roller), oder

d) ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug, dessen Antrieb dem eines Elektrofahrrads im Sinne des § 1 Abs. 2a KFG 1967 entspricht;

StVO 1960 § 8. Fahrordnung auf Straßen mit besonderen Anlagen.

(4) Die Benützung von Gehsteigen, Gehwegen und Schutzinseln mit Fahrzeugen aller Art und die Benützung von Radfahranlagen mit Fahrzeugen, die keine Fahrräder sind, insbesondere mit Motorfahrrädern, ist verboten. Dieses Verbot gilt nicht

1. für das Überqueren von Gehsteigen, Gehwegen und Radfahranlagen mit Fahrzeugen auf den hierfür vorgesehenen Stellen,
2. für das Befahren von Mehrzweckstreifen mit Fahrzeugen, für welche der links an den Mehrzweckstreifen angrenzende Fahrstreifen nicht breit genug ist oder wenn das Befahren durch Richtungspfeile auf der Fahrbahn für das Einordnen zur Weiterfahrt angeordnet ist, wenn dadurch Radfahrer weder gefährdet noch behindert werden, sowie
3. für Arbeitsfahrten mit Fahrzeugen oder Arbeitsmaschinen, die nicht mehr als 1 500 kg Gesamtgewicht haben und für die Schneeräumung, die Streuung, die Reinigung oder Pflege verwendet werden.

In Übereinstimmung mit dem KFG heißt das, dass (elektrisch angetriebene) Fahrräder mit weniger als 400 W Leistung und einer Bauartgeschwindigkeit unter 20 km/h, also Solarfahrräder, wie sie in dieser Arbeit beschrieben werden, zwar auf Gehsteigen, Gehwegen und Schutzinseln nichts verloren haben, dafür aber Radfahranlagen benützen dürfen.

StVO 1960 § 52. Die Vorschriftszeichen

1. "FAHRVERBOT (IN BEIDEN RICHTUNGEN)"

Dieses Zeichen zeigt an, daß das Fahren in beiden Fahrtrichtungen verboten ist; das Schieben eines Fahrrades ist erlaubt.

8a. "FAHRVERBOT FÜR FAHRRÄDER UND MOTORFAHRRÄDER"

Dieses Zeichen zeigt an, daß das Fahren mit Fahrrädern und mit Motorfahrrädern verboten ist. Das Schieben dieser Fahrzeuge ist jedoch gestattet. Für die Lenker von Motorfahrrädern gilt überdies die Z. 8b.

8c. "FAHRVERBOT FÜR FAHRRÄDER"

Dieses Zeichen zeigt an, daß das Fahren mit Fahrrädern verboten ist; das Schieben dieser Fahrzeuge ist jedoch gestattet.

16. "RADWEG"

Dieses Zeichen zeigt an, daß Lenker von einspurigen Fahrrädern nur den Radweg benützen dürfen.

17a. "GEH- UND RADWEG"

Diese Zeichen zeigen einen Geh- und Radweg an, und zwar ein Zeichen nach a) einen für Fußgänger und Radfahrer gemeinsam zu benützenden Geh- und Radweg und ein Zeichen

nach b) einen Geh- und Radweg, bei dem der Fußgänger- und Fahrradverkehr getrennt geführt werden, wobei die Symbole im Zeichen nach b) der tatsächlichen Verkehrsführung entsprechend anzuordnen sind (Fußgänger rechts, Fahrrad links oder umgekehrt).

Während Lenker von einspurigen Fahrzeugen einen Radweg benützen müssen, ist das für einspurige Fahrräder mit einem Anhänger unter 80 cm Breite nicht obligatorisch. Mehrspurige Fahrräder müssen die Straße benutzen (siehe StVO 1960 § 68. Verhalten der Radfahrer).

#### StVO 1960 § 65. Benützung von Fahrrädern.

(1) Der Lenker eines Fahrrades (Radfahrer) muß mindestens zwölf Jahre alt sein; wer ein Fahrrad schiebt, gilt nicht als Radfahrer. Kinder unter zwölf Jahren dürfen ein Fahrrad nur unter Aufsicht einer Person, die das 16. Lebensjahr vollendet hat, oder mit behördlicher Bewilligung lenken.

(2) Die Behörde hat auf Antrag des gesetzlichen Vertreters des Kindes die Bewilligung nach Abs. 1 zu erteilen, wenn das Kind das 10. Lebensjahr vollendet hat und anzunehmen ist, daß es die erforderliche körperliche und geistige Eignung sowie Kenntnisse der straßenpolizeilichen Vorschriften besitzt. Die Bewilligung gilt für das ganze Bundesgebiet, sofern nicht der gesetzliche Vertreter des Kindes eine örtlich eingeschränkte Geltung beantragt hat. Sie ist unter Bedingungen und mit Auflagen zu erteilen, wenn dies die Verkehrssicherheit erfordert. Die Behörde kann die Bewilligung widerrufen, wenn sich die Verkehrsverhältnisse seit der Erteilung geändert haben oder nachträglich zutage tritt, daß das Kind die erforderliche körperliche oder geistige Eignung nicht besitzt. Über die von ihr erteilte Bewilligung hat die Behörde eine Bestätigung, den Radfahrausweis, auszustellen. Inhalt und Form des Radfahrausweises hat der Bundesminister für Wissenschaft und Verkehr durch Verordnung zu bestimmen. Der auf Grund dieser Bestimmung gestellte Antrag, die erteilte Bewilligung und der ausgestellte Radfahrausweis sind von Bundesstempelgebühren befreit.

(3) Radfahrer, die auf dem Fahrrad Personen mitführen, müssen das 16. Lebensjahr vollendet haben. Ist die mitgeführte Person noch nicht acht Jahre alt, so muß für sie ein eigener, der Größe des Kindes entsprechender Sitz vorhanden sein. Ist die mitgeführte Person mehr als acht Jahre alt, so darf nur ein Fahrrad verwendet werden, das hinsichtlich seiner Bauart den Anforderungen der Produktsicherheitsbestimmungen für Fahrräder zum Transport mehrerer Personen (§ 104 Abs. 8) entspricht.

Ein Kind, das mit 10 Jahren die Fahrradprüfung besteht, darf auch ein Solarfahrrad lenken, ab dem Alter von 12 Jahren darf generell mit dem Rad gefahren werden, sofern man körperlich und geistig dazu in der Lage ist.

StVO 1960 § 66. Beschaffenheit von Fahrrädern, Fahrradanhängern und Kindersitzen

(1) Fahrräder müssen der Größe des Benützers entsprechen. Fahrräder, Fahrradanhänger und Kindersitze müssen in einem Zustand erhalten werden, der den Anforderungen der Produktsicherheitsbestimmungen für Fahrräder (§ 104 Abs. 8) entspricht.

(2) Der Bundesminister für Wissenschaft und Verkehr hat unter Bedachtnahme auf die Verkehrssicherheit und den Stand der Technik durch Verordnung festzulegen:

1. unter welchen Voraussetzungen bestimmte Teile der Ausrüstung von Fahrrädern oder Fahrradanhängern entfallen können;

2. unter welchen Voraussetzungen die Beförderung von Kindern in Kindersitzen oder Personen mit Fahrradanhängern und mehrspurigen Fahrrädern zulässig ist;

3. das Ladegewicht, das bei der Beförderung von Lasten oder Personen mit Fahrrädern oder mit Fahrradanhängern nicht überschritten werden darf.

StVO 1960 § 68. Verhalten der Radfahrer.

(1) Auf Straßen mit einer Radfahranlage ist mit einspurigen Fahrrädern ohne Anhänger die Radfahranlage zu benutzen, wenn das Befahren der Radfahranlage in der vom Radfahrer beabsichtigten Fahrtrichtung gemäß § 8a erlaubt ist. Mit Fahrrädern mit einem Anhänger, der nicht breiter als 80 cm oder ausschließlich zur Personenbeförderung bestimmt ist, sowie bei Trainingsfahrten mit Rennfahrrädern kann die Radfahranlage benützt werden. Mit Fahrrädern mit einem sonstigen Anhänger und mit mehrspurigen Fahrrädern ist die für den übrigen Verkehr bestimmte Fahrbahn zu benutzen. Auf Gehsteigen und Gehwegen ist das Radfahren in der Längsrichtung verboten. Auf Geh- und Radwegen haben sich Radfahrer so zu verhalten, daß Fußgänger nicht gefährdet werden.

(2) Radfahrer dürfen nur auf Radwegen und in Wohnstraßen sowie auf sonstigen Straßen mit öffentlichem Verkehr bei Trainingsfahrten mit Rennfahrrädern nebeneinander fahren; beim Nebeneinanderfahren darf nur der äußerste rechte Fahrstreifen benützt werden.

(3) Es ist verboten,

a) auf einem Fahrrad freihändig zu fahren oder die Füße während der Fahrt von den Treteinrichtungen zu entfernen,

b) sich mit einem Fahrrad an ein anderes Fahrzeug anzuhängen, um sich ziehen zu lassen,

c) Fahrräder in einer nicht verkehrsgemäßen Art zu gebrauchen, zum Beispiel Karussellfahren, wettfahren und dgl.,

d) beim Radfahren andere Fahrzeuge oder Kleinfahrzeuge mitzuführen.

(3a) Radfahrerüberfahrten, wo der Verkehr nicht durch Arm- oder Lichtzeichen geregelt wird, dürfen Radfahrer nur mit einer Geschwindigkeit von höchstens 10 km/h und nicht unmittelbar vor einem herannahenden Fahrzeug und für dessen Lenker überraschend befahren.

(4) Fahrräder sind so aufzustellen, daß sie nicht umfallen oder den Verkehr behindern können. Ist ein Gehsteig mehr als 2,5 m breit, so dürfen Fahrräder auch auf dem Gehsteig abgestellt werden; dies gilt nicht im Haltestellenbereich öffentlicher Verkehrsmittel, außer wenn dort

Fahrradständer aufgestellt sind. Auf einem Gehsteig sind Fahrräder platzsparend so aufzustellen, daß Fußgänger nicht behindert und Sachen nicht beschädigt werden.

(5) Gegenstände die am Anzeigen der Fahrtrichtungsänderung hindern oder die freie Sicht oder die Bewegungsfreiheit des Radfahrers beeinträchtigen oder Personen gefährden oder Sachen beschädigen können, wie zum Beispiel ungeschützte Sägen oder Sensen, geöffnete Schirme und dgl., dürfen am Fahrrad nicht mitgeführt werden.

Wenn es regnet bleibt einem Radfahrer nur die Möglichkeit, einen Regenschutz anzuziehen. Das Mitführen eines offenen Schirmes ist verboten. Besser hat es der Solarfahrradfahrer, der unterm Solarzellendach doch einigermaßen geschützt ist. Wie ein Zweiradfahrer darf der Fahrer eines mehrspurigen Solarfahrrades während der Fahrt die Füße nicht von den Pedalen geben, zumindest laut Gesetz.

#### StVO 1960 § 69. Motorfahräder

(1) Mit Motorfahrädern ist ausschließlich die Fahrbahn zu benutzen.

(2) Für die Lenker von Motorfahrädern gelten die Bestimmungen des § 68 Abs. 3 bis 5 über das Verhalten von Radfahrern sinngemäß.

Überdies ist ihnen verboten:

- a) Das Nebeneinanderfahren mit anderen Motorfahrädern oder Fahrrädern,
- b) Motorfahräder neben einem anderen Motorfahrrad oder Fahrrad zu schieben,
- c) dieselbe Straße oder dieselben Straßenzüge innerhalb eines örtlichen Bereiches ohne zwingenden Grund mehrmals hintereinander zu befahren oder den Motor am Stand länger als unbedingt notwendig laufen lassen.

Gemäß der EU-Richtlinie 2002/24/EG über die Typengenehmigung für zweirädrige dreirädrige Kraftfahrzeuge, welche am 18. März 2002 vom Europäischen Parlament und dem Rat verabschiedet wurde, gelten Pedelecs bis 25 km/h und nicht mehr als 250 W Motor-Nennleistung als Fahrräder. Die Richtlinie tritt am 9. Mai 2003 in Kraft und ist bis spätestens 9. November 2003 von alle Mitgliedsstaaten in ihrer nationalen Gesetzgebung zu integrieren. Ein Pedelec ist ein Elektrofahrrad, bei dem die vom Motor zur Verfügung gestellte Leistung über einen Tretsensor eingestellt und zwischen 20 und 25 km/h von 100% bis auf 0% reduziert wird. Pedelecs die diese Grenzwerte überschreiten müssen typengenehmigt und als „Kleinkrafträder“ zugelassen werden.

Auszug aus der EU-Richtlinie 2002/24/EG, Artikel 1 (1):

„Diese Richtlinie gilt nicht für ...

- h) Fahrräder mit Trethilfe, die mit einem elektromotorischen Hilfsantrieb mit einer maximalen Nenndauerleistung von 0,25 kW ausgestattet sind, dessen Unterstützung sich mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit progressiv verringert und beim Erreichen einer Geschwindigkeit von 25 km/h oder früher, wenn der Fahrer im Treten einhält, unterbrochen wird, ...“

### Leistungsbegrenzung – wozu?

Ein Freund hat mit darauf aufmerksam gemacht, dass Limitierung der Leistung durch die neue Richtlinie der EU von Pedelecs auf 250 W der Branche eher mehr Nachteile bringt als Vorteile. Würde die Leistung bei anderen Kraftfahrzeugen in ähnlicher Art und Weise begrenzt werden, dann gebe es keine Autos mehr.

Nun, diesem Vergleich will ich nachgehen. Dazu habe ich die Steigfähigkeit und die Ergebnisse des ExtraEnergy Tests 2002 als Vergleichsbasis herangezogen. Die vorgeschriebene Abschaltgeschwindigkeit bei Pedelecs von 25 km/h habe ich mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf österreichischen Autobahnen in Einklang gebracht. Für den Rollreibungskoeffizienten  $c_R$  (oder  $f_r$ ) kann der gleiche Mittelwert sowohl für Auto- wie für Fahrradreifen genommen werden. Die effektive Stirnfläche  $c_w A$  wurde für beide Fahrzeugklassen ebenfalls gleich angenommen, da heutige Autos zum Teil schon sehr windschlüpfzig sind und sich trotz der größeren Stirnfläche etwa die gleiche äquivalente Stirnfläche ergibt. Sowohl bei Fahrrädern als auch bei Autos wurde angenommen, dass in der Regel nur eine Person mit etwa 75 kg Gewicht das Fahrzeug steuert. Im Normalfall ergibt sich also ein Gesamtgewicht von 105 kg für Pedelecs (Mittelwert des ExtraEnergy-Tests 2002). Da kaum noch Autos unter einer Tonne Gewicht zu bekommen sind, wurde hier für die Gesamtmasse 1155 kg, also 1080 kg Eigengewicht und 75 kg Fahrergewicht angenommen.

Im nächsten Schritt wird angenommen, dass bei Pedelecs bei der Abschaltgeschwindigkeit von 25 km/h die maximal zur Verfügung stehenden 250 W auf die Strasse gebracht werden. Nun lässt sich die maximale Steigfähigkeit berechnen, die mit dieser geringen Leistung erzielt werden kann. Gemäß der unter Punkt „Kosten“ im Kapitel 2 angeführten Formel ergeben sich 1,1%. Ein obig beschriebenes Auto würde zur Bewältigung einer gleich großen Steigung 22700 W an Leistung benötigen. Das sind 22,7 kW oder etwa 30 Ps.

Um den Einwand, dass es sich beim Fahrrad nur um einen Hilfsmotor handelt, während es im Falle des Autos der Hauptantrieb ist, zu entkräften, wurde angenommen, dass ein Gesundheitssportler, der etwa jeden zweiten Tag eine Stunde Ausdauersport betreibt, zumindest für kurze Zeit 250 W leisten kann. Addiert man nun diese Leistung zur maximalen Motorleistung, und setzt das Ergebnis von 500 W in die selbe Formel ein, so könnte eine Steigung von etwa 4,6% gerade noch mit voller Geschwindigkeit befahren werden. Für die selbe Steigung wären nun im Falle des Vergleichsfahrzeuges 37 kW oder etwa 49 Ps notwendig. Nun versuche jemand, ein derart strenges Leistungslimit wie es für Pedelecs gilt für Autos einzuführen – wer würde dann noch Auto fahren wollen? Wahrscheinlich würde dann jeder mit viel umweltfreundlicheren und gesünderem Elektrofahrrad fahren!

Okay, zugegeben, mit dem 100 kW starkem Vorführwagen vom Händler um die Ecke macht das Autofahren noch einmal so viel Spaß. Versuchen wir nur in umgekehrter Reihenfolge die „äquivalente“ Motorleistung für ein Fahrrad zu bestimmen, käme man auf 1610 bis 1760 W je nachdem, von welchem Beladungszustand des Fahrrades ausgegangen wird.

Warum wird eigentlich die Leistung eines Pedelecs begrenzt? Beim bergauf Fahren stellte eine höhere Geschwindigkeit kein Problem dar, weil man ohnehin viel schneller zum Stillstand kommt. In der Ebene fährt fast jeder Fahrradfahrer so schnell oder schneller und bergab, wo der Bremsweg am längsten wird und wo es somit am gefährlichsten ist, macht

eine Beschränkung der Motorleistung keinen Sinn, da auch ohne Hilfsantrieb stattliche Geschwindigkeiten erreicht werden. Und beim Beschleunigen liegt es im Interesse jedes Elektrofahrradherstellers, das Beschleunigungsmoment so stark einzuregeln, dass das Vorderrad immer auf dem Boden bleibt. Während diese Forderung bei Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen nur äußerst schwer regelbar ist, stellte das für einen Elektroniker nicht das geringste Problem dar. Drehmomentregelungen für Elektromotoren gibt es schon genügend am Markt.

Wozu dient nun die Leistungsbegrenzung von Elektrofahrrädern? Wird sie nicht fallen, so werden Pedelecs nie über den Status schwachbrüstiger, sinnlos untermotorisierter Fahrzeuge für gebrechlichere Personen hinauskommen. Schade.

	<b>Pedelec</b>	<b>Auto</b>
$v_{\max}$ [km/h]	25	130
$c_R$	0,01	0,01
$c_w A$ [m <sup>2</sup> ]	0,5	0,5
$m_{\text{ges}}$ [kg]	105	1.155
$P_{\max}$ [W]	250	22.700
Steigung	1,1%	1,1%
$P_{\max}$ [W]	500	37.000
Steigung	4,6%	4,6%
$P_{\max}$ [W]	1.610	100.000
Steigung	20,4%	20,4%
$m_{\text{ges}}$ [kg]	150	1.500
$P_{\max}$ [W]	250	22.100
Steigung	0,5%	0,5%
$P_{\max}$ [W]	500	34.800
Steigung	2,9%	2,9%
$P_{\max}$ [W]	1.760	100.000
Steigung	15,4%	15,4%

\* ... max. Motorleistung Pedelec

\*\* ... max. Leistung von Motor und Mensch

\*\*\* ... Auto mit 100 kW Antriebsleistung

*Tabelle 2.1: Leistungsvergleich Pedelec – Auto bei gleicher Steigfähigkeit (Verluste nicht berücksichtigt)*

## 2.2 Haben Solarfahrräder Zukunft?

Durchaus, wenn sie richtig konzipiert sind. Dazu muss das Anforderungsprofil der Nutzer und die Umgebung dieser sehr genau studiert werden. Betrachten wir der Einfachheit halber einen durchschnittlichen Bürger in städtischem Umfeld. 10 bis 30 km in urbaner Umgebung, also etwa ein bis zwei Stunde Radfahren pro Tag soll als Ausgangsbasis dienen. Mehr Zeit wird kaum jemand täglich im Sattel verbringen – ideale Bedingungen für ein Solarfahrrad und zumindest theoretisch leicht realisierbar.

### 2.2.1 Mobilität

Mobilität ist Beweglichkeit von Individuen oder Gruppen innerhalb der Gesellschaft. Sie sinkt mit zunehmenden Alter. Die wirksamste und billigste Gegenmaßnahme ist immer noch Sport, auch wenn es schon unzählige technische Hilfsmittel gibt. Je schwächer und zerbrechlicher jemand wird, desto weniger ist er fähig, mit dem Auto zu fahren. Früher oder später wird es unmöglich, mit dem Rad auch noch so kleine Steigungen zu überwinden oder gar das Gleichgewicht zu halten. Wenn dann auch die Beine zu schwach werden, um längere Strecken zu Fuß zurückzulegen, und auf elektromotorisch betriebene Minifahrzeuge und Rollstühle umgestiegen wird, werden auch die öffentlichen Verkehrsmittel praktisch unbenutzbar und der Aktionsradius sinkt auf wenige Kilometer Reichweite. Dann vermittelt nur mehr das Internet eine gewisse Mobilität. Bis es soweit kommt kann man noch lange mit dem Solarfahrrad fahren. Das macht fit und zögert so das Immobilitätsproblem hinaus!

Aber nicht nur ältere Menschen haben das Problem, aus eigener Kraft nur sehr langsam vorwärts zu kommen. Auch junge Leute wollen gerne schnell von einem Ort zum anderen, am besten direkt vor die Haustür und mit zusätzlichem Ballast. Wenn man sich nicht ein teures Auto leisten will oder wenn kaum Parkplätze frei sind, wenn die Wege kurz sind oder kein öffentliches Verkehrsmittel vorbei fährt, dann bleibt nur mehr das während der Pubertät so geschätzte, lärmende und stinkende Mofa, bei dem ein lästiger, Frisuren zerstörender Helm vorgeschrieben ist. Oder man nimmt das Fahrrad, bei dem in glühender Sommerhitze jeder Anstieg zur Qual wird oder ein normales Elektrofahrrad, das ständig aufgeladen werden muss. Die beste Alternative stellt das in dieser Arbeit behandelte, aber noch nirgends erhältliche Solarfahrrad dar!

Das Solarfahrrad hat ein Dach, das vor der direkten Sonneneinstrahlung und vor dem ärgsten Regen schützt. Es hat eine Ladefläche, die auch den problemlosen Transport von Mineralwasser- oder Bierkisten ermöglicht. Es hat einen starken, fein dosierbaren Motor, der jede Person, egal ob jung und kräftig oder schon etwas schwach und gebrechlich, beim Bergfahren mit oder ohne Last unterstützt, es wird kein Helm benötigt und hat einen breiten,

angenehmen Sitz, es darf auf Radwegen gefahren werden und es ist immer betriebsbereit, denn sobald die Sonne scheint, wird der Akku geladen.

Die Einschätzung der Reichweite der verschiedenen Fortbewegungsarten ist sehr schwierig. Von der Tatsache ausgehend, dass jeder Tag nur 24 Stunden hat und die Durchschnittsbevölkerung 1/3 des Tages schläft und 1/3 des Tages in der Arbeit ist, bleiben nur mehr 8 Stunden für den Weg von und zur Arbeit, zur Nahrungsaufnahme, zum Einkaufen, zum Fernsehen und Zeitung Lesen, und für Familie, Sport und Kultur. Die Zeit ist also relativ knapp bemessen. Je mehr Zeit zur Fortbewegung benötigt wird, desto komfortabler muss das Verkehrsmittel sein und umso weniger körperliche Anstrengung darf es kosten. Nur bei wirklich kurzen Strecken ist die Bereitschaft, zu Fuß zu gehen, gegeben. Durch geschickte Kombination von Arbeitsweg und Fitnessstraining (das Solarfahrrad als Fahrradergometer) lässt sich zusätzliche Freizeit gewinnen!

	<b>Zeit</b> Minuten	<b>Umkreis</b> km	<b>Bewegte Masse</b> kg	<b>Energieverbrauch</b> kWh/100km
zu Fuß	15	1	75	1,25
Rollerskates, Tretroller*	15	2,5	78	0,9
Fahrrad*	20	5	90	0,6
Solarfahrrad*	30	8	140	1,5
Mofa, Moped*	20	15	160	35
Bus, Straßen- od. U-Bahn	30	10	?	?
Auto, Motorrad**	30	15	1250	80
Eisenbahn	60	75	?	?

\* ... Individualverkehrsmittel ermöglichen den Weg von Tür zu Tür (Parken ist fast überall möglich)

\*\* ... Individualverkehrsmittel bei dem an beiden Enden des Weges ein Parkplatz vorhanden sein muss..

*Tabelle 2.2: Geschätzte Reichweite verschiedener Fortbewegungsarten im städtischen Bereich.*

### 2.2.2 Energieverbrauch

Vergleich der europäischen Verbrauchsangaben „Liter je 100 Kilometer“ (l/100km) mit den amerikanischen "Gallons per Mile" (gpm)

Um sich einen Überblick über den Energieverbrauch von Pkws machen zu können, ist es wichtig, eine international gültige Vergleichszahl zu haben. Leider gibt es hier keine einheitlichen Angaben. Die Europäer denken verbrauchsbezogen, die Amerikaner reichweitenbezogen.

Die hierzulande üblichen Verbrauchsangaben in Liter Treibstoff je 100 Kilometer bevorzugt Wenigverbraucher unter den Fahrzeugen. Eine bemerkenswerte Änderung des Verbrauches ist nur mit größten Anstrengungen erreichbar. So bewirkt eine Verbesserung um 20% eine Verminderung des Verbrauches von 7 l/100km auf 5,6 l/100km um 1,4 l/100km, also um relativ wenig. Eine sensationelle Verbesserung um 40% ergibt erst 4,2 l/100km. Je besser die Fahrzeuge werden, desto enger wird die Skala.

Amerikaner denken anders. Sie fragen nicht nach dem Verbrauch sondern nach der Reichweite, die sie mit einer bestimmten Kraftstoffmenge fahren können. Unser 7 Literauto würde 34 Miles per Gallon weit kommen. Eine Reichweitenverbesserung um 20% bewirkt eine Anhebung der Vergleichszahl um ganze 6 Zähler auf 40 mpg (oder 5,8 l/100km), eine Verbesserung um 40% lässt die Reichweite auf 47 mpg (oder 5,0 l/100km) wachsen. Um auf die Werte des 4,2 Literautos von vorher zu kommen, müsste die Reichweite um 67% auf 56 mpg erhöht werden.

Je besser die Fahrzeuge werden, desto weiter wird die Skala des amerikanischen Systems, so das ein Autohersteller mit einer minimalen Verbesserung des Fahrzeuges eine werbewirksame wengleich wenig sagende Steigerung der Vergleichszahl bewirken können. Mit dem 3 Literauto käme man 78 Meilen je Gallone (+133%), mit einem 1-Liter-Auto 235 mpg (+600%) und mit einem Solarfahrrad, das den gesamten Energiebedarf durch die Solarzellen decken kann, unendlich weit ("0 Literfahrzeug").

Auf der Jungfernfahrt des 290 kg schweren, zweisitzigen 1-Liter-Forschungsauto von VW, als Ferdinand Piëch zusammen mit seinem Nachfolger Bernd Pischetsrieder von Wolfsburg nach Hamburg gefahren ist, lag der Verbrauch trotz einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 76 km/h nur bei 0,89 Liter Diesel auf 100 km [2.4]. Das entspricht 264 mpg.

Oberer Heizwert von Diesel: 138.700 Btu/gal = 10.738 Wh/Liter [2.5]

1 Btu (british thermal unit, ISO/TC12) = 0,29307 Wh [2.6]

1 gal (gallon, liquid, U.S.) = 3,7856 Liter [2.6]

Der oberen Heizwert von Diesel multipliziert mit dem Verbrauch des 1-Liter-Forschungsauto von VW ergibt einen Energieverbrauch von 9,6kWh/100km. Um nun den mittleren Wirkungsgrad des Fahrzeuges zu berechnen, müssen einige Werte grob abgeschätzt werden:

Masse des Fahrzeuges samt Insassen und Ladung  $m = 450$  kg

Durchschnittliches Gefälle zwischen Wolfsburg und Hamburg (-Stg) = 0,04%

Rollwiderstandsbeiwert der 4 Reifen  $f_r = 0,002$

Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsbeiwert  $c_r = 0,015$

Luftwiderstandsbeiwert  $c_w = 0,25$  (Wert des strömungstechnisch ungünstiger geformten Greenpeace-Forschungsauto SmILE [2.7])

Stirnfläche  $A = 1,1 \text{ m}^2$  (etwa 1m hoch und 1,3m breit mit birnenförmigem Querschnitt)

Dichte der Luft  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$

Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ kg m/s}^2$

Damit ergibt sich ein theoretischer Leistungsbedarf bei einer Geschwindigkeit von 76 km/h von 1726 W gemäß Gleichung [1] und ein Energieverbrauch (=Leistung/Geschwindigkeit) von 2,3 kWh/100km und somit ein Gesamtwirkungsgrad von  $2,3/9,6 = 24\%$ . Ich gehen natürlich davon aus, dass der Akku für den Starter und die Bordelektronik am Ende der Fahrt nicht leer sondern während der Fahrt wieder aufgeladen wurde.

Das Twike braucht am Netz im Alltagsverkehr sieben bis zehn, also im Mittel etwa 8,5 kWh/100km. Bei einem Ladewirkungsgrad von 65% wären das 5,5 kWh/100km. [2.8]

1 gallon = 3,7856 Liter [2.6]

1 mile = 1,6093 Kilometer [2.6]

$$1 \text{ mpg} = 0,42511 \text{ km/l} \quad \{2.1\}$$

oder einfacher:

$$\frac{235,23}{\langle \text{mpg} \rangle} = \langle \text{Verbrauch} \rangle \text{ l/100km} \quad \{2.2\}$$

Ein Verbrauch von 50 mpg entspricht also  $\sim 4,7 \text{ l/100km}$  ( $=235,23/50$ )

### 2.2.3 Kosten

Es ist schwierig, mit den Kosten zu argumentieren. Jedes echte Solarfahrrad ist ein Prototyp und von dem her unbezahlbar. Da es die wichtigsten Komponenten bereits gibt, kann ein relativ einfacher Preisvergleich gemacht werden. Meine Schätzung beläuft sich auf etwa 4.000 €. Für ein gut konstruiertes Solarfahrrad fallen keine Wartungskosten an. Dennoch möchte ich einen Jahresservice zu 50 € vorschlagen. Es ist durchaus sinnvoll, wenn dieses Service in den ersten drei Jahren vom Hersteller gratis durchgeführt wird, weil dieser dadurch wertvolle Daten für Produktverbesserungen gewinnen kann und eine gewisse Bindung der Kunden an die Marke erreicht.

Nun geht es darum, eine geeignete Teststrecke zu finden und mit anderen Verkehrsmitteln zu vergleichen. Die Entfernungen wurden, so weit wie möglich, mit einem kalibrierten

Fahrradtachometer gemessen. In einzelnen Fällen wurden die Werte aus dem Internet von [www.routenplaner.at](http://www.routenplaner.at) übernommen.

Als Student bin ich öfters mit dem Rad von Bruck an der Mur nach Leoben und retour gefahren. Am Waldrand entlang auf der alten Strasse über Oberdorf, St. Dinoysen, Mötschach, Köllach und Proleb sind es ziemlich genau 18 km. Dort ist das Verkehrsaufkommen sehr gering und die Geschwindigkeit oft auf 30 km/h beschränkt, so dass entspanntes Radfahren möglich ist. Je nach Gepäck und Tagesverfassung benötigte ich für die Strecke zwischen einer dreiviertel und einer ganzen Stunde. Der amtliche Kilometersatz, der vor dem Finanzamt als Werbungskosten geltend gemacht werden kann, liegt bei 0,233 € für die ersten 5 km, für die restlichen bei 0,465 €/km und ergibt 7,21 €.

Mit dem Auto benötigt man für die 16,5 km über die Autobahn etwa 20 Minuten. Durch die große Anzahl von Ampeln in Leoben und der stark schwankenden Verkehrsdichte kann dieser Wert stark variieren. Nach 8 Uhr morgens ist es schwierig, einen Parkplatz zu finden. Aus eigener Erfahrung kann ich sagen, dass man meist einen weiteren Kilometer zurücklegt, bis man fündig geworden ist. Gerundet ergeben ist also eine schwache halbe Stunde und 18 km. Unter Verwendung des amtlichen Kilometersatzes von 0,356 €/km kommt man auf 6,41 € für eine Strecke.

Mit dem Autobus benötigt man für die Strecke Bruck an der Mur nach Leoben um die 25 bis 28 Minuten. Unter Berücksichtigung der Gehstrecke zur Haltestelle und von der Zielhaltestelle zur Uni inklusive der etwa 2 Minuten Wartezeit benötige ich im Schnitt eine knappe ¾ Stunde. Die Kosten betragen 3,20 €, wie ich unter Tel. 0316 820606 erfahren habe, und sind nur halb so hoch wie mit dem eigenen Pkw.

Bei der Bahn werden für diese Strecke 16 Tarifkilometer verrechnet. Geht man zu Fuß im Schnitt 5 km/h, so werden für den Fußweg insgesamt 15 Minuten benötigt. Zusammen mit 2 Minuten Wartezeit ergibt das 35 Minuten. Würde man mit dem Rad zum Brucker Bahnhof fahren, wäre man um 9 Minuten schneller. Der Standardtarif für eine Einzelfahrt in der 2. Wagenklasse beläuft sich auf 2,90 € ([www.oebb.at](http://www.oebb.at)).

Für Pendler ist die Monatskarte des Verkehrsverbundes Bruck an der Mur – Leoben besonders interessant, da diese nur 37,40 € kostet und in den beiden Zonen beliebig oft gefahren werden darf! Dabei ist es egal, ob mit Bus oder Bahn gefahren wird.

In den Monaten April bis September beträgt die mittlere Summe der Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche für Bruck an der Mur und Leoben im Schnitt 783 kWh/m<sup>2</sup> [2.9].

ORT	HÖHE	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	Saison
Bruck an der Mur	480 m	113.4	139.3	149.5	155.6	130.0	93.3	781.1
Leoben	524 m	116.7	142.7	151.3	155.6	126.6	92.1	785.0
Mittelwert		115.1	141.0	150.4	155.6	128.3	92.7	783.1

*Tabelle 2.3: Mittlere Globalstrahlung auf horizontale Fläche*

Im nächsten Schritt werden die Verluste bzw. Wirkungsgrade der Energieumwandlungskette von Einstrahlung bis zum bewegen des Fahrrades in einer ersten Näherung abgeschätzt. Die Verschmutzung ist meist ein Faktor, der oft vergessen wird aber durchaus einige Prozentpunkte betragen kann. Bei häufiger Reinigung schätze ich den Verlust auf zumindest 1%. Das Testmodul von Kyocera hat eine Nennleistung von 120 W bei einer Modulfläche von 0,9291 m<sup>2</sup>. Die Nennleistung wird bei der genormten Einstrahlleistung von 1000 W/m<sup>2</sup> bei 25 °C ermittelt und ermöglicht so eine Berechnung des Modulwirkungsgrades, der hier bei 12,9% liegt. Von den 783 kWh bleiben gerade 100 kWh nach Umwandlung der von der Sonne eingestrahlt Energie in elektrische Energie übrig.

Der schwierigste Punkt ist die Abschätzung der effektiv in den Akkumulatoren gespeicherten Energie. Das hängt vor allem vom verwendeten Laderegler, dem Akkutyp und dem Ladezustand der Akkus ab. Obwohl beim Fahren an sonnigen Tagen eine Zwischenspeicherung der Energie in den Akkus wegfällt und direkt in Bewegungsenergie umgewandelt wird, gehe ich von einem Ladewirkungsgrad von 50% aus. Beim Entladen der Akkus entstehen wiederum Verluste, die zusammen mit den Verlusten der Elektronik und des Motors auf 70% geschätzt werden. Bei dieser vorsichtigen Schätzung können von den 783 kWh eingestrahlt Energie gerade 35 kWh in Bewegungsenergie umgewandelt werden.

Aus den von Alexander Curtis gemachten Versuchen ist bekannt, dass zur Erzielung einer Geschwindigkeit von 23 km/h bei 100 kg Gesamtgewicht (Fahrrad und Fahrer) 125 Watt nötig sind [2.10]. Ein echtes Solarfahrrad ist zwar schwerer und hat eine strömungstechnisch ungünstigere Geometrie. Aus diesem Grund werden sicherheitshalber Luftwiderstand und Stirnfläche jeweils um 20% erhöht. Somit ergibt sich bei den in Österreich gesetzlich erlaubten 20 km/h trotz 50% höherem Gesamtgewicht ein Leistungsbedarf von 140 W. Werden nun wie es zum Beispiel bei Pedelecs üblich ist, nur 50% der Leistung durch den Hilfsantrieb zur Verfügung gestellt, dann könnte man in der Fahrradsaison von April bis September 10.000 km fahren! Bei einem amtlichen Kilometergeld von 0,356 €/km würde man sich im Vergleich zum Auto 3560 € ersparen – fast so viel, wie ein neues Solarfahrrad kosten würde!

In der Diplomarbeit von Herrn Curtis wurde eine einfache Leistungsbestimmung durchgeführt, die hier nachgerechnet werden soll. Bei der Messung fährt eine 85 kg schwere Person einen Hang mit einem Gefälle von konstant 2.0% hinunter. Die Verlustleistung durch

den Rollwiderstand (Term 1), der bei stehendem Fahrzeug verständlicherweise verschwindet, steigt konstant mit der Geschwindigkeit – genau wie Hangabtriebsleistung (Term 3). Nur die Verlustleistung durch den Luftwiderstand steigt mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit, so dass das Fahrzeug nur bis zu einer gewissen Geschwindigkeit beschleunigt. Wie in der Tabelle ersichtlich geht der Leistungsüberschuss (negativ Werte in der Spalte „Leistung“) bei etwa 23 km/h gegen null. Um unter den gleichen Bedingungen 25 km/h zu erreichen, müssten zusätzlich 12,4 Watt aufgebracht werden.

$$P = f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\arctan(Stg)) \cdot v + c_w \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} + m \cdot g \cdot \sin(\arctan(Stg)) \cdot v \quad \{2.3\}$$

		A. Curtis	Solarfahrrad (1. Abschätzung)
Masse Rad	$m_R$	15 kg	65 kg
Masse Mensch	$m_M$	85 kg	75 kg
Masse Zuladung	$m_Z$	0 kg	10 kg
Masse gesamt	$m$	100 kg	150 kg
Erdbeschleunigung	$g$	9.81 m/s <sup>2</sup>	9.81 m/s <sup>2</sup>
Steigung	$y/x$	-2.0%	0%
Rollwiderstandsbeiwert*	$f_r$	0.0094	0.0094
Luftwiderstandsbeiwert**	$c_w$	0.7	0.84
Stirnfläche	$A$	0.605 m <sup>2</sup>	0.72 m <sup>2</sup>
	$c_w \cdot A$	0.4235	0.6048
Dichte der Luft	$\rho$	1.2 kg/m <sup>3</sup>	1.2 kg/m <sup>3</sup>

\* ... Durchschnitt aller getesteten Fahrradreifen mit unter 45 PSI (310 kPa) Luftdruck, John Lafford, Tyre Rolling Resistance Data, <http://legslarry.crosswinds.net/index.html>, 2002

\*\* ... 0,6 bis 0,7 für Motorräder, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Bosch, 23. Aufl., 1999

Tabelle 2.4: Daten des Curtis-Rades und eines Solarfahrrades (teilweise geschätzt)

Geschwindigkeit v		Term 1	Term 2	Term 3	Leistung	Energiebedarf		
Km/h	m/s	W	W	W	W	Ws/m	Wh/km	kWh/100km
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.00
4	1.1	10.2	0.3	-21.8	-11.2	-10	-2.8	-0.28
8	2.2	20.5	2.8	-43.5	-20.3	-9	-2.5	-0.25
12	3.3	30.7	9.3	-65.3	-25.2	-8	-2.1	-0.21
16	4.4	41.0	22.1	-87.1	-24.0	-5	-1.5	-0.15
20	5.6	51.2	43.2	-108.8	-14.4	-3	-0.7	-0.07
<b>23</b>	6.4	58.9	65.7	<b>-125.2</b>	<b>-0.5</b>	0	0.0	0.00
25	6.9	64.0	84.4	-136.0	12.4	2	0.5	0.05

Tabelle 2.5: Nachrechnung der von Alexander Curtis gemessenen Werte [2.10].

Geschwindigkeit v		Term 1	Term 2	Term 3	Leistung	Energiebedarf		
km/h	m/s	W	W	W	W	Ws/m	Wh/km	kWh/100km
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.00
4	1.1	15.4	0.5	0.0	15.9	14	4.0	0.40
8	2.2	30.7	4.0	0.0	34.7	16	4.3	0.43
12	3.3	46.1	13.4	0.0	59.5	18	5.0	0.50
16	4.4	61.5	31.9	0.0	93.3	21	5.8	0.58
<b>20</b>	5.6	76.8	62.2	0.0	<b>139.1</b>	25	7.0	0.70
23	6.4	88.4	94.6	0.0	183.0	29	8.0	0.80
25	6.9	96.1	121.5	0.0	217.6	31	8.7	0.87

*Tabelle 2.6: Erste Abschätzung des Leistungsbedarfes eines echten Solarfahrrades: Hochrechnung des Leistungsbedarfes bei 20% höherem Luftwiderstand, 20% größerer Stirnfläche und 50% höherem Betriebsgewicht basierend auf den Daten von Alexander Curtis.*

Würde jemand 26 Wochen 4 mal die Woche 18 km mit diesem Solarfahrrad in die Arbeit und wieder heim fahren, dann würde er 3744 km zurücklegen. Im Vergleich zum Auto würde er sich jährlich 1333 € sparen so dass sich das Rad nach 3 Jahren amortisiert hätte. Je nach tatsächlicher Geschwindigkeit wurde der Radler 6 bis 8 Stunden Ausdauertraining pro Woche absolvieren. Für einen Auto fahrenden kämen noch zusätzliche Kosten dazu, wenn dieser versuchen würde, das Trainingsmanko mehrmals wöchentlich im Fitnessstudio aufzuholen.

Antriebsleistung	70	W
Geschwindigkeit	20	km/h
Verbrauch	3.5	Wh/km
Verbrauch	0,35	kWh/100km
bereitstellbare Bewegungsenergie	35.001	Wh/Saison
maximal mögliche Kilometerleistung	10.000	km/Saison
Dauer der Saison (Sommerhalbjahr)	26	w/Saison
Benutzungshäufigkeit	4	d/w
Benutzungshäufigkeit	104	d/Saison
Theoretisch mögl.		
Tageskilometerleistung	96,16	km/d
einfache Strecke	18	km/Strecke
Fahrten pro Tag	2	Strecken/d
insgesamt gefahrene Strecke	3.744	km/Saison
amtliches Kilometergeld für Auto	0,356	€/km
Ersparnis je Saison	1.333	€/Saison
geschätzter Gestehungspreis inkl. Service	4.000	€
Amortisation bei einer Saison pro Jahr	3,0	a
Amtliches Kilometergeld Auto	6,41	€/Strecke
Amtliches Kilometergeld Fahrrad	7,21	€/Strecke

Tabelle 2.7: 1. Abschätzung des Amortisationszeitraumes für ein echtes Solarfahrrad

#### 2.2.4 Individualverkehrsmittel

Individualverkehrsmittel sind im wesentlichen Fahrzeuge, die einzelne Personen vom Ausgangsort zum Zielort bringen, unabhängig von Zeitpunkt und Ort. Typische Beispiele sind Auto, Motorrad oder Fahrrad. Das Individuum kann spontan den Zielort, die Richtung oder die Fahrweise ändern, natürlich mit Rücksicht auf die anderen Verkehrsteilnehmer, was das Freiheits- und Selbstwertgefühl immens steigert. Individualverkehrsmittel, zu denen auch Leihwägen oder Leihräder gehören, befindet sich in der Regel in privater Hand und stellen nicht zu selten ein Statussymbol dar und sind viel zu oft Imagebildend. Das ist für viele Grund genug, für Neuwägen über 30'000 € und für extravagante Mountainbikes 3'000 € auszugeben.

Die modernen Rollerskates oder die alt ehrwürdigen Rollschuhe werden noch eher als Freizeitgeräte zur Sportausübung angesehen. Dabei könnten besonders Skates mit abnehmbaren Rollen, wie ich sie seit 3 Jahren teste (inklusive Handgelenkschützer wiegen sie 3,6 kg), sehr sinnvoll im ebenen Gelände auf hartem und nicht zu rauen Flächen eingesetzt werden. Es können auch sperrige Sachen gut transportiert werden, die auf einem normalen Fahrrad am Gepäckträger keinen Platz finden. Guter Gleichgewichtssinn ist Voraussetzung. Ein großer Nachteil ist, dass sie nicht sehr bequem sind und dass man im Sommer in den globigen Stiefeln leicht schwitzt. Vorteil ist, dass man sie immer bei sich trägt, dass man

direkt zur Haustür fahren kann und wenn man bei der Hintertür rausgeht, nicht erst zum Parkplatz laufen muss.

Scooter oder Tretroller (Kickboards) mit oder ohne elektrischem Antrieb passen gut in die Kategorie der Rollerskates. Bei schlechten Straßen ist man wegen der meist sehr kleinen Räder wie mit den Skates schlecht beraten. Nachteilig ist, dass zumindest eine Hand immer am Steuerhebel oder Lenker sein muss und dass weniger gut Taschen oder Koffer mitgenommen werden können. Dafür kann man im Vergleich zu Skates normale, bequeme Schuhe tragen. Electric Scooter dürfen in der EU nur mit Typengenehmigung oder Einzelzulassung gefahren werden. Je nach nationalen Vorschriften darf bis 20 oder 25 km/h ohne Helm gefahren werden. E-Scooter gelten als reine Elektrofahrzeuge und benötigen ein Versicherungskennzeichen. In Deutschland werden E-Scooter ohne Sitz nicht zugelassen. Auf längeren Strecken wird das Stehen ohnehin anstrengend.

Das Fahrrad ist sowohl als Sport- als auch als Alltagsfahrzeug geeignet. Abstellplätze sind in der Regel leicht zu finden und die Akzeptanz ist im Vergleich zu den Rollerskates sehr hoch. Dennoch setzt es sich nicht so richtig durch, da es eine gewisse Fitness für schnelles Vorankommen voraussetzt. Sind Steigungen zu bewältigen, kommt man leicht ins Schwitzen bzw. wird zum Absteigen gezwungen. Müssen öfters sperrige, schwere Gegenstände transportiert werden, hat man mit dem Zweirad und dem üblicherweise kleinen Gepäckträger seine liebe Not. Dafür ist fast vor jeder Haustür einen Abstellplatz zu finden. Ältere oder gebrechlichere Menschen scheuen Zweiräder oft wegen der Gefahr des Umfallens beim Aufsitzen oder Stehen bleiben. Das Fahrrad ist bislang das energieökonomischste Fortbewegungshilfsmittel und schlägt sogar das zu Fuß gehen bei weitem. Alltagsfahrräder haben heute ein Gewicht von etwa 13 bis 16 kg und sind mit beinahe zu vielen Gängen ausgestattet. Bei Fahrrädern für ältere Leute wird die Ganganzahl der einfacheren Bedienbarkeit stark reduziert. Dreiräder sind kaum üblich.

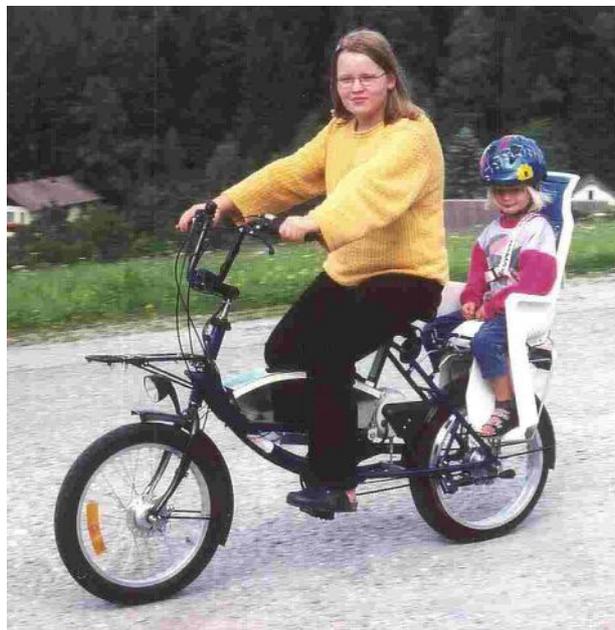
Beim Elektrofahrrad geht die Bandbreite vom sportiven schweizer Flyer-Bike im Mountainbike Look und Full Suspension über das hoch effiziente, österreichische AC-Powerbike bis zum gemütlichen, deutschen Flyer-Bike mit drei Rädern. Das schweizer Flyer-Bike ist ein absoluter Knüller für junge, modische Leute und besonders in Städten als Alltagsfahrzeug schneller und besser geeignet als ein Mofa. Das AC-Powerbike ist wegen des starken, effizienten Motors und der feinfühligsten Steuerung ein Geheimtipp für Mütter und selbst in unebenem Gelände für behäbige Leute bestens geeignet. Das deutsche Flyer-Bike verbindet wegen des dreirädrigen Aufbaus mit dem großen Lastenkorb, dem niedrigen Schwerpunkt und dem langen Radstand Einkaufstauglichkeit mit Chopperfeeling bei gleichzeitig hoher Sicherheit.

Durch die geringe Höchstgeschwindigkeit von 20 km/h, die im reinen Motorbetrieb erreicht wird, steigt die Sicherheit enorm, ohne dass die Durchschnittsgeschwindigkeit im innerstädtischen Bereich wesentlich sinkt. Im Stop and Go Verkehr einer Stadt ist selbst der Vorteil der höheren Spitzengeschwindigkeit eines Mofas nicht viel größer als bei

Elektrofahrrädern und durch den Komfortgewinn, ohne Helm fahren zu können, mehr als wettgemacht. Durch die Motorunterstützung kommt es zu keiner Überanstrengung oder unnötigem Schwitzen. Nachteilig sind nur die langen Ladezeiten, auf dass nach keiner Ausfahrt verzichtet werden sollte und das Problem, dass bei leer gefahrenem Akku eine Ladegelegenheit gesucht oder mit dem wegen Akku und Motor schweren Elektrofahrrad heimgestrampelt werden muss.



*Bild 2.6: F10 (links) und ein anders Model (von oben) der schweizer Firma Flyer*



*Bild 2.7: AC-Powerbike von der österr. Firma Kasbauer mit starkem Asynchronmotor*



*Bild 2.8: Deutsches Flyer-Bike der Firma Velocab*

Solarfahrräder haben im Vergleich zu den reinen Elektrorädern den großen Vorteil, dass der Akku bei genügend Licht sofort wieder aufgeladen wird. Gegenüber anderen Leichtfahrzeugen unter 100 kg schützt das Dach vor Regen und der brennenden Sonne um die Mittagszeit. Durch mehrspurige Ausführung und größeren Akkus sind sie auch in punkto Sicherheit, Beladbarkeit und Reichweite normalen Elektrorädern selbst bei schlechtem Wetter überlegen. Dafür sind sie nicht geländegängig. Der höhere Preis macht eine elektronische Diebstahlsicherung z.B. via GSM, wie es beim Car Sharing eingesetzt wird, sinnvoll und damit „Verlustsicher“ und „Solar Cycle Sharing“-fähig – das wäre übrigens eine gute Alternative zum leider fehlgeschlagenen Leihradprojekt in Wien. Außer dem üblichen Service gibt es keine Betriebskosten, so dass Solarfahrräder über die gesamte Lebensdauer mehr als abzahlen. Es besteht keine Helmpflicht und es dürfen Radwege und Fußgeherzonen befahren werden. All diese Gründe machen ein überdachtes Solarfahrrad zum fast wetterunabhängigen Anschlussfahrzeug zu Car Sharing Standplätzen, Bahnhöfen oder sonstigen Orten. Der Einbau eines Autoradios oder einer Freisprecheinrichtung mit Akkuladeoption rundet die Sache ab.

Mofas und Mopeds sind im ländlichen Raum Elektro- oder Solarfahrräder überlegen, in den Städten, wo mit den Fahrrädern teilweise gegen Einbahnen und auf Bürgersteigen oder in Fußgängerzonen gefahren werden darf, eher gleichwertig. Es muss teures, stinkendes, wenig umweltfreundliches Benzin getankt werden. Die Betriebskosten sind wesentlich höher, die Anschaffungskosten etwa gleich denen eines Solarfahrrades. Mofas verursachen obendrein viel Lärm und Gestank, was leider den Passanten mehr stört als den Fahrenden.

Beim Autofahren sitzt man relativ bequem. Man kann Musik hören muss sich nicht körperlich anstrengen. Es ist nicht möglich, nebenbei zu arbeiten. Im dichten, schnellen Stadtverkehr oder bei der Parkplatzsuche kann die Fahrt vor allem für ältere, körperlich nicht mehr so fitte Leute erheblichen Stress verursachen. Es müssen stets einige Minuten Fußweg und ein paar Cent Parkgebühren einberechnet werden. Dafür können auch größere, schwerere Gegenstände

transportiert werden. Im Hochsommer wird die Autofahrt oft zur Qual, wenn die Sonne den Innenraum aufheizt. Klimaanlage, falls vorhanden, benötigen eine Anlaufzeit und sind auf kurzen Strecken überfordert. Selbst wenn nicht viel gefahren wird, kommen ohne Abschreibung der Anschaffungskosten gerne mal € 3.000,- Betriebskosten pro Jahr aufgrund von Versicherung, Steuern und Parkgebühren zusammen.

Das Motorrad ist mittlerweile mehr zum Kult- und Freizeitfahrzeug mit hohem Prestigewert geworden. Es ist ein Symbol für Freiheit und Individualität. Es ist die billigere aber bei kaltem und nassem Wetter schlechtere Alternative zum Auto. Mit dem schmalen Motorrad und dessen hoher Leistungsdichte darf auf Straßen überholen werden, wo es für Autos verboten ist. Auch in der Stadt, wo im dichten Verkehr gerne vorgehängelt wird, ist man mit dem Motorrad etwas schneller am Ziel. Dafür ist das Unfallrisiko und das Risiko, sich bei einem Unfall schwere Verletzungen zuzuziehen, ungleich höher. Dies liegt vor allem an der hohen Geschwindigkeit, dem Fehlen von Knautschzone und Überrollbügel und der ungleichen Massen von Motorrad und der anderen Verkehrsteilnehmer. Mein Motorradfahrlehrer erzählte in einer Fahrstunde, jedes Jahr ein Motorrad zu „verbrauchen“. Für den Alltagsverkehr erweist sich vor allem der Frisuren zerstörende Helm und der gut sitzende, enge Schutzanzug als hinderlich und in Stadtverkehr an sonnigen Tagen als schweißtreibend. Das Platzangebot ist ebenfalls stark begrenzt.

### 2.2.5 Öffentliche Verkehrsmittel

Bei Fahrten mit Bus, Straßenbahn oder U-Bahn sind viele kurze Wege zu Fuß zu bewältigen und während der eher ruckeligen Fahrt muss man stehen, falls kein Sitzplatz frei ist. Gepäck sollte nicht mehr mitgenommen werden, als man am Körper getragen werden kann. Vor allem in größeren Städten sind die Intervallzeiten relativ kurz und das Verbindungsnetz ist zumindest im Zentrum sehr dicht. Die Kosten fallen im Vergleich zu einem Privatauto ausgesprochen niedrig aus und betragen in Wien etwa € 380,- pro Jahr, in Graz etwa die Hälfte.

Während des Bahnfahrens kann gelesen und geschrieben und manchmal sogar getrunken und gegessen werden. Der größte Nachteil ist die geringe Verbindungsdichte und die langen Intervallzeiten. Meist muss auf ein anderes Verkehrsmittel umgestiegen werden, um zum Bahnhof bzw. Zielort zu kommen.

### 2.2.5 Alternativen

Wasserstoff ist der Energieträger, der am häufigsten als Alternative genannt wird. Dabei geht es gar nicht um Energietransfer, sondern um die effiziente Nutzung der täglich eingestrahlt Sonnenenergie, denn nur so ist ein Plus-Energie und Null-Emissionsfahrzeug möglich. Schließlich kann die Überschussenergie anderwärtig wie zum Beispiel zum Laden von Akkus für Taschenlampen, verwendet werden. Werden einmal die Vorteile eines überdachten Fahrrades erkannt, macht Wasserstoff keinen Sinn mehr. Die durchschnittliche Sonnenenergie würde für mehr als 90% der möglichen Anwendungsfälle reichen.

Der gravierende Nachteil der Brennstoffzellentechnik, welche in diesem Bereich eher ein Modewort als Konkurrent ist, ist jener, dass neben der noch lange nicht ausgereiften, neuen Technik nicht vorhandenen Verteilsysteme ins Leben gerufen werden müssen, die wie bei den Mehrwegflaschen mit einem intelligenten Einsammelsystem verbunden müssen. Ein leerer Wasserstofftank kann nicht so einfach wie ein Akku durch Solarzellen wiederbefüllt werden und die Anwender wären sehr ortsabhängig.



*Bild 2.9: Mit Wasserstoff betriebenes Brennstoffzellenmoped*

Selbst das Fahrzeugkonzept ist allen anderen Individualverkehrsmittel in punkto Wirtschaftlichkeit überlegen, so lange ihm zugestanden wird, keine höhere Geschwindigkeit als 20 km/h ermöglichen zu müssen, da mit dorthin der Luftwiderstand eher gering ausfällt. Das offene, mit einem Dach versehene Solarfahrrad ist allen anderen Konzepten in Sachen Leichtigkeit und Einfachheit überlegen und die Standard-Fahrradkomponenten ermöglichen einen unvergleichlich günstigen Preis.

### **2.3 Warum (nur) eine Diplomarbeit?**

So schön die Vorstellung ist, echte Solarfahrräder durch die heimischen Städte fahren zu sehen, so schwierig ist die Akzeptanz der Bevölkerung und das Kaufverhalten einzuschätzen. Ohne massive politische Unterstützung in Richtung (solar)fahrradfreundliche Städte und Vorbildwirkung wird es sehr schwer sein, echte Solarfahrräder am Markt zu etablieren. Vor allem von meinungsbildenden Institutionen wie dem ORF ist viel im Bereich Imageentwicklung zu tun. Leider übersteigt alleine das Suchen von Sponsoren und Partnern den Rahmen einer Diplomarbeit. Trotzdem habe ich es versucht und bin zum Teil auf äußerst positive Resonanz gestoßen, zum Teil war die Einstellung zu prinzipiellen, ökologischen Überlegungen haarsträubend. Gesucht habe ich ausschließlich Sponsoren im einschlägigen Bereich. Die Liste aller Sponsoren findet sich am Anfang der Diplomarbeit vor dem Inhaltsverzeichnis. Wie sich jeder leicht ausmalen kann, ist damit noch kein Solarfahrrad komplettiert. Es wäre schön, wenn sich ein weiterer Idealist finden würde, der hier anschließen möchte. Wird von allen beteiligten Seiten finanzieller Einsatz geboten, dann ist durchaus eine weitere wissenschaftlich-praktische Auseinandersetzung mit diesem Thema möglich.

## **2.4 Wie wird es weitergehen?**

Noch bewegt sich ein Solarfahrrad an den Grenzen der Technik. Durch präzise Abstimmung und Auswahl der Komponenten hätte auch „gestern“ schon ein marktfähiges, echtes Solarfahrrad entworfen werden können. Der Markt wäre vor fünf bis zehn Jahren sogar offener gewesen, hätte aber große Fehlgriffe in der Auslegung aus heutiger Sicht nicht überstanden. Läuft die internationale Entwicklung von flexiblen, leichten Solarzellen und Akkumulatoren in punkto Leistung und Preis so weiter, wäre bald ein überlegenes Konzept möglich. Mit einer effizient angelegten Werbekampagne könnte innerhalb kurzer Zeit ein neuer Markt geschaffen werden. Bis dorthin müssen zweifelsohne mehrere verschiedene, gut durchgetestete Prototypen existieren, die an bestimmten Bevölkerungsgruppen erprobt werden. Pläne wurden bereits kreiert, Akteure werden noch gesucht.

## 2.5 Quellen

- [2.1] Herbert Grundtner. *Das österreichische Kraftfahrzeuggesetz nach der 20. Novelle*. Neuauflage 1998. Wien: ARBÖ (1998)
- [2.2] Greenspeed (2001):  
<http://www.greenspeed.com.au>
- [2.3] BKA/RIS Bundesrecht – Abfragemaske (2002):  
<http://www.ris.bka.gv.at/bundesrecht/>
- [2.4] Gerhard Nöhner. *Als Sparefroh fuhr Piëch über die Ziellinie*. Kleine Zeitung Seite 33 16.4.2002
- [2.5] American Petroleum Institute (API). *Alcohols and Ethers*. Publication No. 4261. 2nd ed. Washington, DC (1988)
- [2.6] Qwik Convert32 Version 1.0 von GREENware (1995)
- [2.7] Greenpeace (1998):  
<http://www.greenpeace.org/~climate/smile/tech/index.html>
- [2.8] Twike Challenge 98: Bern – Nordkap (2000)  
<http://www.twikeklub.ch/challenge98/Energie.htm>
- [2.9] Stromaufwaerts. *Produktkatalog 1999*. Technischer Anhang: Globalstrahlung für Standorte in Österreich. Sateins (1998)
- [2.10] Curtis, A. *Entwicklung und Bau eines solarelektrischen Fahrradhilfsantriebs – Bewertung aus umwelttechnischer Sicht*. Diplomarbeit an den Instituten für Elektrotechnik sowie Entsorgungs- und Deponietechnik der Montanuniversität Leoben (2000)

### **3 Was bietet der Markt**

Nichts! Zumindest kein alltagstaugliches, echtes Solarfahrrad.

Im Laufe der Zeit konnte ich dann doch ein paar Prototypen finden, für die aber keine Ambitionen in Richtung Serien- oder Einzelfertigung bestehen. Ein paar Prototypen wurden bereits in Kapitel 2 erwähnt.

Um jedoch schnell und einfach ein Solarfahrrad aufbauen zu können, sollte man wissen, welche „unechten“ Solarfahrräder (oder einfache Elektrofahrräder) es am Markt gibt. Diese Recherche war die Grundlage zur Auswahl des Basisfahrzeuges für den ersten Prototyp.

### 3.1 Fahrrad mit elektrischem Hilfsmotor

Fahrrad mit elektrischem Hilfsmotor ist die verallgemeinernde Bezeichnung, die üblicherweise in der österreichischen Gesetzgebung Verwendung findet. Sie ist so unscharf definiert, dass sie sowohl E-Bikes (Elektrofahrräder mit Gasdrehgriff bis 20 km/h) als auch Pedelecs (Elektrofahrräder mit automatischer Leistungsregelung bis 25 km/h) einschließt. Aus diesem Grund wird es bis spätestens November 2003 zu einer Änderung kommen, um die um 5 km/h höhere Geschwindigkeit der schwächer motorisierten Pedelecs im nationalen Recht zu verankern. Ob es dabei auch zu einer Änderung der Definition von E-Bikes kommt, ist unsicher. Es kann nur gehofft werden, dass es im Zuge einer Änderung diese zugunsten der umweltfreundlichen Elektrofahrräder ausgelegt wird, damit die Hersteller den Kunden den gewünschten Komfort in Bezug auf Leistungsunterstützung bieten können.

Sinnvoll wäre es auf alle Fälle, das Geschwindigkeitslimit von 20 bzw. 25 km/h auf das in verkehrsberuhigten Zonen geltende Geschwindigkeitslimit von 30 km/h zu erhöhen. Damit ließen sich drei Fliegen auf einmal fangen. Erstens würde das ein aktiver Beitrag zu mehr Verkehrssicherheit sein, weil dann das gefährliche Überholen und Abdrängen von Fahrrädern auf engen Straßen oder bei Abbiegemanövern wegfallen würde. Zweitens würde durch die höhere Akzeptanz von gleich schnell fahrenden Verkehrsteilnehmern durch die Autofahrer polarisierenden Argumenten der Wind aus den Segeln genommen werden, wodurch die Beliebtheit von Radfahrern und somit vom Radfahren an sich gesteigert werden würde. Dies würde in weiterer Folge zu einer Reduktion der Verkehrsdichte auf den Straßen und zu einem flüssigeren Verkehr führen. Und drittens ergibt sich durch den vorhin beschriebenen Effekt, der zu weniger Autos mit kürzeren Betriebszeiten und mehr Fahrradfahrern führt, ein konkreter Schritt in Richtung Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Zu guter Letzt würde durch die vermehrte Betätigung der Bürger an der frischen Luft die Fitness und die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung steigen, die somit geringere Sozialausgaben verursachen.

Ein Fahrrad mit Hilfsmotor ist besonders in bergigen oder hügeligen Regionen dann am sinnvollsten, wenn die Motorunterstützung bis zu einer Geschwindigkeit von 30 km/h erlaubt ist und wenn es keine gesetzlich vorgeschriebenen Leistungsbegrenzung gibt bzw. wenn die Leistungsobergrenze für einsitzige Fahrräder auf beispielsweise 2 kW angehoben werden würde. Damit könne im verkehrsberuhigten, innerstädtischen Bereich „mitgeschwommen“ werden, wodurch das Argument: „Radfahrer seinen ein Verkehrshindernis“ entkräftet werden würde. Und weil gerade Österreich ein durchwegs hügeliges oder sogar bergiges Land ist, könnte so die Attraktivität von Fahrrädern in hügeligen Regionen enorm gesteigert werden.

## 3.2 Fahrradtests

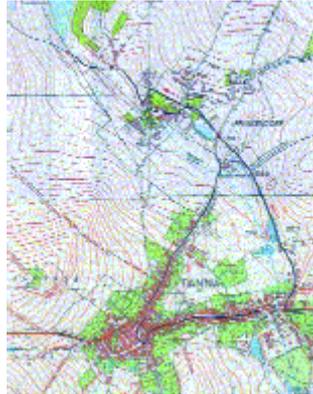
Tests von Elektrofahrrädern wurden schon viele gemacht. Leider sind die meisten Tests nicht reproduzierbar und schwer oder gar nicht mit anderen vergleichbar. Oft hängt das alleine von der Teststrecke, für die durch ihre Beschaffenheit das eine oder andere Fahrzeug besser oder schlechter geeignet ist. Viele Vergleiche basieren auf empirischen Erfahrungen von Händlern, die mit verschiedenen Elektrofahrrädern gefahren sind und die das eine oder andere Fahrzeug favorisieren. Für viele Konsumenten mag das aussagekräftig genug sein, um eine Kaufentscheidung treffen zu können, für eine technische Bewertung sind diese Tests denkbar ungeeignet.

### 3.2.1 Pedelecs und E-Bike Test 2002 von ExtraEnergy e.V. [3.1]

Der Verein, der sich am meisten für die Popularität von Fahrrädern, insbesondere von Pedelecs engagiert, ExtraEnergy e.V. aus Tanna, Thüringen, Deutschland, versucht den oben genannten Mängeln durch aufwendige Messtechnik entgegenzuwirken. ExtraEnergy unter Geschäftsführer Hannes Neupert finanziert sich als gemeinnütziger Verein über seine Dienstleistungen wie Ausstellungen, Promotion-Events und Tests. Einen Anteil tragen in der Regel die teilnehmenden Hersteller. 2002 wurde ein detaillierter Vergleichstest von E-Bikes und Pedelecs 12 verschiedener Hersteller in der Heimatregion des Vereins gemacht.

Beim „ExtraEnergy Bike-Test 2002“ fuhren fünf Testfahrer im Alter zwischen 23 und 66 Jahren 12 Pedelecs und 1 E-Bike über eine Teststrecke durch Tanna City und Country in Thüringen und legten mehr als 2290 km in zwei Monaten zurück.

Die Teststrecke in und um Tanna ist eine Route durch die Stadt und überland von insgesamt 7,8 km Länge. Der Rundkurs hat teilweise glatte und raue Straßenbeläge, größtenteils flache aber auch kurze hügelige Abschnitte mit bis zu 8% Steigung. Um den Alltagseinsatz besser zu simulieren, mussten die Testfahrer an drei festgelegten Punkten anhalten. Diese Strecke wurde in der Tabelle mit „Mixed Track“ bezeichnet.



*Bild 3.1: 7,8 km lange Testparcours in Henna*

Beim Bergtest wurde ein 500 m langes Straßenstück mit durchschnittlich 7% Steigung (max. 8% am Anfang) immer wieder bergauf gefahren, bis die Batterie leer war. Vom oberen Umkehrpunkt bis zum unteren ließ man das Fahrrad im Leerlauf rollen. Die Bergreichweite ergab sich dann aus der Summe der bergauf gefahrenen Kilometer.

Alle Testräder wurden von den selben Fahrern solange über den Alltagsparcours gefahren bis die Batterie leer war. Wenn vom Hersteller gewünscht, wurde mit unterschiedlichen Unterstützungsmodi (z.B. Eco- oder Speed-Modus) und mit unterschiedlichen Batterien, welche sich durch Chemismus und Gewicht unterscheiden, getestet.

Die Tests wurden sehr gründlich durchgeführt. Als Vorbereitung der Batterie wurde diese zyklisiert (mehrmals geladen und über ohmsche Last entladen). Zum Messen des Stromflusses ab Batterie während der Testfahrten wurde in die Batterie Messkabel eingelötet.

An die Testräder wurde eine Lenkertasche mit Messzentrale und Notwerkzeug, Messpedale zur exakten Erfassung der Muskelkraft (die Daten wurden per Funk an die Messzentrale am Fahrrad übertragen), Trittfrequenz- und Geschwindigkeits-Sensoren, ein Palm-Computer zur Erfassung von Geschwindigkeit, Trittfrequenz und Trittkraft und ein CicloSport HAC 4 zur Pulsmessung. Die Messpedale wurden mittels eines Vergleichsgewichts kalibriert. Der Reifendruck wurde überprüft und der Radumfang beim Fahrradcomputer eingegeben.



*Bild 3.2: Lenkertasche mit Palm-Computer zur Datenerfassung*



*Bild3.3: Für die Kraftmessung umgebautes Pedal.*

Hersteller		Ce Asia PTE	Aprilia	Biketec AG	Dahon	Giant	Heinzmann	KTM
Type		eZee	Enjoy racing	Flyer F6 deluxe	Roo EL	Lafree Twist	Estelle City	Life Blitz
Variante		Blei E-Bike	Stufe 1 Pedelec	Pedelec	Speed Pedelec	On Pedelec	Pedelec	Pedelec
Reichweite im „mixed Track“	km	29,22	37	19,9	15,05	35,5	26,3	46,9
Unterstützungsgrad Ebene		57%	66%	54%	30%	61%	67%	59%
Geschwindigkeit „mixed Track“	km/h	20,9	18,5	22,7	18,9	20,1	21	20,2
Reichweite am Berg	km	5,7	7,4	8,9	3,7	7,3	5,6	10,8
Unterstützungsgrad am Berg		60%	63%	61%	39%	56%	76%	72%
Geschwindigkeit am Berg	km/h	9,37	12,85	10,68	7,8	11,48	11,35	11,78
Gewicht fahrbereit	kg	39,76	31,02	33,5	18,1	21,9	31,1	29,38
Batteriekapazität	Wh	265,3	255,5	177,1	52,92	137,21	171,4	214,1
VK-Preis	Euro	-	1399,-	3990,-	1299,-	1425,-	1839,-	1699,-
Gewicht Batteriebox	kg	12,82	6	7,34	2,2	3,88	5,24	7,12
Energiedichte Akku	Wh/kg	20,7	42,6	24,1	24,1	35,4	32,7	30,1
Verbrauch elektr. Energie "mixed Track"	Wh/km	9,08	6,91	8,90	3,52	3,87	6,52	4,57
Verbrauch elektr. Energie Berg	Wh/km	46,54	34,53	19,90	14,30	18,80	30,61	19,82
Fahrzeuggewicht + 75kg Fahrergewicht	kg	114,76	106,02	108,50	93,10	96,90	106,10	104,38
mittlere Steigung		7,2%	7,2%	7,2%	7,2%	7,2%	7,2%	7,2%
c <sub>wA</sub> -Wert		0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Rollwiderstandbeiwert		0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
theor. benötigte Gesamtleistung Berg*	W	244	315	265	164	256	276	283
theor. Energiebedarf für Fortbewegung Berg*	Wh/km	26,05	24,52	24,80	21,08	22,31	24,34	24,01
PMensch Berg	W	97,64	116,58	103,29	100,29	112,68	66,31	79,20
relative Bewegungsenergie (Mensch) Berg	Wh/km	10,42	9,07	9,67	12,86	9,82	5,84	6,72
PMotor, Abgabe Berg	W	146,46	198,51	161,55	64,12	143,42	209,98	203,67
relative Bewegungsenergie Motor Berg	Wh/km	15,63	15,45	15,13	8,22	12,49	18,50	17,29
PMotor, Aufnahme Berg	W	436,12	443,67	212,52	111,56	215,78	347,39	233,53
Energieeffizienz des elektr. Antriebssystems		<b>34%</b>	45%	76%	57%	66%	60%	<b>87%</b>

Tabelle 3.1a: Messergebnisse von ExtraEnergy und meine Auswertungen Teil 1.

In der ersten Spalte der *Tabelle 3.1a* ist das einzige, getestete E-Bike zu finden. Die ersten zehn Datensätze bis zu „Gewicht der Batteriebox“ sind dem „E-Bike und Pedelec-Test 2002“ von ExtraEnergy e.V. entnommen. Die restlichen Datensätze basieren großteils auf selbst getroffene Annahmen. Die unrealistisch hohen Wirkungsgrade führen zu der Vermutung, dass die getroffenen Annahmen (Fahrergewicht, Steigung,  $c_{wA}$ ,  $c_R$ ) zumindest in Einzelfällen zu ungenau sind, oder dass der angegebene Unterstützungsgrad zu unpräzise bestimmt wurde bzw. im Antriebsstrang auftretende Verluste eine entscheidende Rolle spielen.

Hersteller		Roll-Tech	Roll-Tech	Sachs	Schachner	Velocity	YAMAHA	YAMAHA
Type		City-Fully	City-Fully	Elo-Touring	Easy Boarding	Dolphin Silverspirit	Easy Super	XPC 26 deluxe
Variante		Blei/Super Mode	Lilon/Supel rMode	Pedelec	Pedelec	Pedelec	Eco	On
		Pedelec	Pedelec	Pedelec	Pedelec	Pedelec	Pedelec	Pedelec
Reichweite im „mixed Track“	km	40,6	32,5	34,7	28,8	22,4	37,2	30,9
Unterstützungsgrad Ebene		66%	86%	51%	56%	60%	71%	19%
Geschwindigkeit „mixed Track“	km/h	24,2	24,8	17,6	18,56	24,6	23,1	18,9
Reichweite am Berg	km	11,6	9,8	8,7	6	6,6	4,4	8
Unterstützungsgrad am Berg		59%	63%	55%	74%	72%	72%	53%
Geschwindigkeit am Berg	km/h	9,5	9,2	8,5	13,2	13,9	12,5	7,9
Gewicht fahrbereit	kg	42,6	30,3	32,7	26,3	26,75	29,8	26,4
Batteriekapazität	Wh	349,2	243,1	254,6	164,3	166,2	137,3	156,9
VK-Preis	Euro	ab 2195,-		1480,-	1307,-			
Gewicht Batteriebox	kg	15,62	3,88	5,98	5,3	7,54	4	3,64
Energiedichte Akku	Wh/kg	22,4	62,7	42,6	31,0	22,0	34,3	43,1
Verbrauch elektr. Energie "mixed Track"	Wh/km	8,60	7,48	7,34	5,70	7,42	3,69	5,08
Verbrauch elektr. Energie Berg	Wh/km	30,10	24,81	29,26	27,38	25,18	31,20	19,61
Fahzeuggewicht + 75kg Fahrergewicht	kg	117,60	105,30	107,70	101,30	101,75	104,80	101,40
mittlere Steigung		7,2%	7,2%	7,2%	7,2%	7,2%	7,2%	7,2%
c <sub>w</sub> A-Wert		0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Rollwiderstandbeiwert		0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
theor. benötigte Gesamtleistung Berg*	W	254	220	207	310	330	303	181
theor. Energiebedarf für Fortbewegung Berg*	Wh/km	26,70	23,93	24,39	23,52	23,72	24,20	22,94
PMensch Berg	W	103,99	81,44	93,31	80,71	92,32	84,70	85,16
relative Bewegungsenergie (Mensch) Berg	Wh/km	10,95	8,85	10,98	6,11	6,64	6,78	10,78
PMotor, Abgabe Berg	W	149,64	138,67	114,04	229,73	237,40	217,81	96,03
relative Bewegungsenergie Motor Berg	Wh/km	15,75	15,07	13,42	17,40	17,08	17,42	12,16
PMotor, Aufnahme Berg	W	285,98	228,22	248,75	361,46	350,03	390,06	154,94
Energieeffizienz des elektr. Antriebssystems		52%	61%	46%	64%	68%	56%	62%

Tabelle 3.1b: Messergebnisse von ExtraEnergy und meine Auswertungen Teil 2.

Die Energiedichte des gesamten Akkupacks ist das Verhältnis von Batteriekapazität zur Gesamtmasse der Batteriebox. Der Verbrauch an elektrischer Energie ist der Quotient aus Batteriekapazität und Reichweite. Diese Werte lassen sich durch die Angaben in der Tabelle genau ermitteln. Der einzige Punkt, der nicht genau genug definiert wurde, bezieht sich auf die Kapazität des Akkus. Da diese nicht unwesentlich von Temperatur und Entladestrom abhängt und sich eine Batterie z.B. während eines mehr oder weniger langen Stopps (z.B. beim bergab rollen lassen beim Bergtest), sollte hier näher angegeben werden, wie gemessen wurde.

Die Testfahrer sehen auf den Fotos auf der Homepage von ExtraEnergy eher schlank aus. trotzdem wurde von 75 kg Durchschnittsgewicht (inkl. Messvorrichtungen) ausgegangen.

Über die 500 m lange Bergteststrecke heißt es im Bericht, dass sie anfangs 8% und dann nur mehr 7% Steigung hat. Unter der Annahme dass das steilere Straßenstück genau 100 m lang ist, ergibt sich eine mittlere Steigung von 7.2%. Dies mag vielleicht über dem tatsächlichen Wert liegen, gleicht aber den Fehler durch die nicht berücksichtigten Anfahr- bzw. Beschleunigungsverluste ein wenig aus. Bei einer durchschnittlichen Bergreichweite der Pedelecs von 7,6 km mussten die Fahrräder im Schnitt 16 Mal bergauf beschleunigt werden.

Für den  $c_w A$ -Wert wurde der gerundete Wert genommen, welcher bei der Nachrechnung des Fahrrades von Herrn Curtis eingesetzt wurde. Durch die kleinen Geschwindigkeiten beim Bergtest spielt diese Wert ohnehin kaum eine Rolle. Dafür ist er Rollwiderstandsbeiwert mit 0,01 relativ hoch angenommen. Dies ist zwar ein guter Durchschnittswert normaler Fahrradreifen, könnte aber z.B. durch erhöhten Druck auf die Hälfte gesenkt werden. Hoher Druck macht den Reifen hart und senkt den Fahrkomfort. und das war bei diesem Test sicher nicht gewünscht. Ein 50% niedriger Rollwiderstandsbeiwert würde ergibt bei der Berechnung der Effizienz einen um 5 bis 10% schlechteren Wirkungsgrad, ist also sicher nicht die Hauptfehlerquelle. Weiter wird für die Luftdichte  $1,2 \text{ kg/m}^3$  und für die Erdbeschleunigung  $9,81 \text{ m/s}^2$  eingesetzt.

Nun lässt sich sehr schon die theoretisch benötigte Gesamtleistung am Berg  $P_{\text{theoretisch}}$  mit der in Kapitel 2 besprochenen Formel errechnen. Der theoretische Energiebedarf am Berg ist der Gesamtleistungsbedarf über der Durchschnittsgeschwindigkeit und beinhaltet keine Verluste.

Nun kommt der schwierigste Teil der Systemwirkungsgradabschätzung. Wir haben zwar den kleinsten, notwendigen Energiebedarf auf mehreren Annahmen basierend ermittelt und müssen annehmen, dass 100% der in den Akkus gespeicherten Energie verbraucht wurde (wie groß die tatsächlich aus den Akkus bezogene Energiemenge ist, wurde leider nicht angegeben), wissen aber nicht, welche Energiemenge durch den Fahrenden ergänzt wurde. Durch die Angabe des Unterstützungsgrades können wir weitere Annahmen treffen.

Zur Ermittlung des Unterstützungsgrades wurden Testfahrten mit einem vergleichbaren Fahrzeug ohne Motorunterstützung durchgeführt und mehrere Messpunkte der vom Menschen erbrachten Leistung aufgenommen, so dass eine geschwindigkeitsabhängige Funktion der Leistung  $P_{\text{Vergleich}}(v)$  abgebildet werden konnte. Anschließend wurde mit Motorunterstützung gefahren und wieder über mehrere Messpunkte eine geschwindigkeitsabhängige Funktion der Leistung des Menschen  $P_{\text{Mensch}}(v)$  abgebildet. Der zweite Messwert sollte idealer Weise kleiner als der erste sein, da sonst der Motor mehr bremst als unterstützt. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$P_{\text{Mensch}}(v) = (1 - \text{Unterstützungsgrad}) * P_{\text{Vergleich}}(v) \quad \{3.1\}$$

Bei welcher Geschwindigkeit verglichen wurde, stand nicht im Protokoll, vermutlich wurde die mittlere erreichte Geschwindigkeit der jeweiligen Etappe eingesetzt. Über den

Unterstützungsgrad lässt sich also die vom Menschen beigesteuerte Leistung berechnen. Die erzielte Leistungsminderung kann man der vom Motor abgegebenen Leistung gleichsetzen. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$P_{Motor,Aufnahme} + P_{Mensch} > P_{Motor,Abgabe} + P_{Mensch} = P_{Vergleich} > P_{theoretisch} \quad \{3.2\}$$

Um weiter rechnen zu können ist es notwendig, Kenntnis über den Zusammenhang von  $P_{theoretisch}$  und  $P_{Vergleich}$  zu erlangen. Aus diversen Veröffentlichungen geht hervor, dass gute Antriebssysteme 95 bis 99% Wirkungsgrad  $\eta_{Antrieb}$  haben.

$$\eta_{Antrieb} \cdot P_{Vergleich} = P_{theoretisch} \quad \{3.3\}$$

Für die Berechnungen in der Tabelle bin ich von einem idealen Antrieb mit  $\eta_{Antrieb} = 100\%$  ausgegangen, mir die Qualität der von den Herstellern eingesetzten Systeme nicht bekannt ist und ich die Erfahrung habe darüber urteilen zu können. Die Vernachlässigung dieses Wirkungsgrades ist zwar eine weitere Näherung, liegt aber vermutlich nicht zu weit daneben. Ein weiterer Grund für dieses Vorgehen sind die stark divergierenden Angaben verschiedener Quellen.

Gemäss einer in der Ausgabe S2 Sommer 2001 von "Human Power Technical Journal of the IHPVA" durchgeführten Wirkungsgradmessung eines Fahrradanztriebes mit der Fahrradnabe Rohloff Speedhub 500/14 beträgt deren Wirkungsgrad 86 bis 95%. Bei einer vergleichbaren Kettenschaltung je nach Verschmutzung 87 bis 97%. Die Tests wurden bei 80, 150 und 200 W Konstantleistung durchgeführt. Der Bericht weist nach Angabe des Nabenherstellers Widersprüche auf, die die Messwerte in Frage stellen.

Gemäss einer intern von Rohloff durchgeführten Wirkungsgradmessung betragen die Wirkungsgrade bei einer Prüfleistung von 400 W 95 bis 98,5%. Mit 400 W Konstantleistung zu prüfen ist deswegen sinnvoller, weil die Leistungsmaxima durch die sinusförmigen Belastung des Kurbeltriebes diesem Wert eher entsprechen als den effektiven Werten. Im niederen Leistungsbereich der Sinuskurve wird weniger Energie übertragen, so dass der schlechtere Wirkungsgrad kaum noch ins Gewicht fällt. Grund für den schlechten Wirkungsgrad bei kleinen Leistungen sind die Verluste, die sich zum Teil aus momentabhängigen Teilen (Zahneingriff) und Drehzahlabhängigen Teilen (z.B. Dichtungen) neben anderen, nicht erwähnten, zusammensetzt

	<b>Wirkungsgrad</b>
Kettenschaltungen	95% bis 98,5%
Rohloff SPEEDHUB 500/14	95% bis 98,5%

*Tabelle 3.2: Wirkungsgradmessung von Rohloff mit relativ neuen und 1000 km gefahrenen Antriebseinheiten bei 400 W Prüfleistung.*

Gemäss der in Fiets 8/97 (niederländisches Fahrradmagazin) zitierten Messungen von ID Bike beträgt der Wirkungsgrad eines Fahrradtriebs mit der Fahrradnabe Shimano Nexus Inter 7 im 3. Gang 75 bis 76% und erreicht nur im 2., 6. und 7. Gang mehr als 90%. Bei diesen Tests wurde vorne ein Kettenblatt mit 33 und hinten ein Ritzel mit 16 Zähnen verwendet. Getestet wurde mit einer wiederum relativ geringen Konstantleistung im Bereich von 100 und 200 W.

Um, wie gesagt, eine sinnvolle Aussage über den Antriebswirkungsgrades des elektrischen Teiles eines Elektrofahrrades machen zu können, ist es notwendig, den tatsächlichen Leistungsbedarf des Vergleichsfahrrades  $P_{Vergleich}$  zu kennen. Trotzdem möchte mit der Abschätzung weiter vorgehen.

Es lässt sich die vom Motor abgegebene Leistung mit

$$P_{Motor,Abgabe} = P_{Vergleich} - P_{Mensch} \quad \{3.4\}$$

oder näherungsweise mit

$$P_{Motor,Abgabe} \sim P_{theoretisch} - P_{Mensch} \quad \{3.5\}$$

berechnen. Die vom Motor aufgenommene Leistung ist gleich dem Produkt der verbrauchten, elektrischen Energie und der mittleren Geschwindigkeit.

Die Energieeffizienz des elektrischen Antriebssystems  $\eta_{elektr.Antrieb}$  ist der Quotient aus abgegebener Leistung und aufgenommener Leistung:

$$\eta_{elektr.Antrieb} = \frac{P_{Motor,Abgabe}}{P_{Motor,Aufnahme}} \quad \{3.6\}$$

Vielleicht gibt es Kunden, die meinen, dass ihnen der Wirkungsgrad egal sei und die Räder nach der Reichweite beurteilen. Damit mögen sie im Einzelfall recht haben, nicht aber dann, wenn mit einem anderen Elektrofahrradbesitzer eine Spritztour unternommen wird. Die Reichweite wird nämlich bei Höchstgeschwindigkeit gemessen, bei Ausflügen zu zweit ist aber die Reichweite bei der Geschwindigkeit des langsameren Fahrzeuges entscheidend – bei

gleicher Speicherkapazität der Batterie hat nun das Fahrzeug mit dem besseren Wirkungsgrad eindeutig die Nase vorn!

Umrechnung der benötigten, elektrischen Energiemenge in andere Energieträger

Der mittlere Verbrauch elektrischer Energie im „Mixed Track“ aller getesteten Pedelecs beträgt 6,12 Wh/km oder 0,61 kWh je 100 km. Würde man die selbe Performance mit einem Fahrrad erzielen, das mit einer 50 Ah Autobatterie ausgestattet ist, würde man annähernd 100 km weit fahren können! Bei dieser Reichweite darf sich eigentlich niemand mehr beklagen. Noch interessanter ist ein Vergleich mit den sonst im Verkehrswesen üblichen Treibstoffen.

Um den Verbrauch elektrischer Energie mit dem Energieinhalt von Benzin oder Diesel zu vergleichen, ist es zu aller erst nötig, möglichst genau den oberen Heizwert dieser Kraftstoffe zu kennen. Als Basis wurde absichtlich der obere Heizwert gewählt, da dieser die Verdampfungswärme des normalerweise gasförmigen Wasserdampfes beinhaltet. Schließlich wird ja beim Elektrofahrrad auch nicht die Abwärme des Motors vom Verbrauch abgezogen. Um genaue und vor allem aktuelle Werte zu bekommen, schrieb ich ein Email direkt an die OMV. Herr Dipl.-Ing. G. Bichler von der OMV AG (Kraftstoffe/Technical Marketing Services) antwortete, dass als unterer Heizwert von Kraftstoffen für Berechnungen meist 41 MJ/kg für Benzin und 43 MJ/kg für Diesel angenommen werden. Die Schwankungsbreite von OMV-Kraftstoffen könne er nicht angeben, da dieser Kennwert nicht spezifiziert ist und daher auch nicht regelmäßig kontrolliert wird.

Marktuntersuchungen in Deutschland im Jahr 1993 haben Heizwerte von 40,1 bis 41,9 für Benzine und 42,87 bis 43,12 für Diesel und Brennwerte von 42,3 bis 44,6 MJ/kg für Benzine und 45,67 bis 46,11 für Diesel (alle Angaben in MJ/kg) ergeben [3.2]. Die im EU-Raum verbindlichen Spezifikationen EN 228 für bleifreie Ottokraftstoffe schreiben eine Dichte bei 15 °C von 720 bis 775kg/m<sup>3</sup> vor, für Dieselmotorkraftstoffe ist gemäß EN 590 eine Dichte bei 15 °C von 820 bis 845kg/m<sup>3</sup> zulässig.

Die durchschnittliche Dichte von Ottokraftstoff bei 15 °C beträgt 745 kg/m<sup>3</sup>, die von Dieselmotorkraftstoff 830 kg/m<sup>3</sup>. [3.3]

Kraftstoffart	Brennwert H <sub>o</sub>	Dichte bei 15 °C	Energiedichte
Normal	44,2 MJ/kg	745 kg/m <sup>3</sup>	9.147 Wh/dm <sup>3</sup>
Super	43,5 MJ/kg	745 kg/m <sup>3</sup>	9.002 Wh/dm <sup>3</sup>
Super Plus	42,7 MJ/kg	745 kg/m <sup>3</sup>	8.837 Wh/dm <sup>3</sup>
Diesel	45,8 MJ/kg	830 kg/m <sup>3</sup>	10.559 Wh/dm <sup>3</sup>

Tabelle 3.3: Brennwerte üblicher Kraftstoffe bei 15 °C gemäß Aral [3.3]

	Dichte*	Brennwert H <sub>o</sub> *		Brennwert H <sub>o</sub> **		
	Mittel bei 15°C kg/m <sup>3</sup>	MJ/kg	Wh/dm <sup>3</sup>	min MJ/kg	max MJ/kg	Mittel MJ/kg
Benzin	745	44,2	9.147	42,3	44,6	43,45
Diesel	830	45,8	10.559	45,67	46,11	45,89

\* ... <http://www.aral-forschung.de/forschung/homepage/faq/02>

\*\* ... Marktuntersuchung in Deutschland (1993), Quelle: Dipl.-Ing. G. Bichler von der OMV AG (Kraftstoffe/Technical Marketing Services)

Tabelle 3.4: Dichte und oberer Heizwert (Brennwert) von Otto- und Dieseldieselkraftstoff.

Energieverbrauch von Pedelegs	Strom Wh/km	Benzin Liter auf 100 km	Diesel Liter auf 100 km
mixed Track	6,1	0,07	0,06
Berg (7,2% Stg)	25	0,27	0,24

Tabelle 3.5: Vergleich der beim ExtraEnergy Tests 2002 im Mittel verbrauchten elektrischen Energie auf einer gemischten Strecke und am Berg bei ca. 7,2% Steigung mit dem Brennwert üblicher Kraftstoffe in Liter pro 100 km. Im Vergleich zu Autos wird 100 mal weniger Hilfsenergie verbraucht!

Beim Betrachten obiger Tabelle, bei der sämtliche Verluste von der in der Batterie gespeicherten, chemischen Energie bis zur der in kinetische Energie umgewandelten, sieht man, welche großen Vorteile Pedelegs gegenüber herkömmlichen Verkehrsmitteln haben. Bei der Bergstrecke ist zu beachten, dass die beim bergauf Fahren gewonnene, potentielle Energie zu Ungunsten der Pedelegs nicht berücksichtigt wurde, da die beim Hinunterrollen zurückgelegte Strecke nicht gemessen wurde. Beim „mixed Track“ wurde versucht, durch mehrere Stopps im hügeligen Gelände den Alltagsbetrieb bestmöglich zu simulieren. Das heißt also, dass alle Fahrräder auf ebener Straße bei Windstille und ohne Stop-and-go noch viel weiter gekommen wären und somit noch viel weniger Energie konsumiert hätten.

3.2.2 Tests von Elektro Bike Shop Wenger, Schweiz [3.4]

Der Inhaber des Elektro Bike Shops, Herr Wenger, schreibt auf seiner Homepage eher in einer konsumentenfreundlichen als hochtechnischen Sprache. Seine Testmethode hat er gut begründet und ermöglichen Interessenten ohne großen Aufwand gute Vergleichstests zu machen, so fern mehrere Fahrräder zur Verfügung stehen. Damit sich seine Kunden von der Bergtauglichkeit der von ihm verkauften Fahrräder überzeugen kann, hat Wenger zwei nahe gelegene Strecken ausgemessen. Überdies vermietet er Elektrofahrräder für 1 bis 14 Tage für 30 bis 250 SFR, um ein Rad in gewohnter Umgebung auszuprobieren. Entschließt sich ein Kunde zum Kauf wird zuvorkommender Weise der Mitpreis vom Verkaufspreis abgezogen.

Unter dem Punkt „Eigene Erfahrungen“ berichtet Herr Wenger:

„Zweimal die Woche fahre ich mit meinem E-Bike von Thun nach Bern, wo ich noch einen Lehrauftrag habe. Für die 32 km lange Strecke benötige ich mit dem E-Bike (Dolphin mit NiMH-Akkus) genau gleich lange wie wenn ich die öffentlichen Verkehrsmittel benutzen würde.

Seitdem ich das E-Bike für diese Fahrt nehme und nicht mehr die öffentlichen Verkehrsmittel benutze, komme ich am Abend entspannter bei meiner Familie an als früher. Meine körperliche Konstitution hat sich ebenfalls stark verbessert und generell fühle ich mich viel besser.

Mein Einsatzgebiet des E-Bikes beschränkt sich nicht nur auf meine Wohnregion. Einfach das E-Bike auf den Veloträger montieren und ab geht's.

Das E-Bike ist für mich zu einem neuen Stück Lebensqualität geworden, welche ich nicht mehr missen möchte.“

Seine Fahrradtests führt Herr Wenger auf eine einfache Art und Weise durch. Damit verschiedene E-Bikes miteinander verglichen werden können, werden Fahrttests mit einer Tretleistung von 100 W durchgeführt, da diese Leistung seinen Angaben zufolge schwitzfreiem Fahren entspricht. Um immer mit konstanten Tretleistung zu fahren, muss der Puls des Fahrenden überwacht werden. Die Pulsfrequenz hat er mit dem sogenannten Conconi-Tests ermittelt, welche auf dem Zusammenhang eines bestimmten Pulses mit einer bestimmten Fahrleistung beim Radfahren beruhen.

Während der Testfahrten kontrollierte er seinen Puls mittels eines Pulsmessers fortlaufend und versuchte konstant mit dem Puls für 100 W Tretleistung zu fahren. Bei den Tests wog der 40 jährige Mann 88 kg. Auf den steilen Bergstücken fuhr er mit 150 W (siehe Tabelle), wobei er leicht ins Schwitzen.

Elektro- fahrrad (Her- steller)	 <b>FLYER F6D</b> <sup>1)</sup> (BKTech)	 <b>dolphin</b> <sup>1)</sup> (Velocity)	 <b>Sunday</b> (TdS)	 <b>E-Bike</b> (Kynast)
<b>33 km in der Ebene</b> Thun (565 m) – Bern (540 m) 0,08% Gefälle 				
<b>Dauer</b>	<b>1h 13min</b>	<b>1h 8min</b>	<b>1h 22min 42s</b>	<b>1h 40min 40s</b>
<b>Geschw.</b>	<b>27,2 km/h</b>	<b>29,1 km/h</b>	<b>23,9 km/h</b>	<b>19,7 km/h</b>
<b>Fahreindrücke</b>	Das Anfahrverhalten des Flyers ist überwältigend. Beim kleinsten Druck auf die Pedale will der Flyer kraftvoll losfahren. Der Flyer ist in der Ebene gleichen schnell wie der Dolphin, hält aber auf Steigungen nicht ganz mit.	Nur Fliegen ist schöner! Ob in der Ebene oder bei Steigungen, die eigene Fahrleistung wird jederzeit durch die Motorunterstützung gesteigert. So sind mehr als 30 km/h auch für Untrainierte keine Seltenheit.	Der Motor unterstütz bis ca. 21 km/h. Darüber kann der Gasgriff zuggedreht und mit reiner Muskelkraft gefahren werden. Faszinierend war, wie das Sunday die verschiedenen Steigungen gemeistert hatte.	Bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 22 km/h hilft der Motor beim Treten kräftig mit. Ob in der Ebene oder bei Steigungen, das E-Bike unterstützte einem immer wirkungsvoll.
<b>1 km bergauf</b> Allmendingen (578 m) – Amsoldingen (643 m) 6,5% Steigung 				
<b>Dauer</b>	<b>4min 54s</b>	<b>3min 27s</b>	<b>4min 22s</b>	<b>6min 32s</b>
<b>Geschw.</b>	<b>12,2 km/h</b>	<b>17,4 km/h</b>	<b>13,7 km/h</b>	<b>9,2 km/h</b>
<b>Fahreindrücke</b>	Kraftvoll meistert der FLYER diese Steigung	Einmal sich wie ein Rennfahrer fühlen!	Problemlos lässt sich die Strecke im 2.Gang mit rel. hoher Geschw. meistern.	Ohne Probleme lässt sich die Steigung im 2.Gang meistern
<b>4,1 km stark bergauf</b> Thun (565 m) – Goldiwil (940 m) 9,15% Steigung (Bergstücke mit 10 - 12%) 				
<b>Dauer</b>	<b>28min 00s</b>	<b>18min 05s</b>	<b>21min 15s</b>	<b>33min 10s</b>
<b>Geschw.</b>	<b>8,8 km/h</b>	<b>13,6 km/h</b>	<b>11,6 km/h</b>	<b>7,4 km/h</b>
<b>Fahreindrücke</b>	Beeindruckend mit wie wenig Kraftaufwand die Strecke gefahren werden konnte, denn die Tretleistung lag deutlich unterhalb derer der übrigen Testkandidaten.	Zielstrebig fliegt man mit dem Dolphin bei einer Tretleistung von ca. 150W (leichtes Schwitzen) den Berg hinauf.	Die Tretleistung musste auf ca. 150W (leichtes Schwitzen) erhöht werden. Beeindruckend ist die Geschwindigkeit, mit welcher die Steigung bewältigt wurde	Um die Steigung im 1.Gang zu bewältigen, musste mit 150W getreten werden. Trotzdem kam nie das Gefühl auf, diese Steigung nicht bezwingen zu können.

<sup>1)</sup> Die Strecke wurde mit einem NiMH-Akku gefahren.

Tabelle 3.6: Testreport von Wenger, Elektro Bike Shop

Die vergleichsweise geringe Geschwindigkeit, die mit dem Flyer F6D erreicht wurde, lässt vermuten, dass der Bergtest in diesem Fall nur mit 100 W Tretleistung gefahren wurde, während bei allen anderen mit 150 W getreten wurde.

Wenger selbst fasst die Tests folgendermaßen zusammen:

„Die Tretunterstützung ist bei allen Modellen wirkungsvoll. Es lassen sich Steigungen bewältigen, von denen man bisher nur träumte.

Der FLYER ist das kraftvollste der getesteten E-Bikes, der Dolphin das schnellste. Das Sunday mit seinem Radnabenmotor besticht in der 24 km/h - Klasse vor allem durch seine Geschwindigkeit.“

Bei den Tests ist auffällig, dass mit jedem der getesteten Räder die 33 km in der Ebene und die 4,1 km steil bergauf ohne Nachladen gefahren werden können. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Räder im Alltagsgebrauch den Ansprüchen jedes Durchschnittsfahrers gerecht werden. Längere Strecken und größere Steigungen wird kaum ein Durchschnittsbürger auf seinen täglichen Wegen bewältigen müssen. Es wird auch kaum wer länger als Wenger im Sattel sitzen wollen.

Für normale Konsumenten sind diese Tests hervorragend geeignet und ermöglichen eine leichtere Kaufentscheidung. Für Techniker und Elektrofahrradkonstrukteure sind diese Tests höchstens ein guter Anhaltspunkt. Soll eine gutes, leichtes Rad konstruiert werden, so ist der Gesamtwirkungsgrad wichtiger als die maximale Reichweite. Die Reichweite kann immer erhöht werden, indem zum Beispiel ein Zweitakku mitgeführt wird. Diese Möglichkeit wird übrigens von keinem Hersteller oder Verkäufer angeboten und macht im Normalfall keinen Sinn. Die gesamte, während eines „Akkulebens“ gespeicherte Energie kann nur durch Vielgebrauch ein Maximum erreichen, wodurch die laufenden Betriebskosten auf den geringsten Wert gedrückt werden können.

Den Test vom Elektro Bike Shop Wenger abschließend möchte ich noch zwei interessante Kapiteln von der Homepage übernehmen, welche die Erfahrungen mit guten Elektrofahrrädern von Leute, die im einschlägigen Bereich tätig sind, sehr schon wiedergibt:

### **Vorteile des E-Bikes gegenüber anderen Verkehrsmitteln**

- => Fahrt bis ins Zentrum
- => Keine Parkplatzprobleme
- => Keine Parkplatzgebühren am Arbeitsplatz

Der Hauptkonkurrent des E-Bikes ist der 50 ccm Roller (Scooter). Gegenüber diesem Mitstreiter sticht das E-Bike mit den folgenden Vorteilen heraus:

- Das E-Bike ist eine gesunde Art, sich fortzubewegen. Dies ist in der heutigen, hektischen Zeit nicht zu vernachlässigen.
- Durch die Möglichkeit, einen Anhänger mitzuführen, besitzt das E-Bike eine viel größere Zulademöglichkeit als der Roller.
- Ein E-Bike benötigt weniger Platz zum Parkieren.
- Mit dem E-Bike kann auf Strassen gefahren werden, die für den übrigen Verkehr gesperrt sind.

- Das E-Bike kann im Zug mitgeführt werden.
- Die Manövrierfähigkeit des E-Bikes ist bei einem Gewicht von ca. 25 - 30 kg besser als bei einem Roller von ca. 80 kg.
- Die Energiekosten für eine Strecke von 100 km liegen beim E-Bike mit 20 Rp. wesentlich tiefer als beim Roller mit einem Verbrauch von 3 - 4 l Benzin auf 100 km.
- Die Unterhaltskosten liegen trotz des Batteriewechsels nach ca. 20'000 km tiefer als beim Roller.
- Die Ersatzteile (Pneu etc.) sind billiger als beim Roller.
- Das E-Bike benötigt nur eine Töfflinummer (Fr. 40 - 50.-).

### **Einsatzbereiche des E-Bikes**

#### Privater Bereich

- Pendler mit weiten Anfahrtswegen (5 - 30 km)
- Pendler, die den Anfahrtsweg schnell und gesund zurücklegen wollen
- Personen, die nicht gerne Steigungen bewältigen
- Personen, die gerne radfahren würden, aber die Anstrengung scheuen.
- Paare, die nicht die gleiche Kondition aufweisen
- Familien mit Kinderanhänger
- Rentner, die mit dem Velo einen grösseren Aktionsradius haben möchten
- Zur Rehabilitation nach Operationen
- Personen mit gesundheitlichen Problemen wie z.B. Asthma

#### Gewerblicher Bereich

=> Fahrt bis vor die Haustüre des Kunden

=> Keine Parkplatzprobleme

- Lieferservice von Geschäften
- Firmenkuriere
- Soziale Hausdienste
- Notärzte
- Servicehandwerker
- Handwerker ohne Autoführerschein (Mofa-Ausweis erforderlich)
- Tourismus; Biken für Gäste, die sich wegen der Anstrengung nicht auf ein normales Mountainbike setzen würden oder die Partner unterschiedliche Konditionen aufweisen

### 3.3 Alternative Technologien

Es gibt derzeit kein einziges Individualverkehrsmittel, das mit Elektrofahrräder in punkto Einfachheit, Effizienz und Kosten mit Elektrofahrrädern verglichen werden könnte. Solarfahrräder werden leider nicht gebaut, wenngleich sie den Komfort weiter steigern könnten. Nur in Sachen Schnelligkeit auf ebenen Strecken werden sie bei Geschwindigkeiten über 20 oder 25 km/h von teil- und vollverkleideten Liegerädern geschlagen, weil diese keinen Geschwindigkeitsbegrenzungen unterliegen. Und durch deren extrem niedrige Luftwiderstandsbeiwerte haben sie eben bei höheren Geschwindigkeiten Vorteile. Wegen der aufwendigen Verschalung, den kleinen Stückzahlen und der Ultraleichtbauweise sind sie fast ähnlich teuer wie die erstgenannten, motorisierten Varianten.

Selbst Brennstoffzellenfahrräder haben nicht die geringste Chance, im städtischen Bereich bei kleinen Geschwindigkeiten ähnlich günstige Verbrauchswerte zu erzielen. Von den Kosten für diese Technik oder der Versorgung mit Wasserstoff bzw. dessen Gewinnung will ich gar nicht erst reden.

Die Wirkungsgrade von Brennstoffzellen würden etwa bei 50% oder ein wenig mehr liegen, die von Akkumulatoren liegen je nach Ladetechnik und Alter der Akkus zwischen 70 und 100%. Mit diesen Zahlen im Hinterkopf kann ein Wasserstofffahrrad nie auf eine höhere Energieeffizienz als ein Elektrofahrrad kommen.

Die Massen der Akkus der von ExtraEnergy getesteten Fahrräder liegt zwischen 2 und 16 kg und beträgt im Mittel 5,8 kg. Bei einem mittleren Gewicht von 105 kg von Elektrofahrrad und 75 kg schwerem Fahrer würden 5 kg Gewichtersparnis nicht einmal 4,8% Gewichtsreduktion bedeuten. Dabei muss aber erst bewiesen werden, dass die gesamten, zusätzlichen Einrichtungen für die Speicherung des Wasserstoffes, die Umwandlung in der Brennstoffzelle und so weiter nicht mehr als 0,8 kg wiegen würde.

Und zu guter Letzt stellt sich die Frage der Verfügbarkeit von Wasserstoff. Im Vergleich mit auf Strom basierenden Systemen sieht es hierbei schlecht aus. Für ein Wasserstofffahrzeug muss praktisch jeder Besitzer eine Wasserstoffbefüllanlage besitzen oder auf ein ausgeklügeltes Austausch- oder Tankstellennetz angewiesen sein. Natürlich, es ließen sich einfacher größere Reichweiten erzielen, doch bitte wer fährt schon mehr als 32 km pro Tag (Mittelwert beim ExtraEnergy-Test) – dies entspricht einer reinen Fahrzeit von 1,5 Stunden und soviel ist kaum ein Alltagsradler bereit, im Fahrradsattel zu verbringen.

Nun, ein Solarfahrrad würde sogar noch längere Strecken und größere Fahrzeiten zulassen, als ein normales Elektrofahrrad. Wie man sieht ist das Solarfahrrad, das eigentlich schon vor 10 Jahren gebaut werden hätte können, die beste Lösung für ein Nahverkehrs-Individualverkehrsmittel.

### 3.4 Quellen

- [3.1] ExtraEnergy e.V. (2002):  
<http://www.extraenergy.org>
  
- [3.2] *Chemisch-physikalische Daten von Otto- und Dieselmotoren*. Forschungsbericht 409 der DGMK (Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle). Hamburg (1993)
  
- [3.3] Aral AG & Co KG (2002):  
<http://www.aral-forschung.de/forschung/homepage/faq/02>
  
- [3.4] Elektro Bike Shop Wenger (2001 - 2002):  
<http://www.e-bike.ch>

## **4 Technisches**

In diesem Kapitel sind werden Überlegungen zur Auslegung und Dimensionierung eines Solarfahrrades getroffen und versucht, die einzelnen Baugruppen darauf abzustimmen.

## 4.1 Auslegung und Dimensionierung

### 4.1.1 Fahrwiderstände und Energiebedarf beim Radfahren

Der Leistungsbedarf  $P$  zum Antreiben eines Fahrrades ist gleich der Summer der Fahrwiderstände  $F_W$  multipliziert mit der Fahrgeschwindigkeit  $v$ . In der Literatur [4.1] wird häufig nur von Rollwiderstand  $F_R$ , Luftwiderstand  $F_L$  und Steigungswiderstand  $F_{Stg}$  gesprochen.

$$P = (F_R + F_L + F_{Stg}) \cdot v \quad \{4.1\}$$

Der Rollwiderstand entsteht durch Deformation von Reifen und Untergrund und wird meist als geschwindigkeitsunabhängig angegeben. Vereinzelt wird jedoch auch von einem geschwindigkeitsabhängigen Teil gesprochen, der durch das Produkt aus der Anzahl der Reifen  $n$ , dem geschwindigkeitsabhängigen Rollwiderstandsbeiwert  $c_r$  und der Geschwindigkeit  $v$  ausgedrückt wird:  $F_{R,v} = n \cdot c_r \cdot v$ . Wird mit  $c_r$  gerechnet, verändert sich auch der Wert für  $f_r$ . Anderen Quellen zufolge reicht eine Adaptierung von  $f_r$  gemäß  $f_{r\_neu} = f_r \cdot (1 + 0,02 \cdot v)$ .

Will man noch genauer ins Detail gehen, muss man auch etwaige Beschleunigungs- oder Kurvenwiderstände berücksichtigen. Die Beschleunigungswiderstandskraft  $F_B$  [4.2] hängt von der Beschleunigung des Fahrzeuges und der rotierenden Teile (Motor, Getriebe, Antriebsstrang und Räder) ab. Sie fällt nach Erreichen der Höchstgeschwindigkeit oder beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit weg und wird für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt. Bei einer energetischen Betrachtung kann sie dann von Bedeutung sein, wenn im betreffenden Fahrzyklus viele Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver (z.B. scharfes Bremsen vor roten Ampeln) durchgeführt werden, wenn mit unterschiedlicher Geschwindigkeit gefahren wird oder wenn sich die Motordrehzahl ständig ändert. Kurvenwiderstände entstehen die durch einseitige Deformation des Reifens. Außerdem gibt es einen gewissen Schlupf des Reifens bezüglich dem Untergrund.

Der Einfluss einer Luftbewegung relativ zur Fahrbahn (Wind) ist sehr schwer abzuschätzen. Je nach Fahrzeug kann sich z.B. Seitenwind günstig (Segeleffekt) oder im Normalfall ungünstig auf den Leistungsbedarf auswirken. Es macht bei Seitenwind auch einen Unterschied, ob die Räder verkleidet sind oder ob die Luft durch ein Speichenrad durchströmen kann. Obwohl dies bei offenen Fahrrädern einen stärkeren Einfluss als bei Vollverkleideten Fahrzeugen hat, wird häufig von der Näherung ausgegangen, dass sich die Absolutgeschwindigkeit der Luft über dem Boden  $w$  zur Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  bei der Berechnung des Luftwiderstandes hinzuaddieren lässt {4.3}.

Da mir für all diese Überlegungen genauere Daten fehlen und ich keine geeigneten Versuche durchführen konnte, um entsprechende Messwerte zu erhalten, blieb ich bei der einfacheren Berechnungsmethode, bei der nur die Abhängigkeit des Rollwiderstandes von der Deformation des Reifens durch die normal auf den Untergrund wirkende Komponente der Gewichtskraft berücksichtigt wird. Das Kürzel *Stg* steht für die Steigung, wobei bei einer Angabe in % durch 100% dividiert werden muss. Die Steigung ist ganz einfach zu messen, indem eine 1 m lange Wasserwaage, die auf einem Ende auf dem Untergrund aufliegt, in Waage gehalten wird. Der in cm gemessene, lotrechte Abstand zum Boden auf der anderen Seite ergibt die Steigung in %.

$$F_R = f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\arctan(Stg)) \quad \{4.2\}$$

Der Luftwiderstand ist ebenfalls von mehreren Parametern abhängig, auf die oft nur oberflächlich eingegangen wird. Daraus gibt sich eine durchaus starke Diskrepanz der dokumentierten Luftwiderstandsbeiwerte gleicher oder ähnlicher Fahrzeuge. Der Einfluss von enger oder weiter, im Wind flatternder Kleidung, die Größe des Fahrers oder seine Sitzposition haben nicht zu unterschätzenden Einfluss auf den Luftwiderstand. So wurde laut Dr. M. Plachky die sogenannte Supermannhaltung, bei der der Fahrer mit fast waagrechtem Oberkörper und nach vorne gestreckten Armen auf dem Fahrrad „liegt“, vorerst vom UCI aus dem Radsport verbannt und sogar der Stundenweltrekord von Boardmann mit 56,375 km/h aberkannt. Boardmann's Leistung von etwa 450 W über eine Stunde gilt „nur mehr“ als Weltbestleistung. Seit September 2000 gilt wieder der alte Weltrekord von Merckx, den dieser 1972 in Mexiko auf 2200 m Höhe mit 49.431 km/h in der Unterlenker-Haltung aufstellte. Merckx hatte etwa 420 W Leistung auf die Räder brachte und bei einem Wirkungsgrad von 23% ca. 1830 Wh (fast 6,6 MJ) Energie verbraucht.

Neben den unterschiedlichen Fahrradgeometrien spielt es eine entscheidende Rolle, ob ein verkleidetes Rad oder ein Zwei-, Drei- oder Vierspeichenrad aus Kunststoff oder ob ein mit Metallspeichen eingespeichtetes Rad verwendet wird. Bei den Metallspeichenrädern gibt es Unterschiede in der Speichenanzahl, der Form (z.B. flache Profile für Rennräder) und der Art der Speichung. Genauso wie die Speichen spielt das Profil der Reifen selbst eine Rolle. Stollenreifen haben selbstverständlich einen höheren Luftwiderstand als schmale Rennslicks. Größere Reifen verschlechtern den Luftwiderstand eines rotierenden Rades bei gleicher Umfangsgeschwindigkeit stärker als kleinere. Das war mit ein Grund, weshalb kleine Räder bei Straßenrennen verboten wurden.

Bei leichtem Seitenwind verschlechtert sich der Widerstand von Fahrrädern mit verkleideten Rädern, wobei er sich bei Fahrrädern mit offenen Rädern sogar verbessern kann, da die Wirbelbildung hinter dem Fahrer beeinflusst wird. Dieser Seitenwindeffekt tritt bei den Vorderrädern stärker auf als bei den Hinterrädern. Neben dem veränderten Lenkverhalten ist das Grund genug, dass bei Straßenrennen im Gegensatz zu Hallenrennen vor allem vollverkleidete Vorderräder wieder verschwunden sind.

Selbst die Frequenz, mit der der Fahrer in die Pedale tritt, beeinflusst den Luftwiderstand. Das Vorwärtsbewegen des Fußes hat durch die Abhängigkeit von  $v^2$  einen negativeren Einfluss als das nach hinten Bewegen. Eine höhere Trittfrequenz begünstigt aber die Effizienz unter anderem durch den runderen Tritt, so dass das Radrennfahrer mit etwa 90 Umdrehungen pro Minute in die Pedale steigen. Durchschnittliche Radfahrer treten mit etwa 50 bis 70 Umdrehungen pro Minute.

$$F_L = c_w \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{(v + w)^2}{2} \quad \{4.3\}$$

Bei meinen Überlegungen verwende ich die einfachere Formel, da sie für die niedrige Geschwindigkeit für die das Solarfahrrad ausgelegt werden soll, ausreichend genau ist. Der Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  ist eine einheitslose, geometrieabhängige Kennzahl. Das Produkt aus  $c_w$ -Wert und Stirnfläche ergibt die effektive Stirnfläche  $A$ , die normal zur Luftströmung steht und manchmal als äquivalente Stirn- oder Schattenfläche bezeichnet wird. Die Stirnfläche ist die Normalprojektion des betrachteten Körpers auf eine zur Strömungsrichtung im rechten Winkel stehende Wand. Rho ( $\rho$ ) ist die Luftdichte und wird Wetter- und höhenunabhängig mit  $1.2 \text{ kg/m}^3$  angenommen. Die relative Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich aus der Summe der Fahrgeschwindigkeit  $v$  und der Luftgeschwindigkeit  $w$  welche bei Rückenwind einen negativen Wert annimmt. Für die hier angestellten Berechnungen wird Windstille ( $w = 0$ ) angenommen, wodurch sich der Term vereinfacht.

Als Grundlage zur Abschätzung des  $c_w$ -Wertes dienen die Daten aus der Veröffentlichung „Die Aerodynamik von Muskelkraft-Fahrzeugen“ im Spektrum der Wissenschaft vom Februar 1984. Diese basieren zumindest teilweise auf Windkanalmessungen und berücksichtigen vermutlich keine rotierenden Teile. Dafür sind Werte für Fahrer auf idealen Rädern ( $c_w = 0$ ) und umgekehrt angegeben, so dass eine leichtere Abschätzung des Luftwiderstandes des Solarfahrrades möglich ist.

Für die Schätzwerte des Solar-Liege-Dreirad mit Dach summiere ich die Stirnflächen und effektive Flächen eines Liegefahrrades mit Fahrer, eines normalen Fahrrades mit Luftwiderstandslosem Fahrer und überschlagsmäßig berechnete Werte für das Solarzellendach. Aus diesen beiden Summen lässt sich dann ein fiktiver Luftwiderstandsbeiwert berechnen.

	Liegefahrrad mit Fahrer	Fahrrad mit idealem Fahrer	schräg angeströmtes Solarmodul*	Solarliegedreirad
$c_w$ -Wert	0,77	1,1		1,01
Stirnfläche [m <sup>2</sup> ]	0,35	0,11	0,023	0,48
eff. Stirnfl. [m <sup>2</sup> ]	0,2695	0,121	0,099	0,49

\* ... Die effektive Fläche wird hier als Summe von Stirn- und schräg angeströmten Fläche angesetzt.

Tabelle 4.1: Abschätzung des Luftwiderstandes des Solardreirades

Zur Abschätzung der effektiven Stirnfläche des durch den Fahrer von unten schräg angeströmte Solarmodul habe ich ein paar Annahmen und Vereinfachungen getroffen. Der Winkel zwischen Fahrer und Horizontalen beträgt 55 °. Der Luftstrom, der vom Fahrer Richtung Solarzellendach abgelenkt wird, trifft mit dem halben Ablenkungswink auf die Solarzellen. Die angeströmte Fläche ist halb so breit wie das Solarmodul und einen halben Meter lang, woraus sich die normal zur Strömungsrichtung projizierte, effektive Fläche durch schräge Anströmung ergibt. Diese ergibt mit der (effektiven) Stirnfläche des Solarmoduls in Fahrtrichtung die gesamte, in die Überlegung einbezogene, effektive Fläche des Solarmoduls.

55 °	Sitzposition
27,5 °	Anströmwinkel der Solarzellen
0,5 m	Länge der angeströmten Fläche
0,326 m	Breite der angeströmten Fläche
0,163 m <sup>2</sup>	angeströmte Fläche
0,075 m <sup>2</sup>	effektive, schräg angeströmte Fläche
0,023 m <sup>2</sup>	Stirnfläche des Solarmoduls in Fahrtrichtung
0,099 m <sup>2</sup>	effektive Fläche des Solarmoduls

Tabelle 4.2: Abschätzung der effektiven Stirnfläche des Solarmoduls

Obwohl die gesetzlich vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit von Elektrofahrräder in der Ebene gemessen wird, ist es wichtig zu wissen, welche Leistung zum Bergauffahren benötigt wird und wie lange mit der gespeicherten Energie bergauf gefahren werden kann. Der Steigungswiderstand  $F_{Stg}$  ergibt sich aus der gegen die Fahrtrichtung projizierte Komponente der Gewichtskraft. Bei Gefälle ist  $F_{Stg}$  negativ.

$$F_{Stg} = m \cdot g \cdot \sin(\arctan(Stg)) \quad \{4.4\}$$

Bei Windstille ergibt sich somit aus den vereinfachten Formeln {4.1} bis {4.4} ein Leistungsbedarf von:

$$P = f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\arctan(Stg)) \cdot v + c_w \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} + m \cdot g \cdot \sin(\arctan(Stg)) \cdot v \quad \{4.5\}$$

Geschwindigkeit		Leistungsbedarf [W] bei Steigungen (Solarfahrrad)								
km/h	m/s	0,0%	1,8%	3,8%	4,6%	5,7%	7,7%	11,0%	15,0%	20,0%
0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,56	8	23	39	46	55	71	98	129	168
4	1,11	17	46	79	92	110	142	195	259	<b>337</b>
6	1,67	26	70	119	139	165	214	294	389	506
8	2,22	36	95	160	186	222	287	393	<b>521</b>	677
10	2,78	47	121	202	235	280	361	494	653	848
12	3,33	60	148	246	285	339	436	<b>596</b>	787	1021
14	3,89	74	177	292	337	400	514	700	923	1196
16	4,44	91	209	339	392	463	<b>593</b>	806	1061	1373
18	5,00	110	243	390	448	529	675	914	1201	1552
20	5,56	132	279	442	508	<b>597</b>	759	1025	1344	1734
22	6,11	157	319	498	570	669	847	1140	1490	1919
23	6,39	171	340	527	<b>602</b>	705	892	1198	1564	2012
25	6,94	<b>200</b>	<b>384</b>	<b>588</b>	670	782	985	1317	1715	2203

Tabelle 4.3: Leistungs- und Energiebedarf eines Solarfahrrades ( $c_w A = 0,4892$ ,  $f_r = 0,010$ ,  $m_{ges} = 150\text{kg}$ ) bei verschiedenen Steigungen.

Geschwindigkeit		Leistungsbedarf [W] bei Steigungen (Tourenfahrrad)								
km/h	m/s	0,0%	1,8%	3,8%	4,6%	5,7%	7,7%	11,0%	15,0%	20,0%
0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,56	5	15	26	31	36	47	65	86	<b>112</b>
4	1,11	11	31	53	61	73	95	130	<b>173</b>	225
6	1,67	18	47	80	93	111	143	<b>196</b>	260	338
8	2,22	25	64	107	125	149	<b>192</b>	263	348	452
10	2,78	33	82	136	158	<b>188</b>	242	330	437	567
12	3,33	42	101	166	<b>192</b>	228	293	399	527	683
14	3,89	53	122	<b>198</b>	228	270	346	470	619	801
16	4,44	66	144	231	266	314	401	542	712	920
18	5,00	81	169	267	306	360	457	617	808	1042
20	5,56	98	<b>196</b>	305	348	408	516	694	906	1166
22	6,11	118	226	346	393	459	578	773	1007	1292
23	6,39	129	242	367	417	486	610	814	1058	1357
25	6,94	<b>153</b>	276	412	466	541	676	898	1163	1488

Tabelle 4.4: Leistungs- und Energiebedarf eines normalen Fahrrades ( $c_w A = 0,4235$ ,  $f_r = 0,010$ ,  $m_{ges} = 100\text{kg}$ ) bei verschiedenen Steigungen.

Fett hinterlegt wurden Werte, die mit 200 W Eigenleistung und mit 400 W vom Motor zur Verfügung gestellten Leistung (gemäß österreichischem Recht) erreichbar sind. Die Leistungsangaben beziehen sich auf die am Rad wirkende Leistung. Beim Vergleich der beiden obigen Tabellen wird sofort ersichtlich, dass ein Solarfahrrad (Liegendreirad mit Solarzellendach), das zusammen mit dem Fahrer und Gepäck 50% mehr Masse hat als ein Tourenradfahrer, der zusammen mit Gepäck und Rad 100 kg wiegt, eindeutig im Vorteil ist. Bei Gefällestrecken benötigt der Solarfahrradfahrer durch die größere Hangabtriebskraft schon ab einem Gefälle von  $-1,4\%$  weniger Energie als der normale Radfahrer, solange nicht schneller als 25 km/h gefahren wird. Um bei einem Gefälle von  $4,5\%$  eine Geschwindigkeit von 50 km/h zu erreichen, benötigt der Solarfahrradfahrer nur 72 W (ohne Motorunterstützung) während der Tourenradfahrer mit voller Leistung von 204 W treten müsste.

Nimmt man eine 7 km lange Bergstrecke, bei der die Steigungen entsprechend den ersten sieben Eintragungen in den beiden obigen Tabellen auf jeweils genau 1 km zutreffen, dann würde der Solarfahrradfahrer klar im Vorteil sein. Unter Vernachlässigung von Beschleunigungs- und Verzögerungskräften, bei fliegendem Start mit der Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h und unter der Annahme, dass die fett hinterlegten Werte eingehalten werden, würde der Solarfahrradfahrer mit 19,5 km/h nach 21,6 Minuten am Zielort sein, während der Tourenradfahrer mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 11,0 km/h 16,6 Minuten länger brauchen würde. Der gesamte auf die zurückgelegte Strecke bezogene Energiebedarf liegt beim Solarfahrrad bei 2,71 kWh/100km und beim Tourenrad bei 1,74 kWh/100km für diese Bergstrecke.

Der schweizer Radsprinter Manfred Nüscheler, der es zwischen 1997 und 2002 zu 5 Eintragungen ins Guinness Buch der Rekorde im Bereich Radrolle und Veloergometer geschafft hat, konnte mir ein paar Daten über die mittlere Leistungsfähigkeit von Menschen nennen. Ein Gesundheitssportler (macht mindestens 3-4 Stunden Ausdauertraining pro Woche) kann je nach Talent eine Dauerleistung von etwa 2 bis 4 Watt pro kg Körpergewicht, also 150 bis 300 W, erbringen. Extremsportler schaffen 500 Watt. Chris Boardman (175 cm, 68 kg) benötigte aufgrund der aerodynamisch günstigsten Sitzposition bei seinem Stundenweltrekord von 1996 mit 56,375 km/h eine mittlere Leistung von „nur“ 440 bis 450 Watt. Die letzten 3 km in der Verfolgung fuhr Boardman mit 59,3 km/h im Schnitt und erbrachte eine mittlere Leistung „nur“ 510-520 Watt, wie mir Nüscheler schreibt. Manfred Nüscheler leistete 1991 über eine Zeit von 60 Sekunden im Schnitt 1020 Watt auf einem Velo-Generator, wie im Guinness Buch der Rekorde von 1999 zu lesen ist. Bei einem Wirkungsgrad von 23% lässt sich ein Energieverbrauch von 266 kJ errechnen. Weiters schreibt mir Nüscheler, dass gemäss Prof. Dr. Georg Neumann aus Leipzig der menschliche Wirkungsgrad (beim Radfahren?) zwischen 19 und 23% beträgt. Spitzensportler liegen meist bei 21-23% während Untrainierte eher im Bereich von 19-20% liegen. Der Mittelwert aller Menschen beträgt 20%.

Unter diesen Voraussetzungen ist die Annahmen, dass ein Fahrradfahrer 200 Watt Leistung erbringt, eher hoch gegriffen. Würde man beim Vergleich von Solar- und Tourenfahrrad davon ausgehen, dass der Mensch durchschnittlich nur mit 100 Watt zur Fortbewegung beiträgt, der Motor aber nach wie vor 400 Watt, dann würde sich das Ergebnis noch stärker zugunsten des Solarfahrrades verschieben. Dies betrifft auch den Fall älterer oder schwächerer Menschen.

Geht man von der Überlegung aus, dass das Solarfahrrad aufgrund des Komfortgewinns besonders beim Bergauffahren verstärkt genutzt wird, absolviert der Fahrende automatisch mehr in seine Gesundheit und Fitness, so dass er bald eine Dauerleistung von 200 Watt problemlos erbringen wird können.

### 4.1.2 Zusammenfassende Betrachtung der Auslegungskriterien

Das Solarfahrrad darf etwa 65 kg schwer sein, sollte aber als Liegerad ausgeführt werden, um den schlechteren  $c_w$ -Wert durch möglichst geringe Stirnfläche zu kompensieren. Im Bereich bis 20 km/h spielt das zwar keine so wesentliche Rolle, doch wird dadurch auch automatisch der Schwerpunkt nach unten verlagert.

Für bessere Standsicherheit besonders des stehenden Fahrzeuges sind zumindest drei Räder von Vorteil. Günstig ist, die beiden Räder vorne anzuordnen und mit einer Trapezlenkung zu lenken. Somit hat man die maximale Breite des Fahrzeuges immer im Blick und gewinnt beim Einlenken an Stabilität (besonders beim Bremsen) gegenüber einem Dreirad, das hinten zwei nicht gelenkte Räder hat. Es ist aber auch eine Art Dreiradler denkbar, bei dem die Vorderachse direkt über Tretkurbeln angetrieben wird, wie wir es vermutlich aus Kindertagen kennen. Dieser Direktantrieb, der ohne Kette auskommt, bedarf allerdings eines Freilaufes und eines integrierten Getriebes. Er entsprechende Antrieb wurde bereits erfunden und in den letzten Jahren in Prototypen erprobt. Da jedoch die Internetseite wieder von der Bildfläche verschwunden ist, werden hierzu keine näheren Angaben gemacht.

Steigungen von 15% sollten kein Hindernis darstellen, eine Anfahr-Steigfähigkeit von 20% bis 25% sollte zumindest mit Tretunterstützung problemlos zu meistern sein. Damit man nicht zum Schieben gezwungen wird, wäre es gut, Straßenabschnitte mit 25% Steigung zumindest im Schrittempo (4 km/h) bewältigen zu können. Unterhalb diese Geschwindigkeit würde selbst ein normaler Zweiradfahrer vom Velo steigen.

Um ausreichend Leistung zur Verfügung zu haben und um gänzlich vom Stromnetz unabhängig zu sein, sollte die Solarzellenfläche nicht zu klein ausfallen und die Speicherkapazität der Akkus drei Tage überbrücken können. Weil heutige Akkus die geringste Lebensdauer der Bestandteile eines Solarfahrrades haben und somit eine Art Verschleißteil sind, sollten die billig sein. Trotzdem müssen sie hohen Strömen und eine

Entladung in ein bis zwei Stunden standhalten. Gute, tiefentladbare Bleiakkus würden sich trotz der geringen Energiedichte hervorragend anbieten. Die Kapazität wird somit durch das Gewicht von 19 bis 32 kg für die Akkus beschränkt und liegt somit im Bereich von 500 bis 1000 kWh. Das entspricht einer effektiv nutzbaren Energiedichte von 26 bis 31 kWh/kg und ist für tiefentladbare Bleiakkus durchaus denkbar, da die Solarzellen auch beim Nichtbetrieb des Fahrzeuges die Akkus laden. Aus Sicherheitsgründen sollten die Akkus neigungsunabhängig und auslaufsicher sein.

Damit die Abmessungen des Rades nicht ins Unermessliche gehen, bietet sich der Aufbau eines Daches als ideale Lösung an. Bei einer Länge von 1,6 bis 2 m und einer Breite von 0,6 bis 0,85 m für das gesamte Solarfahrrad lassen sich gut 1 m<sup>2</sup> Solarzellen unterbringen. Je nach Ausführung sind mit heutigen Solarzellen 50 bis über 120 Watt Spitzenleistung erzielbar.

Normale Fahrräder haben etwa 1,75 m Länge und durch die weit verbreiteten Mountainbikelenker gerne 0,6 m Breite oder mehr. Mit 85 cm Breite sollte das Rad gerade noch durch die meisten Gartentüren passen. Eine kürzere Gesamtlänge lässt sich durch Verwendung kleinerer Reifen, vorzugsweise in der Dimension 20 Zoll, realisieren und würde ein Quer-Parken auf der Strasse ermöglichen.

Einer „Dachhöhe“ von 1,2 bis 1,4 m ermöglicht mit einer Augenhöhe von etwa 1,0 bis 1,2 m, leicht über die Motorhauben normaler Autos hinwegzuschauen und erleichtert das Auf- und Ab- bzw. Ein- und Aussteigen. Sie Sitzhöhe befindet sich dann in der Höhe eines normalen Stuhles oder ein wenig darunter.

Eigengewicht	65 kg
Gesamtgewicht mit Fahrer und Gepäck	150 kg
Länge	1,6 bis 2,0 m
Breite	0,6 bis 0,85 m
Höhe (Solarzellendach)	1,2 bis 1,4 m
Augenhöhe	1,0 bis 1,2 m
Größe der Solarzellenfläche	1 m <sup>2</sup>
Akkutype	SLA oder Pb-Gel
Kapazität	500 – 1000 kWh
Anfahr-Steigfähigkeit ohne Treten	15%
max. Steigung bei v <sub>min</sub> von 4 km/h	25%
abgegebene Motorleistung E-Bike*	400 W
Maximalgeschwindigkeit nur mit Motor*	20 km/h

\* ... Elektrofahrrad nach österreichischem Gesetz. Bei Pedelecs dürfte die Unterstützung in Abhängigkeit der vom Menschen erbrachten Leistung 250 W und 25 km/h nicht überschreiten.

*Tabelle 4.5: Vorgeschlagene Designgrößen für Solarfahrräder*

## 4.1 Die wichtigsten Bestandteile

### 4.1.1 Rahmen (2rad, 3rad, 4rad)

Der Rahmenbau ist eine eigene Geschichte, für die an anderen Universitäten Jahre lang in Form von kleinen Projektgruppen Designstudien erstellt und teilweise gebaut werden. Für ein professionelles Solarfahrrad muss ganz besonders auf dieses Thema eingegangen werden, da das eigentliche Fahrrad und das Solarzellendach eine stabile Einheit ergeben soll. Grosse Bedeutung kommt dabei auch dem Kipp- und Gierverhalten zu. Aufgrund des Umfangs soll nur auf bekannte Konstruktionen eingegangen werden. Für Prototypen zur Erprobung der Funktionalität des Konzeptes „Solarfahrrad“ reicht es, auf bestehende Rahmen eine Dachkonstruktion aufzubauen und das Mehrgewicht bei den Überlegungen und Schlussfolgerungen entsprechend zu berücksichtigen.

Der gängigste Rahmen besteht aus einer einfachen Trapezkonstruktion. Er ist äußerst stabil, bringt aber auch Nachteile mit sich. Meist ist es das Oberrohr, das stört, z.B. wenn man vom Rad fällt, sei es beim Mountainbiken oder in der Stadt. Außerdem verlangt es ein wenig Balancegefühl beim Aufsteigen, wenn ein Bein auf die andere Seite des Fahrrades gehoben werden muss. Dies bereitet besonders älteren Leuten Schwierigkeiten. Frauen, die Röcke oder Kleider tragen hätten obendrein den Nachteil, dass der Rock oder das Kleid vom Fahrtwind in die Höhe und womöglich ins Gesicht geweht werden würde. So schuf man Damenräder oder Räder mit besonders tiefem Durchstieg. Für Leute, denen das immer noch zu hoch ist, gibt es Räder, bei denen Vorder- und Hinterrad durch ein geschwungenes, stabiles Rohr, das seitlich herum geführt wird, verbunden ist. Die Gefahr, dass ein Zweirad umfallen kann, lässt derartige Konstruktionen für ein Solarfahrrad ungeeignet erscheinen.

Beim Hollandrad nimmt der Fahrende eine aufrechte Sitzhaltung ein. Der Lenker wird geschwungen nach hinten geführt, so dass er leicht zu greifen ist. Durch die hohe Sitzposition hat man eine perfekte Rundumsicht. Die Schultern sind etwa in der Höhe von Autodächern. Stöße durch Fahrbahnunebenheiten werden direkt in die Wirbelsäule geleitet. Das macht bei gerader Haltung nicht so viel und wird durch einen breiten, gefederter Sattel einigermaßen gut gedämpft. Durch die aufrechte Sitzhaltung erhöht sich der Luftwiderstand und die Stirnfläche. Der  $c_wA$ -Wert liegt bei diesem Rad bei ca.  $0,6 \text{ m}^2$ .

Bei der sogenannten Tourenfahrerhaltung wird ein Teil der Gewichtskraft des Fahrenden durch die Arme abgestützt. Bei geradem bis leicht gekrümmtem Rücken wird die Wirbelsäule entlastet. Diese Haltung bedingt allerdings ein wenig Übung, da einem sonst schnell die Kraft in den Armen ausgeht. Die Rundumsicht ist noch fast so gut wie beim Hollandrad, die Augenhöhe befindet sich etwa in der Höhe üblicher Autodächer oder leicht darunter. Der

Luftwiderstand und die Stirnfläche werden jeweils um 10% kleiner. Der  $c_wA$ -Wert wird mit  $0,4 \text{ m}^2$  [4.3] bis  $0,5 \text{ m}^2$  (diverse Quellen aus dem Internet) angegeben.

Sowohl bei Hollandrädern als auch bei Tourenrädern ist es schwierig, ein Solarzellendach aufzubauen. Die Gesamtkonstruktion wäre schon so hoch, dass es schwierig wird, sie einigermaßen verwindungssteif zu bekommen, ohne das Gewicht übermäßig steigern zu müssen. Außerdem würde sich der Schwerpunkt weit nach oben verlagern, so dass das Handling und somit die Sicherheit stark beeinträchtigt wären. Käme das Fahrrad einmal aus dem Gleichgewicht, wäre es kaum noch zu halten.

Erst die Klasse der Liegeräder lässt ein Solarzellendach sinnvoll erscheinen. Ein hohes, kurzes Liege- oder Sesselfahrrad mit Oberlenker und kleinen 20“ Rädern wäre ideal für ein leichtes Dach, das mit Dünnschichtsolarzellen bestückt ist. Die Konstruktion muss natürlich unzerbrechlich sein, um zumindest ein Umfallen des Rades klaglos zu überstehen. Auch kleine Unfälle oder Stürze sollten zumindest die Solarzellen unbeschadet überstehen. Eine Federung des Hinterbaus sorgt für mehr Komfort und beugt Materialermüdungserscheinungen der Dachkonstruktion und der Solarzellen vor. Die Pedale sind weit vor dem Körper und ein angenehmer, weicher „Sessel“ mit breiter Rückenlehne ermöglicht, dass man zum Beschleunigen oder beim Bergfahren mächtig in die Pedale steigen kann. Die Sitzhöhe ist etwas höher als bei einem normalen Sessel und ermöglicht so eine immer noch gute Rundumsicht. Man sieht schön über die Motorhauben der Autos hinweg. Durch die niedrige, langgestreckte Sitzposition und den kleinen Reifen sinkt der Luftwiderstand beträchtlich. Bei einem horizontalen Solarzellendach wird der  $c_wA$ -Wert im Bereich eines Tourenfahrrades liegen. Aufgrund dessen, dass weder ein geeignetes Solarmodul noch ein passendes Liege-Sesselfahrrad günstig zu bekommen waren, konnten diese Pläne nicht umgesetzt werden.

Von richtigen Liegerädern ist wiederum abzuraten. Sie haben zwar den günstigsten  $c_wA$ -Wert der unverkleideten Fahrräder, sind aber eher schwer im Gleichgewicht zu halten. Vor allem beim Anfahren bereiten sie so manchem Schwierigkeiten. Um ein geeignetes Liegerad zu finden fuhr ich sogar zur Liegerad-Europameisterschaft 2002 nach Lelystad in Holland. Dort gab es einen Testparcours, wo Lang-, Kurz-, Tief- und Sesselliegefahrräder mit Ober- oder Unterlenker und die verschiedensten Dreiradkonstruktionen zum Testfahren bereitstanden. Übrigens erwies sich, dass ein kurzes Liegerad mit hohem Sessel und Oberlenker leichter fahrbar ist, als ein herkömmliches Rad, weshalb es für das Schneckenrennen eingesetzt wurde.

Als Designvorschlag würde ich ein kurzes Liegedreirad nennen, das vorne zwei Räder hat und wo der Sitz etwa in Sesselhöhe ist. In dieser Position ist es problemlos möglich, über die Motorhauben normaler Autos hinweg zu sehen. Der Luftwiderstand eines solchen, unverkleideten Rades wird im Bereich eines normalen Trekkingrades liegen. Durch den tiefen Schwerpunkt können herkömmliche, kristalline Solarzellen mit hagelsicherem Glas als Träger dienen. Befinden sich vorne zwei Räder, dann bietet sich ähnlich wie bei einem Auto die

Möglichkeit, Lenkmechanismen zu konstruieren, die eine bessere Kurvenstabilität bieten. Doch dies zu erläutern würde zu weit führen.

Fahrräder dürfen sogar vier Reifen besitzen. Von entsprechenden Fahrradkonstruktionen sind mir etwa eine handvoll verschiedener Typen bekannt. Meist handelt es sich dabei um zwei- bis viersitzige Fahrzeuge, die aufgrund der für Maximalbelastung ausgelegten Karosserie ziemlich schwer sind. Selbst wenn es nur für eine Person ausgelegt würde, wäre eine schwerere Konstruktion nötig, um genügend Verwindungssteifigkeit zu gewährleisten. Um jedoch mit wenig Leistung auszukommen, sollte das Gewicht möglichst gering gehalten werden. Außerdem käme man damit schon eher in den Bereich von Microcars.

### 4.1.2 Motor und Motorregelung

Elektrische Maschinen werden nach Stromart wie z.B. Gleich-, Wechsel- und Drehstrom als auch nach Wirkungsweise wie asynchron oder synchron unterteilt. Die Haupttypen werden wiederum in unterschiedliche Bauarten unterteilt. Je nach Leistungs- und Anwendungsbereich haben sich einfachere oder effizientere Maschinen durchgesetzt. Um einen kurzen Überblick zu gewähren, wird auf die wichtigsten heute verwendeten Maschinen und Funktionsprinzipien kurz eingegangen.

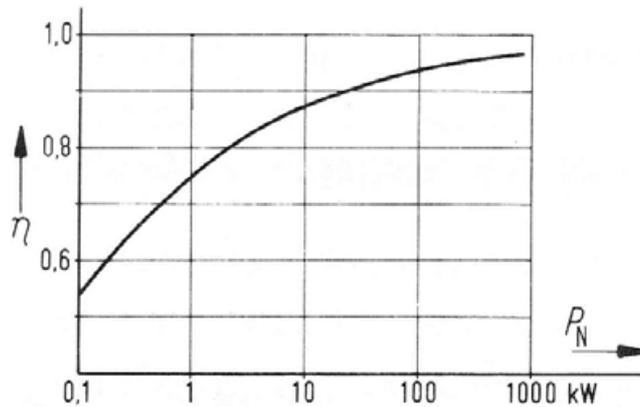


Bild 4.1: Mittlerer Wirkungsgrad elektrischer Maschinen bei Nenndrehzahl [4.4]

Wie das Bild zeigt, liegen die Wirkungsgrade für Motoren zwischen 100 und 1000 Watt im Bereich von 55% bis 75%. Grund dafür ist oft der, dass Aufwand und Kosten, hoch effiziente, kleine Motoren zu bauen, in keinem Verhältnis zum Nutzen durch Energieeinsparung stehen. Dass es dennoch möglich ist, bei langsam drehenden Motor einen Wirkungsgrad von über 95% zu erzielen, zeigen die Motoren von Solarrennfahrzeugen.

	<b>Honda</b>	<b>Biel</b>	<b>NTU</b>
Nennleistung in Watt	1500	1400	1400
Nenndrehzahl in $\text{Min}^{-1}$	1000	900	600
Nenndrehmoment in Nm	14,3	14,9	22,3
Wirkungsgrad	95%	95%	92%
Gesamtmasse in kg	12,8	12,0	16,5

Tabelle 4.6: Langsam drehende, hoch effiziente Elektromotoren von Solarrennmobilen [4.5]

Stromart	Stromwende- maschinen	Asynchron- maschinen	Synchron- maschinen	Haupt Einsatzgebiet	Leistungs- bereich
Gleich- strom	Dauermagnetmotor			Spiezeug, Feinwerktechnik, Servoantriebe	1 - 10 W
	Scheibenläufermotor			Servoantriebe für hohe Dynamik	100 - 1000 W
	Reihenschlußmotor			KFZ-Startermotoren; Fahrmotoren in Bahnen	0,3 - 15 kW 10 - 500 kW
	Fremderregter Motor			Werkzeugmaschinen, Hebezeuge, Förderanlagen	10 - 100 kW 10 - 1000 kW 0,1 - 9 MW
Wechsel- strom	Universalmotor			E-Werkzeuge, Staubsauger, ...	50 - 2000 W
		Kondensatormotor		Industriemotoren, Haushaltsgeräte, Pumpen, ...	50 - 1500 W 100 - 2200 W
		Spaltnotor		Pumpen, Gebläse	5 - 150 W
			Hysteresemotor	Uhrwerke	1 - 20 W
			Reluktanzmotor	Spindelantriebe, Textilmaschinen	50 - 1000 W
			Dauermagnetläufer	Hilfsantriebe, Schreiber, ...	1 - 10 W
Dreh- strom	Reihenschlußmotor			Fahrmotor	0,1 - 1000 MW
		Kurzschlußläufer		Pumpen, Gebläse, Werkzeuge, Kälte- maschinen, Kesselspeisepumpen	0,5 - 1200 kW 0,1 - 10 MW
		Kurzschlußläufer mit Umrichter		Antriebe für Werkzeugmaschinen	10 - 50 kW
		Schleifringläufer		Hebezeuge, Pumpen, Verdichter	20 - 1300 kW
		Linearmotor		Fördertechnik, Schnellbahnen	0,1 - 100 kW
			Schenkelpolmaschine	Notstromgeneratoren, Generatoren in Wasserkraftwerken	5 - 100 kW 0,1 - 800 MW
			Dauermagnetläufer	Servoantriebe, Textilmaschinen	0,5 - 10 kW
			Vollpolmaschine	Generatoren in Wärmekraftwerken	100 - 1500 MW
		Läufergespeister Nebenschlußmotor		Papierverarbeitungsmaschinen, Textilmaschinen	1 - 150 kW
	Impul- strom			Schrittmotor	Positionierantriebe
			Elektronikmotor	Feinwerktechnik, Textilindustrie	1 - 50 W

Tabelle 4.7: Übersicht über die wichtigsten elektrischen Maschinen [4.4]

Herkömmliche Motoren werden gerne als „hart“ oder „weich“ bezeichnet, womit das Drehzahl-Drehmomentverhalten gemeint ist. Hart ist, wenn die Drehzahl sich bei Belastung nur sehr gering verändert und die Stromaufnahme steigt. Weich ist, wenn die Drehzahl sich bei Belastung stark vermindert.

Harte, näherungsweise lineare Kennlinien besitzen elektrische Maschinen, bei denen das Drehzahl-Drehmomentverhalten ähnlich einer Nebenschlussmaschine ist. Dies ist typisch für

Gleichstromnebenschlussmaschinen. Drehstromasynchronmotor zeigt im Bereich der Leerlauf- und Nenndrehzahl ebenfalls Nebenschlussverhalten.

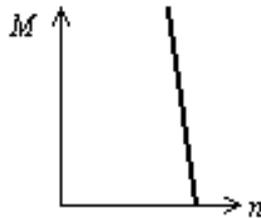


Bild 4.2: Nebenschlussverhalten

Weiches Verhalten ist typisch für Gleichstromreihenschlussmaschine oder für Universalmotoren, wie sie beispielsweise in Heimwerker-Bohrmaschinen eingesetzt werden. Elektrische Maschinen mit weichem Drehzahl-Drehmomentverhalten besitzen eine hyperbolische Kennlinie, bei der sich die Drehzahl bei Belastung stark ändert.

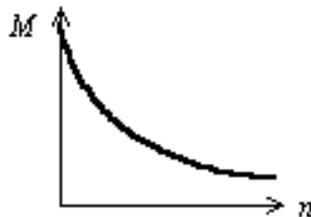


Bild 4.3: Reihenschlussverhalten

Autofahrer wünschen sich, immer mit konstanter Geschwindigkeit nahe der Geschwindigkeitsbeschränkung fahren zu können. Dem würde eine Motor mit Nebenschlussverhalten entgegen kommen. Im Elektromobil bedeutet das leider Einbusen bei der Reichweite aufgrund schlechteren Gesamtwirkungsgrades. Ist jedoch ein gutes Anfahrvermögen auf Steigungen und ein hohes Beschleunigungsvermögen gefragt, so trifft die Wahl eindeutig auf einen Motor mit Reihenschlussverhalten. Im Falle von Motoren mit Frequenzumrichtern spielt die Härte eine untergeordnete Rolle, da hier Leistungsaufnahme und somit auch die Leistungsabgabe durch die Elektronik begrenzt werden.

Zuerst wurde darüber nachgedacht, eine geeignete Permanent erregte Synchronmaschine (PSM) für das Fahrrad auszulegen, da dieser Motortyp höchste Wirkungsgrade bei größtmöglichem Leistungsgewicht verspricht. Durch die reichhaltige Erfahrungen von Herrn Assistenzprofessor Aschenbrenner des Institutes für Elektrotechnik an der Montanuniversität ist eine relativ einfache Konstruktion sichergestellt.

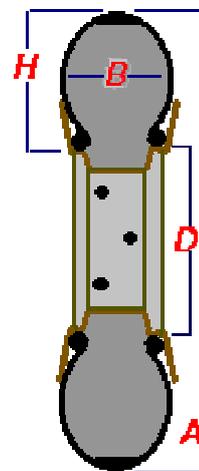
Nachteil dieses Motortyps ist, dass zur Steuerung dieses Motor eine Drehzahlmessung notwendig ist. Bei sensorlosen Ausführungen besteht die Gefahr, dass der Motor in die falsch Richtung anläuft. Der optimale Leistungsbereich liegt bei Drehzahlen zwischen 500 und 10000 Umdrehungen pro Minute. Dies macht eine Untersetzungsgetriebe fast unumgänglich. Wegen der Eisenverluste, welche auch im Leerlauf auftreten und ein Rangieren des Rades erschweren, ist es üblich, einen Freilauf zu integrieren.

Zur Steigerung des Anfahrmomentes wurde überlegt, ein stufenloses Getriebe einzubauen. Einfache, stufenlose Getriebe sind z.B. in manchen kleinen Waschmaschinen eingebaut und als Ersatzteil um etwa 40 € zu haben. Hierbei ist die Verwendung eines Keilriemens zur Kraftübertragung unerlässlich. Bei ausreichender Dimensionierung kommt man auf Baugrößen, die nicht mehr so ohne weiteres in einer Radnabe integrierbar sind. Dies war auch der Grund, weshalb von diesem Lösungsweg wieder abgegangen wurde.

#### Abschätzung der Nenndrehzahl

Ganz allgemein kann die Nenndrehzahl aus Zielgeschwindigkeit und Radumfang berechnet werden. In Österreich liegt das gesetzlich festgesetzte Geschwindigkeitslimit für Elektrofahrräder bei 20 km/h, wobei die Leistung des elektrischen Hilfsmotors 400 W nicht überschreiten darf. Für Pedelecs gilt ab Nov. 2003 eine neue EU-Richtlinie, die besagt, dass die Hilfsleistung maximal 250 W betragen darf, mit höher werdender Geschwindigkeit reduziert und über 25 km/h abgeschaltet werden muss. Da diese Definition nicht ganz eindeutig ist, werde ich mich an die alte Deutsche Regelung halten, bei der bis 20 km/h volle Motorleistung zur Verfügung stehen darf und erst darüber gleichmäßig reduziert werden muss.

Beim den Reifendurchmessern gibt es noch größere Unterschiede. Für die etwa 42 verschiedenen Größen gibt es 4 verschiedene, in Europa übliche Bezeichnungen. Die von der "European Tire and Rim Technical Organisation" (ETRTO) erzielte Normbeschreibung lautet Querschnittsbreite B und Felgendurchmesser am Reifensitz D in Millimeter. Dies hat den großen Vorteil, dass der Wert D leicht nachgerechnet werden kann, indem man den Umfang der Felge am Reifensitz mit. Durch Pi dividiert ergibt das den leicht zu messenden Innendurchmesser des Reifens. Wozu die Querschnittsbreite angegeben wird, ist mir nicht klar. Vermutlich soll sie größer als die Felgenbreite am Reifensitz D sein. Der für Radcomputer nötige Umfang wird am besten bei normaler Belastung als zurückgelegter Weg pro Radumdrehung gemessen. Gegenüber den alten Bezeichnungen hat das den Vorteil, dass dieser Wert genauer ist und dass nicht über die leider üblichen, ungenauen Umfangs- oder Durchmesserangaben gerätselt werden muss.



Bei Zollangaben muss zwischen deutscher und englischer Reifengrößenangabe unterschieden werden. Die deutschen Angaben beziehen sich auf Außendurchmesser des Reifens A, Breite B und Höhe des Reifens H an, wogegen bei der englischen Beschreibung Höhe mal Breite vertauscht in umgekehrter Reihenfolge angegeben werden.

Die mit der ETRTO-Norm leicht zu verwechselnden, französischen Reifengrößen sind zwar ebenfalls in mm angegeben, beziehen sich aber auf Außendurchmesser A mal Breite B. Der markanteste Unterschied für Ungeübte liegt darin, dass bei französischen Angaben zuerst eine größere, dreistellige Zahl vor einer kleineren, zweistelligen kommt. [4.6]

Zur Vereinfachung wird hier von den alten Zollangaben ausgegangen. Der Fehler beim Umrechnen auf den pro Radumdrehung zurückgelegte Weg wird vernachlässigt. Es wird nur auf 20“, 26“ und 28“ Räder eingegangen, da das die am meist verwendeten Radgrößen sind.

Die Drehzahl für die Höchstgeschwindigkeit  $n_{vmax}$  in Umdrehungen pro Minute lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$n_{vmax} = \frac{v_{max}}{3,6} \cdot \frac{60}{D \cdot 0,0254 \cdot \pi}, \quad \{4.6\}$$

wobei  $v_{max}$  in km/h und  $D$  in Zoll einzusetzen ist.

Bei Pedelecs darf die maximale, vom Elektromotor zur Verfügung gestellte Leistung 250 W nicht überschreiten, muß bis 25 km/h allmählig reduziert werden und muss ferner über 25 km/h abgeschaltet werden. Üblicherweise wird bei 20 km/h die meiste Leistung zur Verfügung gestellt, im Bereich von 20 bis 25 km/h reduziert und über 25 km/h abgeregelt. Daraus lässt sich in Abhängigkeit vom Durchmesser ein maximal wirksames Drehmoment bei 20 km/h folgendermassen berechnen:

$$M_{20km/h} = \frac{P_{max}}{v/3,6} \cdot \frac{D \cdot 0,0254}{2}, \quad \{4.7\}$$

wobei wiederum  $v$  in km/h und  $D$  in Zoll einzusetzen ist.

	E-Bike	Pedelec	E-Bike	Pedelec	E-Bike	Pedelec
erlaubte Leistung $P_{max}$ [W]	400	250	400	250	400	250
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	20	25	20	25	20	25
Reifendurchmesser [Zoll]	20	20	26	26	28	28
Höchstdrehzahl [U/Min]	209	261	161	201	149	186
Moment (20 km/h, $P_{max}$ ) [Nm]	18,3	11,4	23,8	14,9	25,6	16,0

Tabelle 4.8: Es ist sehr schön zu erkennen, dass die Drehzahlen in einem extrem niedrigen Bereich angesiedelt sind, während die Momente sehr hohe Werte erreichen.

Gemäß den Abschätzungen in Kapitel 2, wird für ein Solarfahrrad mit 150 kg Gesamtmasse bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h auf ebener Fahrbahn und bei Windstille nur etwa 127 W Antriebsleistung benötigt. Bei einer Unterstützung von 250 W kann also ein kleiner Berg mit voller Geschwindigkeit befahren werden. Mit dem selben Formalismus kommt man bei 20% Steigung und 2 km/h auf 168 W Leistungsbedarf. Diese Geschwindigkeit entspricht langsamen Gehen und soll zeigen, dass Anfahren auf bergigem Gelände mit Tretunterstützung möglich ist. Für die weiter Kalkulation gehe ich davon aus, dass 100 W Leistungsunterstützung vom Motor zur bereitgestellt wird.

	Fahrrad	Pedelec	E-Bike	Pedelec	E-Bike	Pedelec
Geschwindigkeit [km/h]	2	2	2	2	2	2
Reifendurchmesser [Zoll]	20	20	26	26	28	28
Drehzahl Rad [U/Min]	21	21	16	16	15	15
Moment (100 W) [Nm]	46	46	59	59	64	64
Leistung (50 Nm) [W]	109	109	84	84	78	78
Gesamtmasse [kg]	150	150	150	150	150	150
Steigfähigkeit (50 Nm)	13,4%	13,4%	10,3%	10,3%	9,6%	9,6%
Steigfähigkeit (100 W, 2 km/h)	12,2%	12,2%	12,2%	12,2%	12,2%	12,2%

Tabelle 4.9: Bei niedrigen Geschwindigkeit tritt das höchste Moment auf, wobei hier die Leistung beider Fahrradtypen auf 100 W reduziert wurde. Wirkungsgrade wurden nicht berücksichtigt..

Man sieht, dass bei herkömmlichen Elektromotoren ein ausreichend dimensionierte Getriebe nötig ist. Weil das Moment direkt proportional zur Leistung ist, die wiederum bei so kleinen Geschwindigkeiten fast ausschließlich von der Steigung abhängt, haben die meisten Elektrofahrräder eine geringere Steigfähigkeit.

Die Konsequenz aus diesen Überlegungen ist folgender Drehmoment- und Leistungsbereich:

46 Nm bei 21 U/Min – 18 Nm bei 210 U/Min.

Bei Verdoppelung der Leistung durch den Menschen kann in doppelt so steilem Gelände angefahren werden.

### Auslegung einer permanent erregten Synchronmaschine (PSM)

Ursprünglich wurde darüber diskutiert, einen eigenen Motor zu konstruieren und in das Fahrzeug einzubauen. Bei der Konstruktion wurde von vorhandenen Neodym-Eisen-Bor Magneten ausgegangen und versucht damit einen Motor in der Größe vergleichbarer 500 W Drehstrommotoren zu entwickeln. Durch Ändern von Strangspannung, Strangstrom bei vorgegebenem Moment und Drehzahl wurde mittels eines Quick Basic Programms von Assistenzprofessor Aschenbrenner versucht, auf einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu kommen. Die gefundenen Werte wurden in eine Tabelle eingetragen und in einem Diagramm dargestellt. Als Abszissenwert wurde die Drehzahl gewählt.

Die Arbeit war trotz des Programms ziemlich aufwendig, da exakte Werte nur durch probieren gefunden werden konnten. Für ein vorher gewähltes Drehmoment im Bereich von 0,5 bis 5 Nm wurden versucht, möglichst viele Lösungen zu finden. Der Drehzahlbereich erstreckte sich von teilweise unter 500 bis über 10'000 U/Min. Im Bereich niedrigerer Drehzahlen (unter 500 U/Min) konnten kaum noch Lösungen gefunden werden.

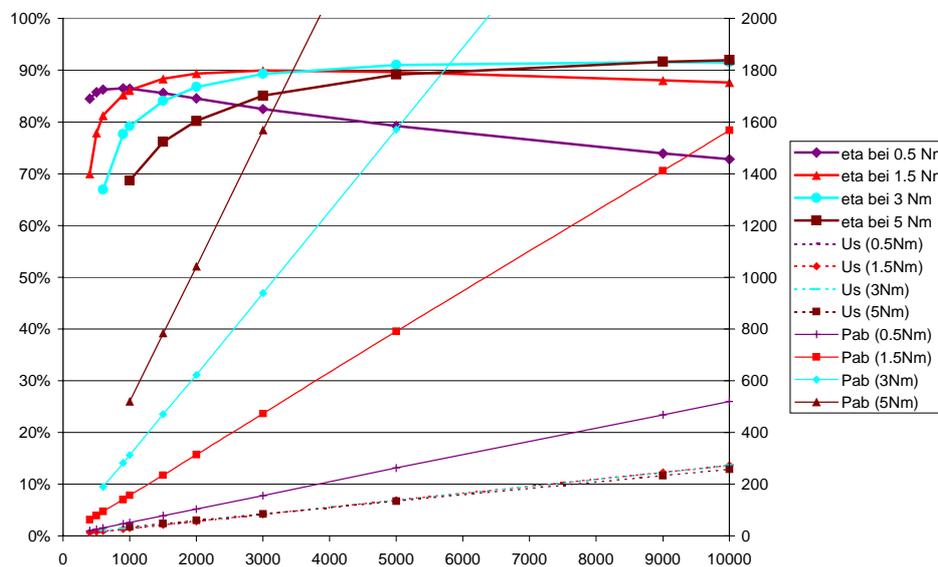


Diagramm: Wirkungsgradverläufe bei verschiedenen Drehmomenten einer PSM

Aus obigen Diagramm ist sehr schön zu erkennen, dass die Drehzahl mit der Strangspannung linear zunimmt. Bei 3 Nm erreicht diese Maschine den besten Wirkungsgrad. Dieser liegt 9'000 U/Min bei etwa 91,6% und 12,2 V Strangspannung sensationell hoch. Der Strangstrom

erreicht knapp 84,6 A und liegt mit  $7,45 \text{ A/mm}^2$  im erträglichen Bereich. Die mechanisch abgegebene Leistung liegt bei  $2'836 \text{ W}$  und damit weit über dem gesetzlich erlaubten  $250 \text{ W}$ . Die elektrische Aufnahmeleistung liegt bei  $3096 \text{ W}$ , die gesamte Verlustleistung bei etwa  $260 \text{ W}$ . Auch der Wert für die Verlustleistung ist zu hoch, wenn man bedenkt, dass die Abwärme nach außen abgeführt werden muss. Um den Motor vor Regen zu schützen und dennoch einfach zu konstruieren, muss dieser ohne Zwangskühlung auskommen. Wärmeabgabe an der Gehäuseoberfläche durch Strahlung und Konvektion müssten einen halbstündigen Betrieb zulassen. In diesem Fall käme es zu thermischen Problemen.

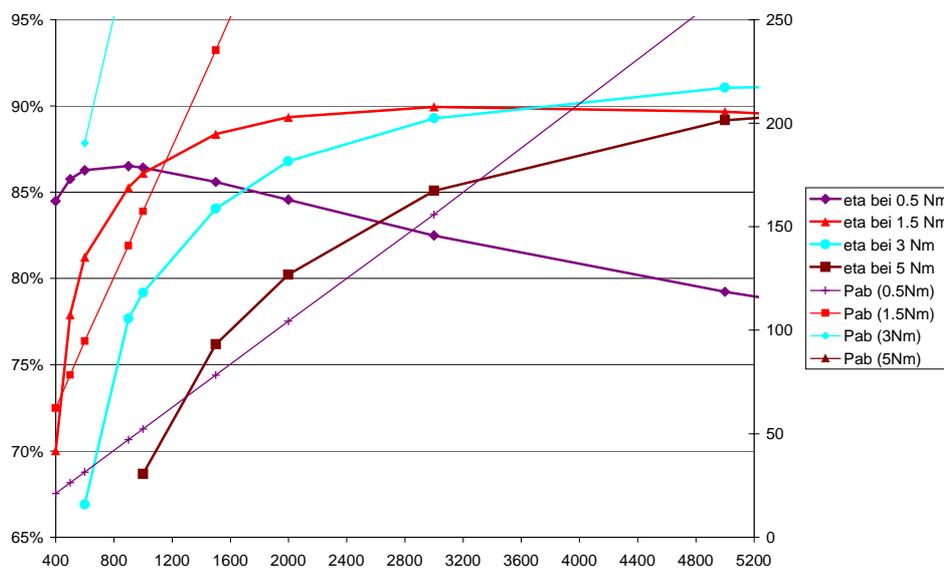


Diagramm: Detailansicht des in Frage kommenden Motordrehzahlbereichs bei einer Untersetzung von 19:1

Für das Solarfahrrad sollten dennoch herkömmliche Motoren verwendet werden, da sich die Konstruktion und der Bau zeitlich nicht durchführen ließ. Bei den Elektrofahrradantrieben ist auffällig, dass immer mehr Radnabenmotoren verwendet werden. Für diese Arbeit wurde ein Scheibenläufermotor der österreichischen Firma Schachner organisiert. Der Motor wird exklusiv für Schachner in Taiwan gefertigt. Zu Vergleichszwecken wurde um einen Radnabenmotor von der deutschen Firma Heinzmann nachgefragt. Beide Motoren sind Gleichstrommaschinen mit Bürstenkontakten und besitzen in der Radnabe ein Stirnradgetriebe. Heinzmann bietet dabei die größere Auswahl und produziert auch Motoren mit Kunststoffgetrieben, welche sich durch besonders ruhigen Lauf auszeichnen. Leider ist die Dokumentation über diese beiden Motoren sehr dürftig, so dass eigene Messungen gemacht werden mussten.

### 4.1.3 Energiespeicher

Dieses System arbeitet mit elektrischer Energie. Idealerweise sollte deswegen ein Speicher für elektrische Energie verwendet werden. Streng genommen geht das nur mit Kondensatoren. Diese haben die höchste Leistungsdichte und Lebensdauer (um die 500.000 Zyklen). Mit guten Kondensatoren kommt man kam auf Energiedichten von 5 Wh/kg. Bei einem Verbrauch von 7 Wh/km in der Ebene und bei Windstille käme man mit einer 7 kg schweren Kondensatorbatterie keine 5 km weit. Für eine Reichweite von 50 km müsste man also 70 kg an Kondensatoren mitführen, wobei das Gewicht des Einbaurahmens und das der Verkabelung noch nicht mit eingerechnet wurde.

Bei allen anderen Energiespeichern findet eine Umwandlung in eine andere Energieform statt. Bei Batterien oder Akkumulatoren (Akkus) wird die elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt. Bei primären Zellen entsteht durch chemische Reaktionen ein Potentialunterschied an den Elektroden, der zur Versorgung eines elektrischen Verbrauchers herangezogen werden kann. Bei sekundären Zellen ist dieser Vorgang reversibel, d.h., es kann eine leere Zelle durch anlegen elektrischer Spannung an den Elektroden wieder aufgeladen werden.

#### Kondensatoren

Bei den Kondensatoren gab es durch neue Materialien einen Kapazitätssprung, der sie für Elektrofahrzeuge als Zwischenspeicher von Bremsenergie interessant werden lässt. Ein Ultra-Kondensator mit einer Nennspannung von 2,5 V hat bei 0,4 kg Masse eine Kapazität von 1800 F [4.17]. Auch wenn dies im Vergleich zu herkömmlichen Elektrolytkondensatoren erstaunlich viel ist, ist die spezifische Energie zu gering, um als Energiespeicher zu dienen. Die spezifische Leistung ist aber derart hoch, dass diese Kondensatoren bei manchen Elektrofahrzeugkonstruktionen als Zwischenspeicher von Bremsenergie dienen. Beim Vergleich der Produkte mehrerer Hersteller (Maxwell, Montena, Sanyo, Siemens) fällt auf, dass die spezifische Energie einer Batterie aus mehreren Kondensatoren etwa 2 bis 5 Wh/kg erreicht. Laut Herstellerfirmen soll die spezifische Energie von Einzelkondensatoren auf bis zu 10 Wh/kg bei einer spezifischen Leistung von 1000 W/kg kommen. Einer der größten Vorteile liegt darin, dass bei Kondensatoren die elektrische Energie nicht wie bei den Akkus in chemische Energie umgewandelt werden muss, weshalb die Zyklenlebensdauer ca. 1000 Mal höher ist.

#### Batterien allgemein

Unter Batterie versteht man übrigens den Zusammenschluss mehrerer Einheiten. In unserem Fall bestehen die Einheiten aus elektrochemischen Zellen, die entweder nur entladen oder

auch wieder aufgeladen werden können. Primären Zellen sind in der Regel nicht wiederaufladbar, wie z.B. Zink-Luft Batterien oder die weitverbreitete Alkalibatterie. Das Zellpotential einer Alkalizelle beträgt 1,5 V.

Trotzdem können herkömmliche Alkalizellen in manchen Fällen mit einem geeigneten Ladegerät zumindest aufgefrischt (teilweise Wiederaufladung) werden. Mit dieser Technik habe ich selbst z.B. die Alkalizellen meines Taschenrechners, die ich früher etwa alle sechs Monate wechseln musste, nun schon fast drei Jahre in Gebrauch. In dieser Zeit hatte ich sie öfters aufgeladen. Die amerikanische Firma Rayovac verkauft seit Jahren solche wiederaufladbare Alkali-Batterien, bei denen man von einer Lebensdauer von 25 Zyklen bei Totalentladung und über 100 Zyklen bei Teilentladung ausgeht. Leider war auf der Homepage keine Information über das Entlade- und Ladeverhalten dieser wiederaufladbaren Alkalibatterien zu finden. Der Beschreibung zufolge dürften sie ähnliche Leistungen wie normale Alkalibatterien aufweisen, welche bei einer spezifischen Leistung von 5 W/kg eine geschätzte, spezifische Energie von 70 Wh/kg haben dürften. Alleine aufgrund der geringen spezifischen Leistung und des starken Spannungsabfalls sind diese Batterien gänzlich ungeeignet und kommen nicht einmal als „Einwegprodukt“ in Frage.

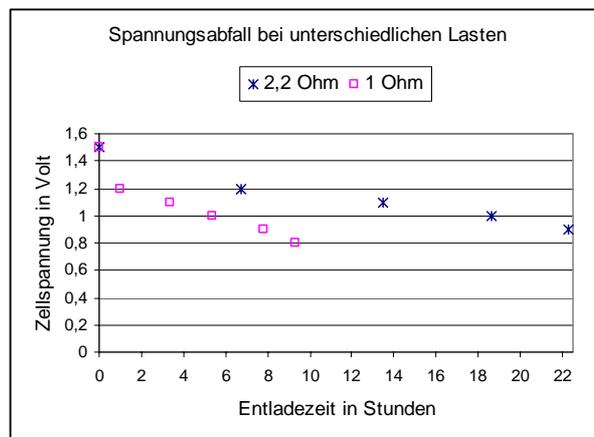


Bild 4.4: Rayovac #813 Alkaline Battery Size D. Primäre Zellen. Nicht wiederaufladbar. [4.7]

Ähnlich dem System von Rayovac entwickelte AccuCell aus Deutschland eine Alkali-Mangan-Batterie, welche 100te Male wiederaufladbar ist, sofern sie nie ganz entladen wurde. Geladen werden die AccuCell mit speziell entwickelten Ladegeräten. Ja nach Ladezustand können die Batterien in ein bis zwei Stunden oder schneller geladen werden.

Kathode (Mangan-Dioxid)	$MnO_2 + H_2O + e^- \rightleftharpoons MnOOH + OH^-$
Anode (Zink-Pulver)	$Zn + 2OH^- \rightleftharpoons ZnO + H_2O + 2e^-$
Gesamtreaktion	$Zn + 2MnO_2 + H_2O \rightleftharpoons ZnO + 2MnOOH$

Tabelle 4.10: Chemische Reaktionen, wie sie in Alkali-Mangan-Batterien ablaufen [4.8]

Mono (D) Zellen	Alkaline	Zink-Carbon	NiMH	NiCd	AccuCell
Spannung	1,5 V	1,5 V	1,2 V	1,2 V	1,5 V
Selbstentladungsrate (21 °C)	ca. 0,2 %	ca. 0,4 %	ca. 25 %	ca. 20 %	ca. 0,2 %
Lagerfähigkeit	5 Jahre	2 Jahre	-	-	5 Jahre
Lieferzustand	volle Kapazität	volle Kapazität	teilentladen	teilentladen	volle Kapazität
Umweltbelastung	Hoch	Hoch	Mittel	Hoch	Sehr gering
Ladezyklen	1 (Einweg)	1 (Einweg)	50-500+	50-500+	50-500+
Memory-Effect	-	-	Ja, gering	Ja	Nein
Solaranwendung	Nicht geeignet	Nicht geeignet	Nicht gut geeignet	Nicht gut geeignet	Sehr gut geeignet
Startkapazitäten:	12000	3000	5000	4000	8000
Gewicht					123 g

Tabelle 4.11: Ein von AccuCell angestellter Vergleich verschiedener Batteriesysteme. [4.8]

Die wiederaufladbaren Alkali-Mangan-Batterien oder RAM-Zellen eignen sich bestens für Niederstromanwendungen wie z.B. kleine Radios oder Walkman oder leistungsschwache Solaranwendungen, da dieser Batterien keinen Memoryeffekt kennen.

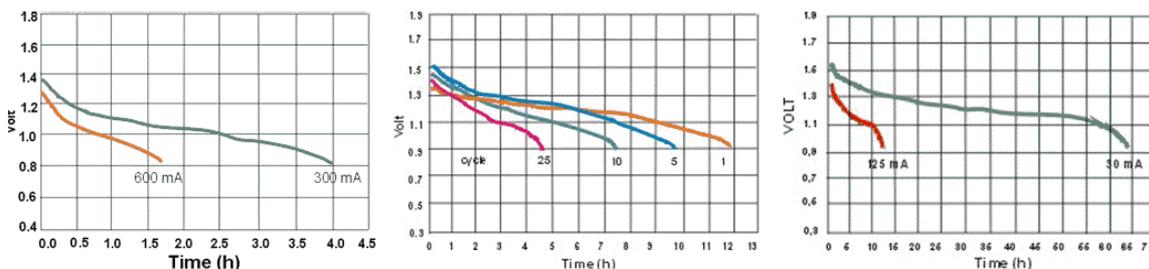


Bild 4.5: Links und rechts: Entladekennlinien bei unterschiedlichen Entladeströmen. Mitte: Entladekennlinie nach 1, 5, 10 und 25 Ladezyklen mit 125 mA Entladestrom.

Sekundäre Zellen sind wiederaufladbare Zellen. Meist wird eine Lebensdauer zwischen 100 und 5000 Zyklen bei Vollentladung ausgegangen. Je nach Chemismus weisen Einheitszellen ein unterschiedliches Zellpotential auf. Die älteste und am weitesten verbreitete Sekundärzelle ist die Bleibatterie. Das Zellpotential beträgt hier 2 V. Im Elektronikbereich sind Nickel-Cadmium-Zellen (NiCd-Zellen) am weitesten verbreitet. Sie weisen genauso wie die Nickel-Metallhydrid-Zellen (NiMH-Zellen) ein Zellpotential von 1,2 V auf, haben aber im Vergleich zu den NiCd-Zellen keinen Memoryeffekt und eine etwas höhere Speicherdichte. Dafür sind

sie auch etwas teurer. Durch den Mobiltelefonboom in den letzten Jahren würde die Entwicklung der teuren, wiederaufladbaren Litium-Zellen vorangetrieben. Je nach Elektrolyt und Elektrodenkombination haben Litiumzellen eine Zellspannung zwischen 1,2 und über 2 V. Litiumzellen haben unter den einfachen, billigen Akkus die höchste Energiedichte. Die Leistungsdichte liegt zwar noch weit hinter der von guten NiCd-Zellen, konnte aber mittlerweile so weit gesteigert werden, dass z.B. Li-Ion-Zellen in Elektrofahrrädern Anwendung finden.

1997 waren die NiMH-Akkus von Ovonic eine der stärksten, wiederaufladbaren Zellen mit über 50 Wh/kg. Ende 1997 fand ich auf der Homepage [4.9] folgende, nicht genauer spezifizierte Angaben:

Ovonic NiMH Battery Packs for Electric Vehicles  
 ...  
 Current Technology Ovonic NiMH EV Battery Packs Provide:  
 \* Long Cycle Life (over 800 full charge/discharge cycles -- can provide 150,000 mile pack operating life)  
 \* Fast Recharge Capability (up to 60% of capacity in 15 minutes)  
 \* High Power Delivery (giving rapid acceleration limited only by vehicle design)  
 \* High Energy Density (>80 Wh/kg is twice the performance of conventional lead acid batteries giving long driving range)

Heute finden sich auf der Homepage von Ovonic fünf verschiedene, kommerziell erhältliche Typen, bei denen die mit Wasser gekühlten Varianten auf Kosten der Energiedichte höhere Ströme gestatten. Da eine Wasserkühlung für eine Solarfahrrad aufgrund des unmäßigen Aufwandes für das Kühlsystem unsinnig sind, will ich nur die luftgekühlten Varianten vorstellen. Bei den luftgekühlten Batterien liegt die Leistung weit über dem benötigten Maß. Von der Kapazität würden sie sich wunderbar eignen.

		<b>13EV85</b>	<b>12HEV50</b>
Nennspannung	V	13,2	12
Kapazität (C/3)	Wh	1200	600
Masse	kg	17,6	12,2
Spezifische Energie	Wh/kg	68	50
Energiedichte	Wh/dm <sup>3</sup>	165	125
spezifische Leistung bei 80% Entladung	W/kg	150	650
Leistungsdichte bei 80% Entladung	W/dm <sup>3</sup>	430	1586

EV ... Electric Vehicle, HEV ... Hybrid Electric Vehicle

Tabelle 4.12: Spezifikationen der NiMH-Batterien von Texaco Ovonic Battery Systems LLC [4.10]

Batteriesystem	Negative Elektrode	Positive Elektrode	Elektrolyt	Nennspannung [V]	Theoretische spez. Energie [Wh/kg]	Übliche spez. Energie [Wh/kg]	Übliche Energiedichte [Wh/dm <sup>3</sup> ]	Eigenschaften
Blei-Säure	Pb	PbO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2	252	35	70	schwer, wenig Zyklen, giftige Materialien
Nickel-Eisen	Fe	NiOOH	KOH	1,2	313	45	60	schwer, wartungsaufwendig
Nickel-Cadmium	Cd	NiOOH	KOH	1,2	244	50	75	giftige Materialien, hohe Wartungskosten
Nickel-Hydrogen	H <sub>2</sub>	NiOOH	KOH	1,2	434	55	60	Kosten, hoher Wasserstoffdruck, sperrig
Nickel-Metalhydrid	H (als MH)	NiOOH	KOH	1,2	278 – 800 (je nach MH)	70	170	Kosten
Nickel-Zink	Zn	NiOOH	KOH	1,6	372	60	120	wenig Lebenszyklen
Silber-Zink	Zn	AgO	KOH	1,9	524	100	180	Sehr teuer, kurze Lebensdauer
Zink-Luft	Zn	O <sub>2</sub>	KOH	1,1	1320	110	80	geringe Leistung, begrenzte Zyklenzahl, sperrig
Zink-Brom	Zn	Bromidkomplex	ZnBr <sub>2</sub>	1,6	450	70	60	geringe Leistung, giftige Komponenten, sperrig
Lithium-Ion	Li	Li <sub>x</sub> CoO <sub>2</sub>	PC od. DMC mit LiPF <sub>6</sub>	4	766	120	200	Sicherheitsrisiken, begrenzte Lebensdauer, Kosten
Natrium-Schwefel	Na	S	β-Al	2	792	100	>150	hohe Temperaturen, Sicherheit, leistungs-schwacher Elektrolyt
Natrium-Schwefel-Chlorid	Na	NiCl <sub>2</sub>	β-Al	2,5	787	90	>150	hohe Temperaturen, geringe Leistung

Tabelle 4.13: Vergleich verschiedener sekundärer Zellen [4.11]

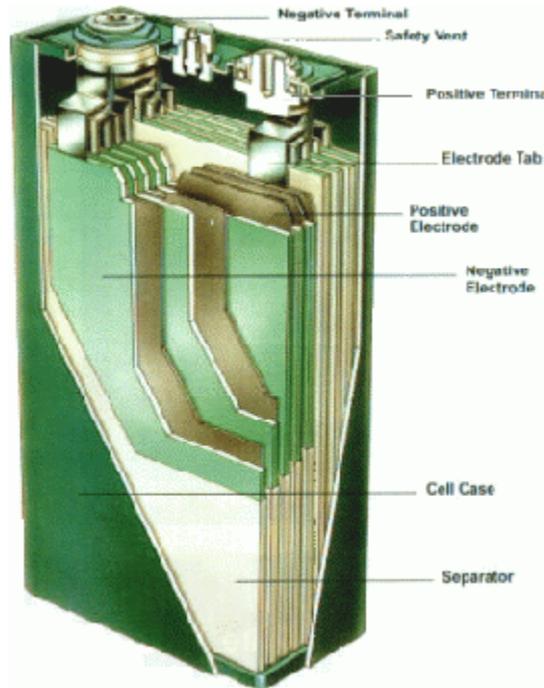


Bild 4.6: Schnitt durch einen Texaco Ovonic NiMH-Akku [4.11]

Interessant ist, dass bei einem Texaco Ovonic NiMH-Akku die Kapazität in den ersten zehn Tagen nach Vollladung bei 21 °C auf knapp über 80% fällt. Damit würde sich dieser Akku eher weniger gut für Anwendungen mit großen Standzeiten zwischen den einzelnen Ladevorgängen eignen. Bei einem Solarfahrrad wäre das wiederum egal, da der Akku ohnehin ständig nachgeladen wird. Die Akkus sollen über 1000 Zyklen bei 80%iger Entladung standhalten. Sie enthalten weder Blei, Quecksilber, Cadmium oder sonstige giftige Stoffe und können problemlos wiederverwertet werden.

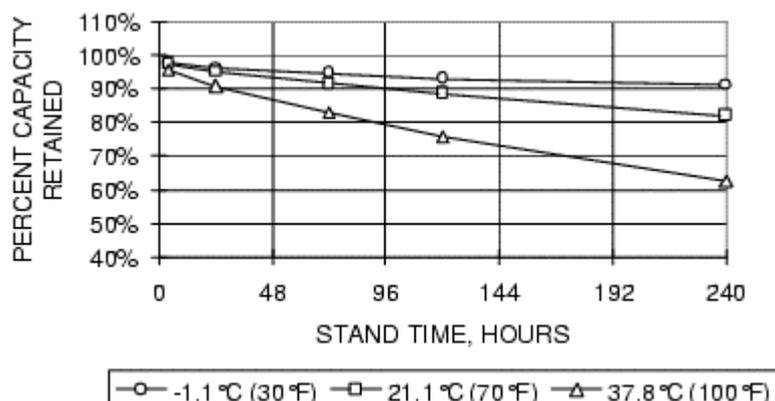


Bild 4.7: Kapazitätsverlust einer Texaco Ovonic NiMH über der Zeit [4.11]

Die nordamerikanische Firma Energy Research Corporation produzierte 1997 noch Nickel-Zink-Batterien. Ende 1997 war unter der Internetadresse <http://www.ercc.com/battery.html> folgende Information über die ERC Nickel-Zinc Battery zu finden:

Comparison of Competing Battery Technologies			
Battery Type	Approx. Cost \$/Wh	Energy Density Wh/kg	Cycle Life
ERC Nickel-Zinc	0.15-0.50	60-80	>600*
Nickel-Cadmium	0.50-1.50	55-75	1000+
* ... über 11500 bei 10% Entladetiefe			

Mittlerweile ist die Firma gänzlich auf Brennstoffzellentechnologie umgestiegen und baut ihre „Direct Fuel Cells“ für stationäre Anwendungen und Anlagen für große Schiffe. Die drei Hauptprodukte im stationären Bereich bewegen sich im Leistungsbereich von 300 kW bis 3 MW und erreichen Wirkungsgraden von 50%. 1999 wurde die Firma in Fuel Cell Energy Inc. umbenannt.

Eine andere Firma, Electric Fuel, produzieren Zink-Luft Batterien, bei denen nach jedem Entladevorgang die gesamte Batterie aus dem Fahrzeug genommen und stationär regeneriert wird. Dies ermöglicht ein „Aufladen“ des Fahrzeuges binnen weniger Minuten und wird in den USA in einem Transit-Bus erprobt. Die spezifische Energie einer frisch geladenen Batterie beträgt 200 Wh/kg, die spezifische Leistung beträgt bei 80% Entladung immerhin noch 91 W/kg. Aufgrund der Komplexität und Größe der Einheiten kommt diese Art der Energiespeicherung für Solarfahrräder nicht in Betracht. [4.12] Eine Tochter von Electric Fuel, Instant Power, fertigt Zn-Air-Einwegbatterien für Mobiltelefone, welche statt des Akkus verwendet werden können und ermöglichen eine drei bis fünf mal höhere Betriebszeit. Ein anderes Produkt dieser Firma sind Batterien, mit denen über einen Ladestecker die Originalakkus aufgeladen werden können. Dies ist besonders für Vielreisende interessant, die über längere Zeit keine Möglichkeit haben, den Akku des Mobiltelefons aufzuladen. [4.13]

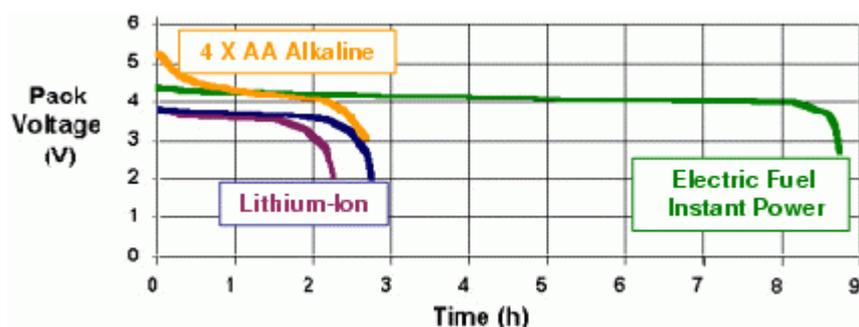


Bild 4.8: Vergleich einer Zink-Luft-Einwegbatterie mit herkömmlichen Akkus [4.14]

Ein anderer Exote unter den Akkus ist die Zebra-Batterie, die von Beta Research and Development Ltd. aus England entwickelt worden ist. Weil Zebra-Batterien erst bei einer Nenntemperatur von 270 °C arbeiten, ist ein eigenes Heizsystem und aufwendige Isolierung notwendig. Aus diesem Grund wurden nur zwei Typen entwickelt mit jeweils 17,8 kWh Kapazität und 195 kg Gewicht entwickelt. Die spezifische Energie beträgt 94 Wh/kg, die spezifische Leistung 16 W/kg. Meines Wissens wurde sogar eine Dreirädriger Kabinenroller mit exzellenten Fahrdaten entwickelt, bei dem dieser Akku das Herzstück darstellte. 1999 wurde von MES-DEA S.A. übernommen. [4.15]

Auch in Österreich wurde an einer Hochenergie-/Hochleistungsbatterie gearbeitet. Vor knapp zehn Jahren war dieses Konzept einer Zink-Fluss-Batterie eines der vielversprechendsten Technologien und fertig für die Massenproduktion. Hauptabnehmer sollte die Automobilindustrie sein, doch diese kochte ihr eigenes Süppchen. Pläne von Elektroautos, die sich in der Preiskategorie herkömmlicher Wagen bewegten, lagen auf dem Tisch. Bei einer Zellnennspannung von 1,5 V erreicht dieser Akku eine „Coulombic efficiency“ von 86-91% pro Zyklus. Die spezifisch Energie lag bei 65 bis 75 Wh/kg und die spezifische Leistung bei 90 bis 110 W/kg. Der Akku konnte in drei bis fünf Stunden wiederaufgeladen werden. Die Zink-Fluss-Batterie besitzt zwei Elektrolytkreisläufe mit zwei separaten Pumpen. Dies vereinfacht die Konstruktion nicht wirklich, weshalb dieser Akku erst für größere Kapazitäten im Bereich von 10 bis 20 kWh interessant wurde. Bei einer jährlichen Produktion von 100000 Einheiten zu je 20 kWh schätzte man die Kosten auf etwa 100 \$/kWh. Das entspricht ungefähr dem Preis von Blei-Säure-Akkus und wäre etwa dreimal günstiger als in gleichen Mengen produzierte NiCd-Zellen. Als ich heuer wegen weiterer Details nachfragen wollte, musste ich erfahren, dass die nordamerikanische Mutterfirma in Konkurs gegangen war, weshalb auch die 100%ige, österreichische Tochter die Tore schliessen musste. [4.16]

### Bleiakkumulatoren

Eine andere Alternative stellen Bleibatterien dar, weil sie wohl bekannt und billig sind. Die Gefahr einer Sulfatierung der Elektroden einer Batterie, die über 48 Stunden halbvoll geladen herumsteht, besteht in unserem Fall nicht. Das Solarfahrrad steht idealer Weise immer im Freien wodurch die Batterie praktisch täglich nachgeladen wird. Auch durch das Mehrgewicht im Vergleich zu anderen Batteriesystemen hält sich der Nachteil im Bereich von 10%. Der größte Massenanteil bezieht sich alleine auf den Fahrenden. Die Probleme bei Pb-Akkus liegen in der Zerstörung der Elektroden bei Tiefentladung, der Sulfatierung bei unvollständiger Ladung, des Kurzschlusses von Platten durch Pb-Schlammablagerungen, der Zerrüttelung des Platten durch Vibration und der Kurzschluss bei thermischer Überlastung. Darüber hinaus ist zu beachten, dass bei einem Unfall keine Gefahr durch auslaufende Säure entstehen kann.

### Blei-Säure-Akkus

Die wichtigsten chemischen Komponenten im Blei-Säure-Akku sind für die Energiespeicherung Blei (Pb) und Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Die positive Elektrode des Akkus besteht aus Bleidioxid ( $\text{PbO}_2$ ), die negative aus Schwammblei. Der Elektrolyt zwischen den Elektroden, der den Stromfluss herstellt, ist die Schwefelsäure. Sie hat ein Leitfähigkeitsmaximum bei einer Dichte von  $1,28 \text{ kg/m}^3$ , dies ist deshalb auch die typische Füllsäuredichte. Wenn die Säuredichte unter  $1,20 \text{ kg/m}^3$  sinkt, so ist der Akku nachzuladen.

Eine Zelle eines Pb-Säure-Akkus hat eine Nennspannung von 2 V und eine Entladeschlussspannung von bei 1,75 V. Eine typische Autobatterie besteht aus sechs solcher, in Serie geschalteter Zellen. Die optimale Ladespannung liegt bei 2,35 V je Zelle und sollte nicht über einen längeren Zeitraum hinweg überschritten werden, da sonst durch Elektrolyse Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff (Knallgas) zersetzt wird. Der entstehende Druck wird in der Regel durch Druckventile abgebaut, um eine Explosion oder Deformation der Zellen zu vermeiden. Durch die Ladung wird dem Elektrolyten Wasser entzogen und konzentrierte Schwefelsäure gebildet. Diese ist schwerer als das Wasser und setzt sich daher unten in der Zelle ab (Elektrolytschichtung). In der Gasungsphase (Nachladen) wird dieser Schichtung durch die aufsteigenden Gasblasen, die den Elektrolyt durchmischen, entgegengewirkt. Allerdings wird beim Gasen ein Temperaturanstieg bewirkt und der Wasser- und Energieverbrauch steigt weiter, obwohl die Zellen eigentlich schon voll geladen sind.

Bei fallender Ladung sinkt die Säuredichte im Akku, dennoch darf nie Säure nachgefüllt werden sondern nur destilliertes Wasser. Das sollte außerdem erst gegen Ende der Ladung erfolgen. Die Lagerung der Akkus muss immer im voll geladenen Zustand erfolgen. Normale Blei-Säure-Akkus verlieren bei teilentladener Lagerung an Kapazität, weil sich auf den Elektroden Sulfate abscheiden, die die aktive Oberfläche verkleinern. Bleiakkus sind besonders empfindlich gegen Tiefentladungen, weshalb sie trotz Nichtgebrauch wegen der Selbstentladung ständig nachgeladen werden müssen



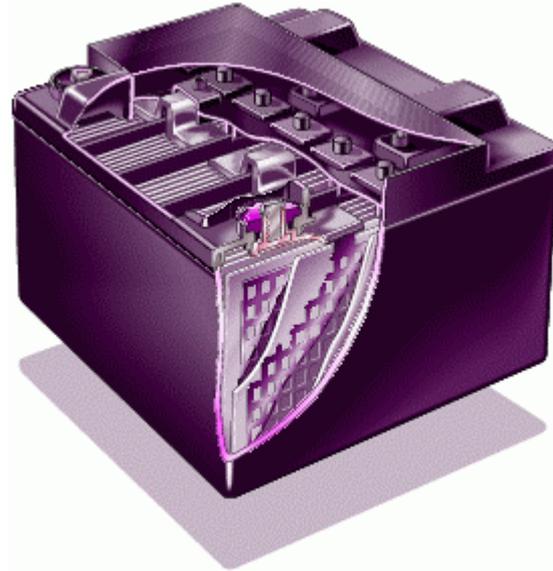
Bild 4.9: Aufbau einer Blei-Säure-Batterie [4.18]

## Blei-Gel-Akkus

Blei-Gel oder Sealed Lead Acid (SLA) Akkus ist der Elektrolyt in einem Gel gebunden. Das heißt, dass es zu keiner Säureschichtung kommen kann und dass dieser Akkutype ohne Gasungsphase beim Laden auskommt. Diese Akkus sind geschlossen und können daher lageunabhängig betrieben werden. Für den Fall, dass dennoch über der Gasungsspannung von 3,6 V pro Zelle (13,8 V bei einer 12 V-Batterie) geladen wird, sind Sicherheitsventile eingebaut. Sprechen diese an, kommt es unweigerlich zu einem Elektrolytverlust der in Folge die Kapazität mindert. SLA haben bei korrekter Verwendung eine längere Lebensdauer und sind absolut wartungsfrei. Auf Totalentladung reagieren Blei-Gel-Akkus äußerst empfindlich.

Eine hervorragende Gel-Batterie ist die Genesis oder Cyclon von Hawker Energy (Gemäß Hawker war 1973 die Cyclon von Gates Corporation der erste verschlossene Blei-Säure-Akku der Welt). Durch Verwendung 99,99% reinem Bleis wird die Gitterkorrosion stark reduziert. Das spezielle Design der Gitterplatten aus Zinn vergrößert die Plattenoberfläche und ermöglicht so einen unvergleichlich niedrigen Innenwiderstand (ca. 10 mOhm bei einem voll geladenen Akku) und eine extrem hohe spezifische Leistung. Die in sogenannter „reiner Blei-Zinn Technologie“ gefertigte Batterie ermöglicht eine größere Effizienz bei der Rekombination von Gas und minimiert dadurch Gasungsverluste. Die 12 V Genesis G42EP mit einer Nennkapazität von 42 Ah schafft bei einer einstündigen Entladung bis zu 10,0 V mit konstantem Entladestrom immer noch 33,8 Ah. Mit 14,9 kg Gesamtmasse kommt sie auf eine spezifische Energie von 33,8 Wh/kg in bezug auf die Nennkapazität und bei einstündiger

Entladung mit ca. 33,8 A Entladestrom unter Annahme einer mittleren Batteriespannung von 12V auf eine spezifische Energie von 27 Wh/kg. [4.19]



*Bild 4.10: Hawker Genesis True Lead-Tin Technology [4.20]*

Die nordamerikanische Firma Optima Batteries wendet einen anderen Trick an, um die Säureschichtung und das Auslaufen des Elektrolyten zu verhindern. Sie verwenden kein Gel zur Immobilisierung der Säure sondern ein dünnes Flies, welches die Säure aufnehmen kann. Die Elektroden werden mit den Separatoren und den Fliesschichten wie bei einem Elektrolytkondensator aufgerollt und in einen runden Behälter gepresst. Auf diese Art werden gleich ein paar Nachteile herkömmlicher Blei-Säure-Akkus beseitigt. Durch die viel größere Oberfläche steigt sowohl Lade- als auch Entladestrom. Der Innenwiderstand sinkt auf wenige Milliohm. Durch die kompakte Bauweise wird verhindert, dass die Elektroden selbst bei starken Vibrationen zerstört werden. Durch den praktisch unbeweglichen Elektrolyten kommt es auch zu keiner Bleischlammablagerung. Selbst bei thermischer Überbelastung kann es kaum noch zu Ausfällen. Das Problem der Sulfatierung halbvoller Akkus bleibt natürlich bestehen.

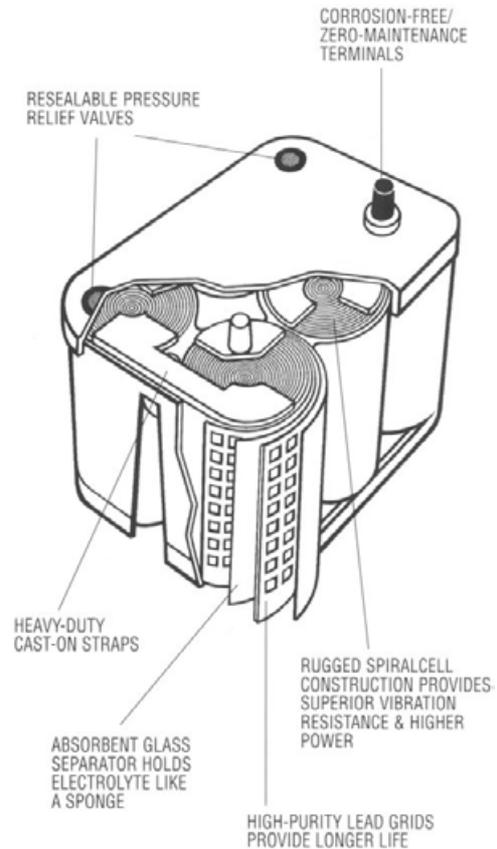


Bild 4.11: Schema einer Optima Spiral Cell B [4.21]

Es ist klar, dass die Wahl sofort auf diesen Akkutyp fiel. Zur besseren Anordnung wollte ich 6 V-Batterien besorgen. Nach mehrmaliger Kontaktaufnahme per Email und Telefon wurde ich schließlich auf die schwedische Vertretung verwiesen, die mir leider die nur für den amerikanischen Markt bestimmten 6 V-Akkus nicht liefern konnten. Nach langem Suchen stieß ich auf ein vergleichbares, jüngerer Produkt des Exide-Konzerns. Der Generalvertreter für Steiermark, Niederösterreich und Wien meinte, dass Optima Probleme mit Fertigungstoleranzen habe und dass es oft vorkomme, dass vor allem bei zusammenschalteten Batterien die Spannung sehr schnell auseinander driftet. Im Zuge dieser Schwierigkeiten gelang es Exide, gewisse Patentrechte zu erwerben und produzierte fortan ein verbessertes „Nachfolgemodell“ mit höherer Genauigkeit.

	Optima D34-950*	Exide 34M100D0W
$U_N$ [V]	12	12
CCA [A]	750	
MCA [A]	900	750
C/20 [Ah]	65	50
m [kg]	19,5	18,6
Innenwiderstand [Ohm]	2,8	
Leistung [W]	9000	
spezifische Energie [Wh/kg]	40	32
spezifische Leistung [W/kg]	461	
Zyklen bei 100%iger Entladung	350	
Zyklen gemäß IEC 896-2		489**
Startzyklen nach SAE J240	12000	8600***
Elektrolytdichte [kg/m <sup>3</sup> ]		1300
Garantie [Monate]		24

\* ... Meßdaten nach 30 bis 60 100%-Zyklen

\*\* ... Testergebnis eines Prototyps der Exide Maxxima 900 Deep Cycle (Orbital-Technologie)

\*\*\* ... bei 40 °C

CCA ... Cold Cranking Amps at -17,78 °C

MCA ... Marine Cranking Amps at 0 °C

*Tabelle 4.14: Vergleich zweier Blei-Akkus mit gewickelten Elektroden. Die Daten stammen aus verschiedenen Quellen (Homepage, Email, Telefonate, Prospekte).*

Eine Optima Yellow Top Deep Cycle Batterie kann bei 100%iger Entladung, also bei Erreichen einer Entladeschlussspannung von 10,5 V in 35 Minuten zu 90% geladen werden, wenn ein Ladestrom von 100 A zur Verfügung steht. Der Akku darf sich dabei nicht über 52 °C erwärmen. Die Ladedauer ist mit nur 124 Minuten angegeben. Die Yellow Top Deep Cycle Batterien können mit einem 15,6 V Konstantspannungsladegerät geladen werden, bis der Ladestrom unter 1 A fällt.

Die Exide Orbital Deep Cycle kann in 100 Minuten mit 25 A bei 27 °C geladen werden. Ein Schnellladevorgang wird idealer Weise mit 14,6 bis 14,8 V und 60 A durchgeführt, bis der Strom unter 1 A fällt. Eine Erhaltungsladung kann mit 13,5 bis 13,8 V bei max. 1 A durchgeführt werden. [4.21]

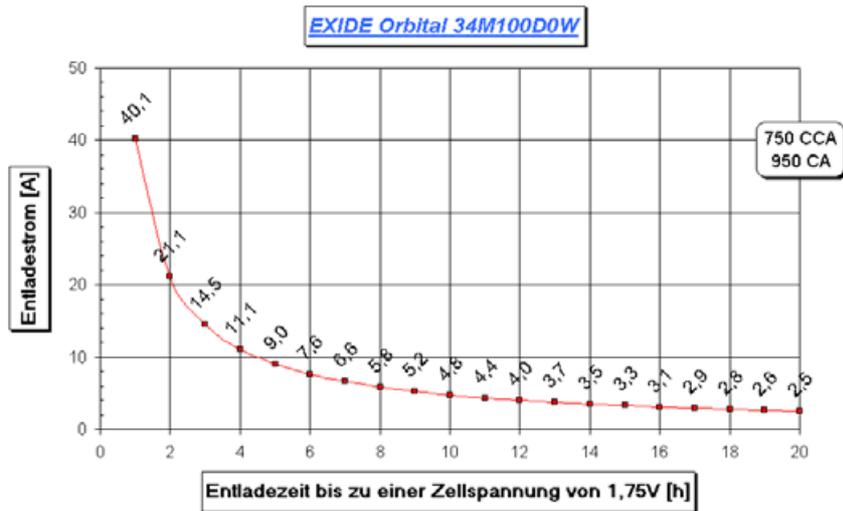


Bild 4.12: Exide Orbital 900 Deep Cycle. Zusammenhang zwischen Entladestrom und Entladezeit.  
[4.22]

Die Kurve Entladestrom über Entladezeit  $I(t)$  der Batterie von Exide wurde durch Eingabe zweier Punkte berechnet. Der erste Punkt bezieht sich auf einen Entladestrom  $I_1$  von 25 A über eine Zeit  $t_1$  von 100 Minuten, der zweite Punkt bezieht sich auf einen Entladestrom  $I_2$  von 2,5 A über einen Zeitraum  $t_2$  von 20 Stunden. Nach folgender Formel wurde die Kurve berechnet:

$$\log(I(t)) = \frac{\log(t_1 I_1^a) - \log(t)}{a} = \frac{\log(t_2 I_2^a) - \log(t)}{a} = b(t) \quad \{4.8\}$$

wobei

$$a = \frac{\log(t_2/t_1)}{\log(I_1/I_2)} \quad \{4.9\}$$

so dass sich für den Entladestrom in Abhängigkeit von der Entladezeit  $I(t)$  ergibt:

$$I(t) = 10^{b(t)}. \quad \{4.10\}$$

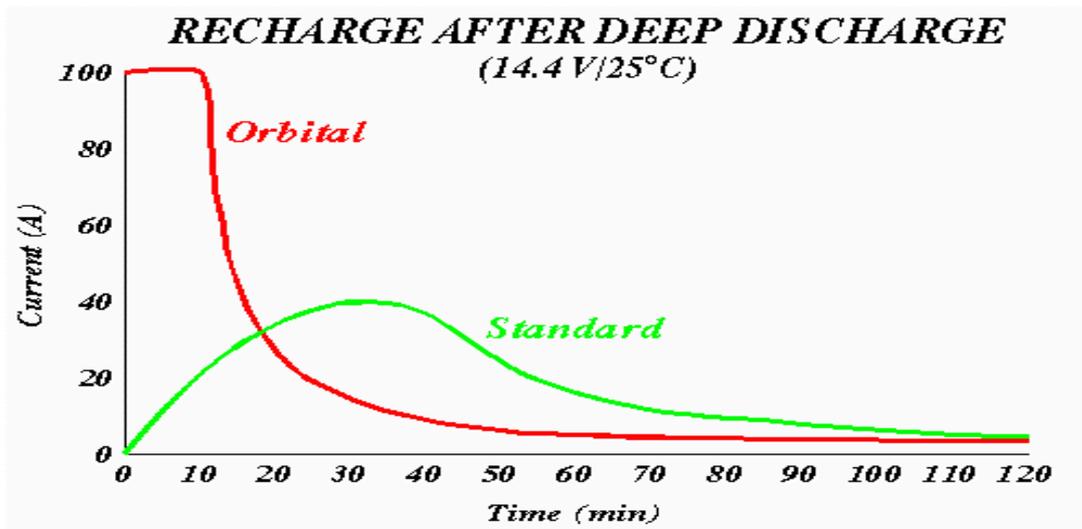


Bild 4.13: Vergleich der Ladestromverläufe einer Exide Orbital Deep Cycle mit einer Standardbatterie nach Tiefentladung. [4.22]

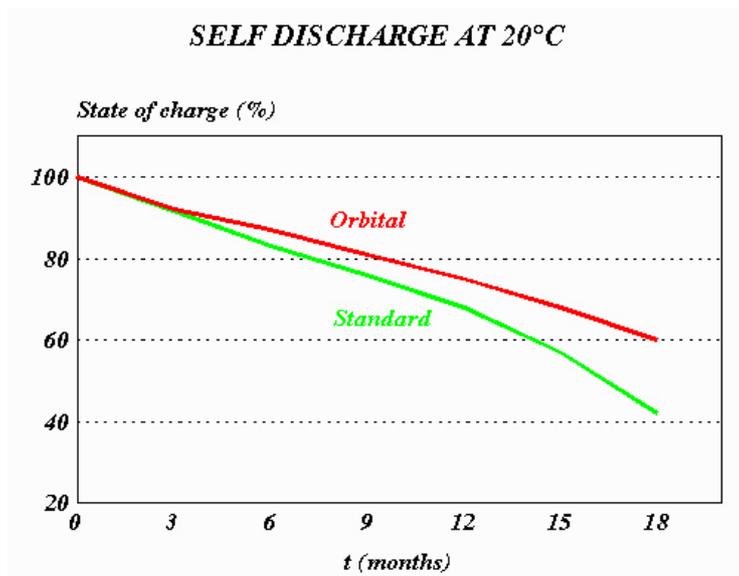


Bild 4.14: Vergleich der Selbstentladung einer Exide Orbital Deep Cycle mit einer Standardbatterie. [4.22]

### Nickel-Cadmium-Akkus

Die NiCd-Zellen gehört zu den älteren Batterietechnologien. Sie sind seit 1950 auf dem Markt und haben sich als Traktionsbatterie in verschiedenen Fahrzeugen bewährt. In Frankreich werden sie von der Firma Saft in Serienfertigung für Elektrofahrzeuge gefertigt.

Die Nennspannung der Zellen liegt bei 1,2V. Eine Untergrenze von 0,8-0,9V für die Entladeschlussspannung ist innerhalb eines Zellenverbunds sinnvoll. Bei Einzelzellen ist es möglich, eine Tiefentladung bis 0V durchzuführen, ohne dass die Zelle dauerhaften Schaden nimmt. Im Verbund zusammengefasste Zellen können jedoch bei Tiefentladungen irreversibel beschädigt werden, weil die Spannungslage der Zellen nie identisch ist. Zellen in einem Paket weisen noch Spannung auf, während eine oder mehrere Einzelzellen bereits vollständig entladen sind. Wird die Entladung dann fortgesetzt (der Verbund weist ja noch ein Potential auf), kippt die Spannungslage der leeren Zellen - sie werden umgepolt und verlieren ihre Ladefähigkeit gänzlich.

Nickel-Cadmium-Akkus sind durch ihren geringen Innenwiderstand in der Lage, vergleichsweise hohe Ströme zu liefern. Einige Fabrikate liefern kurzzeitig bis über 100A und bleiben zyklusfähig. Die hohe Leistungsfähigkeit bleibt auch bei tiefen Temperaturen gut erhalten. Aufgrund des niedrigen Innenwiderstandes sind sie besonders schnellladefähig. Der größte Vorteil ist die hohe Zyklenfestigkeit. Bei richtiger Wartung überstehen sie einige tausend Lade- und Ladevorgänge. Der größte Nachteil ist der Memoryeffekt, welcher durch Kristallbildung in den Zellen hervorgerufen wird und infolge dessen zu einem starken Leistungsabfall und Kapazitätsverlust führt. Der Memoryeffekt tritt vor allem bei unvollständig geladenen Batterien auf. Die Lagerung in entladem Zustand ist vorzuziehen, auch wenn inzwischen bekannt ist dass die nachteiligen Reaktionen während der Selbstentladung durch tiefe Lagertemperaturen (Lagerung nicht kälter als -15 Grad Celsius) vermieden werden können.

Die Verwendung der NiCd-Zellen sollte im Temperaturbereich zwischen 0 und 45 Grad Celsius erfolgen. Das Laden bei Temperaturen unter 0 Grad Celsius gestaltet sich schwierig, ab -20 Grad Celsius fast unmöglich, da der Elektrolyt langsam einfriert.

Aus ökologischer Sicht sollte eher auf NiCd-Zellen verzichtet werden, weil Cadmium giftig ist. Bei Vorschriftsmäßiger Entsorgung und Sammlung können sie zur Gänze wiederverwertet werden.

### Nickel-Metallhydrid-Akkus

NiMH-Akkus haben in einigen Bereichen klare Vorteile gegenüber NiCd-Zellen, wie z.B. die um etwa 30% höhere Kapazität bei gleichzeitig geringerem Raumbedarf. Bei NiMH tritt der Memoryeffekt nicht so häufig auf und wird in vielen Vergleichstabellen vernachlässigt. Auch aus ökologischen Überlegungen sind sie den Cadmiumzellen vorzuziehen. Dafür liegt die Zykluslebensdauer mit 500 bis 1000 Zyklen deutlich niedriger, kann aber durch Teilentladen verbessert werden. Die Überwachung eines Schnellladevorgangs ist besonders wichtig, da sich bei den NiMH-Zellen das Ladeende durch eine flacheren Spannungsanstieg bemerkbar macht. Auf eine Temperaturmessung kann nur bei sehr guten prozessorgesteuerten

Schnellladegeräten verzichtet werden. NiMH-Zellen haben je nach verwendetem Metallhydrid einen mehr oder weniger großen Leistungsnachteil gegen über den üblicherweise 30% billigeren NiCd-Batterien.

In eingehenden Diskussionen mit Dipl.-Ing. Josef Zankl von der Sanyo Energy Corporate GmbH in München über Vor- und Nachteile der Cadmium oder Metallhydrid-Zellen wurde schließlich doch NiCd-Zellen bevorzugt. Der wesentlichste Grund war der, dass in einem alltagstauglichen Solarfahrrad billige Verbrauchsmaterialien eingesetzt werden müssen, um einen wirtschaftlichen Betrieb möglich zu machen. Und da keine Rennen gefahren werden, bei denen das Batteriegewicht eine nicht unwesentliche Rolle spielt, aber mitunter auf Kopfsteinpflaster, entschied ich mich für gesinterte NiCd-Zellen. Geschäumte Zellen haben zwar eine wesentlich höhere Kapazität, werden aber leichter durch Vibrationen geschädigt.

		CP-3600CR	HR-C	KR-5000DEL	KR-DEL (Tentative, TBD)	HR-D	KR-14000M	KR-24000M
Kapazität min.	Ah	3,45	3,8	5	6	6,9	13	24
Kapazität typ.	Ah	3,6	4,2	5,4	6,3	7,5	14,5	25,5
Durchmesser	mm	26	26	33	33	33	43,1	43,1
Höhe	mm	50	50	59,5	59,5	59,5	91	146,1
Gewicht	g	88	93	150	160	173	450	700
Positive Elektrode		Sintered type	Sintered type	<b>Sintered type</b>	Sintered type	Sintered type	Sintered type	Sintered type
Chemismus		Ni-Cd	Ni-MH	<b>Ni-Cd</b>	Ni-Cd	Ni-MH	Ni-Cd	Ni-Cd
Entwicklungsstand		In M.P.	Under development	<b>In M.P.</b>	Under marketing	In M.P.	Under marketing	In M.P.
Spannung	V	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Energie	Wh	4,32	5,04	6,48	7,56	9	17,4	30,6
spezifische Energie	Wh/kg	49	54	43	47	52	39	44
Energiedichte	Wh/dm <sup>3</sup>	163	190	127	149	177	131	144
Ladezyklen		1000	500	1300	1300	500	1300	1300
gesamter theor. Energiedurchsatz	Wh	4320	2520	8424	9828	4500	22620	39780
spezif. Energiedurchsatz	Wh/kg	49100	27100	56200	61400	26000	50300	56800
empfohlene Verwendung		Licht und einfache Räder	Licht und einfache Räder	<b>Standardräder</b>	Standard- u. Lastenräder	Lastenräder	Scooter	Scooter

In M.P. ... in Market Place

Tabelle 4.15: Vergleich der verschiedenen, von Sanyo gefertigten NiCd- und NiMH-Zellen [4.23]

Lademethode	NiCd		NiMH	
	Kapazität	Zyklen	Kapazität	Zyklen
1.5 - 2.5 A, -dV = 10 mV/Zelle, TCO = 55 °C, 20 - 30% Überladen	sehr gut	sehr gut (~1000)	sehr gut	weniger gut (~300)
1.5 - 2.5 A, dT/dt, -dV = 10 mV/Zelle, TCO = 55 °C, 20 - 30% Überladen	gut	exzellent	gut	gut (~500)

gelb: von Sanyo empfohlen

TCO .. Temperature Cut Off

Tabelle 4.16: Vergleich von NiCd- und NiMH-Zellen von Sanyo [4.23]

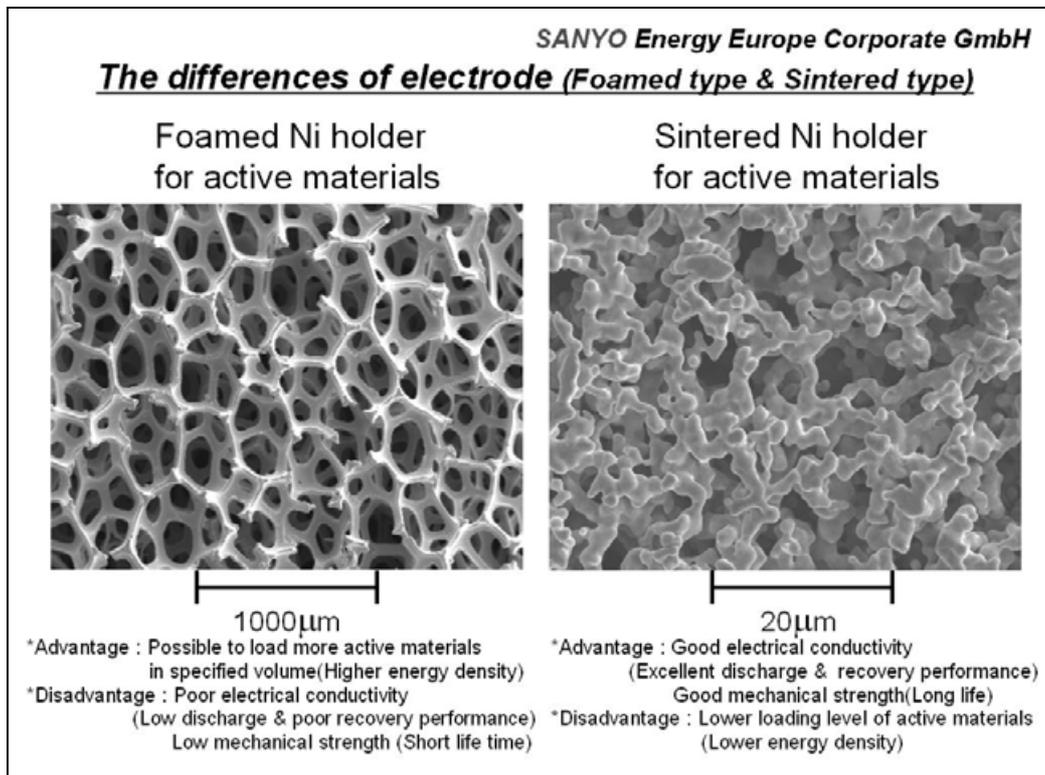


Bild 4.15: Vergleich der Füllmaterials geschäumter und gesinterter Zellen (Sanyo) [4.23]

**SANYO Energy Europe Corporate GmbH**  
**Suitable battery for electrical bicycle**

Typical battery specification & usage	Necessary battery performance	Suitability of technology
*Battery pack consists of 20-30cells	*Durability to heat generation *Toughness by capacity imbalance	Sintered >> Foamed (Ni-Cd >> Ni-MH) Sintered >> Foamed (Ni-Cd >> Ni-MH)
*High drain usage	*Excellent discharge performance	Sintered > Foamed (Ni-Cd > Ni-MH)
*Battery could be stored in winter season due to not active use of bicycle	*Excellent recovery performance	Sintered >> Foamed (Ni-Cd > Ni-MH)
*Need long life	*Long life	Sintered >> Foamed (Ni-Cd >> Ni-MH)
*More energy	*High capacity	Sintered < Foamed (Ni-Cd < Ni-MH)

**((Suitability))**

**\*Technology for electrode : Sintered >> Foamed**

**\*Technology by chemistry : Ni-Cd > Ni-MH**

**\*Cost performance : Ni-Cd > Ni-MH**

**\*Total suitability : Sintered Ni-Cd > Sintered Ni-MH >> Foamed Ni-MH**

*Bild 4.16: Von Sanyo angestellter Vergleich von NiCd- und NiMH-Zellen für den Einsatz in Elektrofahrrädern. Die einzigen Nachteile der NiCd-Zellen sind die etwas geringere Speicherkapazität und die hier nicht angeführte, geringere Umweltfreundlichkeit. [4.23]*

Interessant ist der Zusammenhang zwischen Zyklenanzahl und der Entladetiefe von NiCd-Zellen der Firma Saft. Bei einer Entladetiefe von 50% halten die Zellen 2000 Zyklen und haben somit einen gesamten, theoretischen Energiedurchsatz vom 1000-fachen des Energieinhalts. Werden die Zellen immer voll entladen, so reduziert sich der theoretischen Energiedurchsatz um das Zweieinhalbfache. Dies steht in klarem Widerspruch zu der Behauptung, dass der Memoryeffekt nur durch Totalentladung effektiv verhindert werden kann, womit es einen weiteren, guten Grund gibt, NiCd-Zellen ins Solarfahrrädern einzusetzen. [4.24]

Werden die Zellen bei einer Temperatur gelagert, bei der die Selbstentladung pro Monat etwa 20% beträgt und geht man davon aus, dass die Zellen monatlich aufgeladen werden, so würden die Zellen theoretisch 5000 Zyklen halten – dies entspräche einer theoretischen, aber unrealistischen Lebensdauer von über 400 Jahren.

Geht man von einer Nutzungsdauer von 104 Tagen pro Jahr, also ungefähr der Anzahl der Fahrten, mit denen die Amortisationsabschätzung in Kapitel 2 gemacht wurde, und nimmt man an, dass die Zellen zweimal pro Tag vollgeladen werden, dann würde man bei jeweils 50%iger Entladung mehr als neun Jahre mit dem selben Akkusatz fahren können – ein weiterer Pluspunkt des Solarfahrrad-Konzeptes!

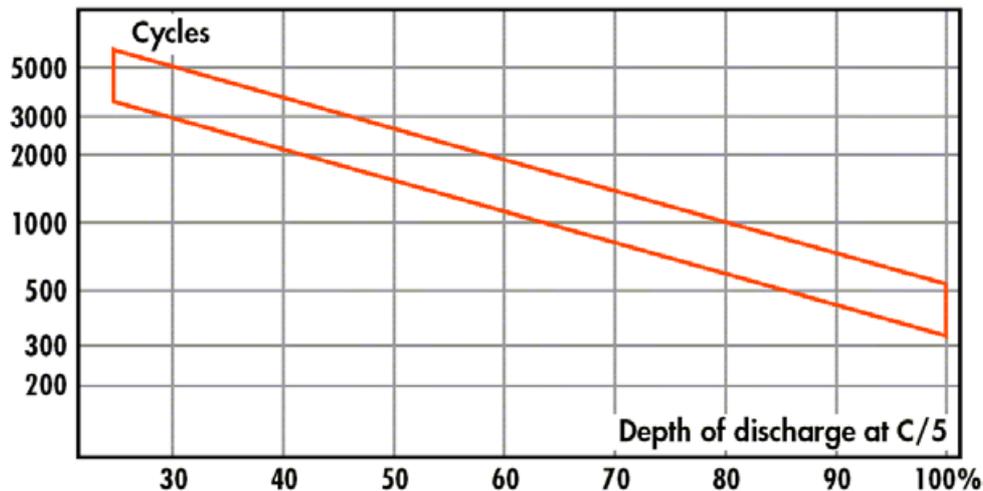


Bild 4.17: Zusammenhang der Zyklanzahl und der Entladetiefe von Soft NiCd-Zellen der Baureihe VR. Der Entladestrom ist mit einem Fünftel der Nennkapazität relativ gering. [4.24]

#### Zusammenfassung

Sowohl NiCd-Zellen als auch tiefentladefeste, verschlossene Bleiakkumulatoren eignen sich hervorragend für das Solarfahrradkonzept. Bei gleicher Speicherkapazität erhält man bei Verwendung von NiCd-Zellen ein System mit besseren Steig- und Beschleunigungseigenschaften im Vergleich zu einem z.B. mit gewickelten Blei-Vlies-Akkus ausgestatteten, günstigerem Solarfahrrad. Bei einer Gesamtmasse von 150 kg für Fahrer und Fahrrad würde das eine Gewichtsreduktion von etwa 6% ergeben.

Bei einer Lebensdauerabschätzung ist zu bedenken, dass jede Art von Blei-Akku unter Tiefentladung sehr leidet. Aus diesem Grund macht das nur dann einen Sinn, wenn bei Vergleichen von einer geringeren Nennkapazität ausgegangen wird. Des weiteren wird das in Kapitel 2 entworfene Nutzungsmodell als Vergleichsbasis herangezogen. Da NiCd-Zellen in diesem Fall um 84% länger als Pb-Akkus halten würden, kämen sie bei einer Nutzungszeitraum von 5 Jahren um 86% und bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren um 55% teurer als die erwähnten Pb-Akkus.

		Exide Maxxima 900DC	Sanyo KR-5000DEL
Anzahl		1	60
Masse gesamt	kg	18,6	9
Nennspannung	V	12	12
Nennkapazität	Ah	50	32,4
Nennkapazität	Wh	600	388,8
Kapazität genutzt	Wh	300	300
Entladezustand max		50%	77%
Zyklen geschätzt*		490	900
Richtpreis**	€	215	600
Zyklen pro Jahr	a <sup>-1</sup>	208	208
Lebensdauer	a	2,36	4,33

\* ... Für den Pb-Akku wurde Zyklen gemäß IEC 896-2 und für NiCd-Zellen der Wert von Saft-Zellen genommen.

\*\* ... Die Schätzung beruht auf telefonischer Auskunft von Vertriebszentralen in Österreich und Deutschland.

*Tabelle 4.17: Vergleich zweier Akkusysteme eines Solarfahrrades mit bei einer Tageskilometerleistung von 36 km an 104 Tagen im Jahr*

		Exide Maxxima 900DC	Sanyo KR-5000DEL
Betrachtungszeitraum	a	5	5
benötigte Akkus		3	2
Gesamtkosten	€	645	1200
Kosten pro Jahr	€	129	240
Gesamtstrecke	km/a	3744	3744
Kosten pro km	€/km	0,034	0,064

*Tabelle 4.18: Kosten für die Akkus bei 5 Jahren Nutzungsdauer*

		Exide Maxxima 900DC	Sanyo KR-5000DEL
Betrachtungszeitraum	a	10	10
benötigte Akkus		5	3
Gesamtkosten	€	1075	1800
Kosten pro Jahr	€	108	180
Gesamtstrecke	km/a	3744	3744
Kosten pro km	€/km	0,029	0,048

*Tabelle 4.19: Kosten für die Akkus bei 10 Jahren Nutzungsdauer*

		Exide Maxxima 900DC	Sanyo KR-5000DEL
Betrachtungszeitraum	a	20	20
benötigte Akkus		9	5
Gesamtkosten	€	1935	3000
Kosten pro Jahr	€	97	150
Gesamtstrecke	km/a	3744	3744
Kosten pro km	€/km	0,026	0,040

*Tabelle 4.20: Kosten für die Akkus bei 20 Jahren Nutzungsdauer*

Für das in Kapitel 2 durchgerechnete Modell würden sich im Fall von Pb-Akkus etwa 0,03 €/km und für NiCd-Zellen 0,04 bis 0,06 €/km ergeben. Da bei diesem Modell von Gesamtkosten von 4000 € für die ersten drei Jahre gesprochen wurde, sind diese laufenden Kosten nur für die Jahre danach anzusetzen.

#### 4.1.4 Solarzellen

##### Geschichte der Photovoltaik

Das Kunstwort Photovoltaik setzt sich aus dem griechischen „Photo“ (Licht) und einer Abwandlung des Namens des italienischen Physikers Alessandro Volta, der wesentlich zur Erforschung der Elektrizität beigetragen hat, zusammen [4.25]. Es bedeutet so viel wie die Technik, aus (Sonnen)Licht elektrische Energie zu gewinnen.

Im Jahr 1839 beobachtete der französische Physiker Antoine E. Becquerel, dass zwischen zwei Platinelektroden, die in eine elektrolytische Lösung eingetaucht sind, eine elektrische Spannung auftritt, wenn eine der Elektroden beleuchtet und die andere dunkel gehalten wird. Eine solche Zellanordnung liefert einen Strom, der mit der Beleuchtungsstärke ansteigt. Erst 1883 gelang es, eine praktikable photovoltaische Zelle auf der Basis des Halbleitermaterials Selen zu fertigen, die auf der Grundlage eines Metall/Halbleiterübergangs basiert. Technisch genutzt wurden derartige Photozellen in der Folgezeit als Belichtungsmesser für die Fotografie, zur Abtastung der Tonspur des Kinofilms und zum Aufbau von Lichtschranken, da der Wirkungsgrad solcher Zellen nur 1% erreichte. [4.25]

1904 entdeckt der deutsche Physiker Philipp Lenard, dass Lichtstrahlen beim Auftreffen auf bestimmte Metalle Elektronen aus deren Oberfläche herauslösen und liefert damit die ersten Erklärungen für den Effekt der Photovoltaik. Ein Jahr später, erhält er den Nobelpreis für

Physik, für die Erforschung des Durchganges von Kathodenstrahlen durch Materie und Elektronentheorie.

Anfang der Fünfziger machten Wissenschaftler der „Bell Telephone Laboratories“ in New Jersey die überraschende Beobachtung, dass Siliziumgleichrichter mehr Strom liefern, wenn sie im Sonnenlicht standen. Bei Bell erkannte man schnell den Nutzen dieser Entdeckung zur Versorgung des Telefonnetzes von ländlichen Regionen mit Strom, was bis dahin noch mit Batterien geschah. Chapin, Fuller und Pearson, entwickelte 1953 so die ersten Solarzellen aus Silizium. Sie waren mit Arsen dotiert und besaßen anfangs einen Wirkungsgrad von etwa 4%. Später konnte dieser auf 6% gesteigert werden. [4.26] Am 25. April 1954 wurde die erste Solarzelle der Öffentlichkeit vorgestellt. [4.27] 1955 war eine Solarzellen mit 2% Wirkungsgrad für 1'785 \$/Wp (Hoffmann Electronics Semiconductor Division) erhältlich. [4.28] Bei Bell wurde 1957 mit einer Weiterentwicklung ihrer Zelle einen Wirkungsgrad von beachtlichen 8% erreicht. [4.29]

Solarzellen waren leicht und schienen ewig Sonnenenergie in elektrische Energie umwandeln zu können. Aufgrund des hohen Preises wurden sie nur für extraterrestrische Anwendungen wie Satelliten eingesetzt. Die NASA schoss den ersten Satelliten, der mit Si-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 10,5% zum Laden von Akkus ausgestattet war, am 17. März 1958 ins Weltall. Bis zum Ölschock Anfang der 70er Jahre wurden Solarzellen wegen der hohen Kosten von 200 \$/Wp praktisch nur in der Raumfahrt eingesetzt. [4.26]

Mandelkorn und Lamneck verbesserten die Lebensdauer der Zellen 1972 durch eine Reflexion der Minoritätsladungsträger in dem Sie einen sogenannten black surface field (BSF) in die p-leitende Schicht einbrachten. 1973 stellten Lindmayer und Ellison die sogenannte Violette Zelle vor, die bereits einen Wirkungsgrad von 14% besaß. Durch das Reduzieren des Reflexionsvermögens wurde der Wirkungsgrad 1975 auf 16% gesteigert. Diese Zellen heißen CNR-Solarzellen (Comsat Non Reflection) und wurden für Satelliten entwickelt. 1982 wurde das erste 1 MWp Photovoltaikkraftwerk in Lugo, Californien, USA errichtet. Inzwischen sind von Green, sowie an der Stanford University und bei Telefunken Solarzellen mit Wirkungsgraden um 20% entwickelt worden. Die Weltjahresproduktion betrug 1997 rund 120 MWp bei Marktpreisen von etwa 4,6 €/Wp. Mittlerweile gibt es faltbare Solarzellen die sich besonders im militärischen Bereich oder bei Expeditionen als vorteilhaft erweisen. [4.25], [4.26], [4.30], [4.28]

Heutzutage wird versucht, in erster Linie die Produktionskosten und den Energieeinsatz bei der Herstellung von Solarmodulen zu senken. Dies betrifft vor allem die Automatisierung und Vereinfachung des Herstellungsprozesses. So wird bei den CIS (CuInSe<sub>2</sub>, Kupfer-Indium-Diselenid) Zellen die Halbleiterschicht auf ein Kupfersubstrat aufgedampft. In zweiter Linie wird durch horizontale Anordnung verschiedener Schichten unterschiedlicher, amorpher Halbleiter versucht, besonders im diffusen Bereich einen höheren Wirkungsgrad zu erzielen. Beispiele dafür sind Tandem- oder Tripelzellen. Im Bereich von Konzentrazorzellen wird

versucht, durch vertikales „Stapeln“ verschiedener Halbleitermaterialien den Wirkungsgrad auf bis zu 50% zu steigern. Mit  $\text{GaInP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ -Zellen ist es gelungen, bei 350 Sonnen Wirkungsgrade von über 30% zu erzielen.

Dünnschichtsolarzellen, sofern sie biegsam gebaut werden, eröffnen neue gestalterische Möglichkeiten. Die amorphe Zellen der Firma VHF-Technologies aus der Schweiz, bei denen das Halbleitermaterial auf einer Kunststoffolie aufgedampft wird, eignen sich hervorragend für Quick-Karten mit Guthabenanzeige. Die Firma Iowa Thin Film Technologies verfolgt ein ähnliches Konzept. Einen guten Überblick über gegenwärtige Entwicklungen kann man sich bei der Thin Film Physics Group der ETH-Zürich verschaffen (<http://www.tfp.ethz.ch/>). Dr. Helmut Hoegl ließ 1993 am Batelle-Institut in Frankfurt Labormuster eine Twin-Solarzelle, wie er sie bezeichnete, herstellen, bei der die Halbleiterschichten auf dünne Drähte aufgedampft werden. Diese dreidimensionalen Zellen, meint er, könne man zu Matten verweben oder zu Textilien verarbeiten und seien äußerst billig. [4.31]

Auch Sanyo hat bereits dreidimensionale Photovoltaikzellen, bei denen amorphe und kristalline Zellen so angeordnet werden, dass Licht von oben und unten auf die Halbleiterschichten auftreffen kann. Damit ist der Energieertrag besonders bei diffusen Bedingungen oder bei vertikaler Montage höher.

Am vielversprechendsten sind reine Kunststoff-solarzellen aufgrund geringster Material- und Herstellungskosten, auch wenn es über Haltbarkeit und Wirkungsgrad noch keine offiziellen Daten gibt. Vergessen sollte man auch nicht die Arbeiten am Linzer Institut für organische Solarzellen (LIOS) unter o.Univ.-Prof. Mag. Dr. Serdar N. SARICIFTCI.

Photovoltaikzellen werden üblicherweise aus silbrig schimmerndem Silizium hergestellt, das erst durch die oberflächliche Behandlung die charakteristisch tiefdunkelblaue Farbe bekommt. Der Farbton kann von rot- bis blauschimmernd variiert werden und eröffnet so neue architektonische Möglichkeiten.



*Bild 4.18: Siliziumzellen aus ca. 0.3 mm dicken Siliziumscheibchen*

### Monokristalline Zellen

Monokristalline Zellen waren die erste Generation von Siliziumzellen und erreichen mittlerweile Wirkungsgrade von bis zu 15%. Die hochreinen Einkristalle mit streng geometrischem Aufbau, von denen wegen der Zerbrechlichkeit von Silizium relativ dicke Scheiben von ca. 500  $\mu\text{m}$  abgeschnitten werden müssen, werden bei einer Temperatur von konstant 1400 °C gezüchtet. Der Herstellungsprozess ist langwierig und wegen des hohen Energiebedarfes von 2'200 kWh/m<sup>2</sup> Solarzellenfläche extrem teuer. Die Energierücklaufzeit beträgt fast 15 Jahre, Garantie wird für 20 bis 30 Jahre gewährt. Monokristalline Zellen sind an der absolut ebenmäßigen, tiefblauen Oberfläche und der runden oder achteckigen Facetten bei Solarmodulen leicht zu erkennen.

Sie werden in Kleinanwendungen, zur Solarstromversorgung sowie in der Raumfahrt eingesetzt, wo sie nun langsam aber sicher von Hochleistungs- oder Dünnschichtzellen abgelöst werden. [4.27], [4.29]

### Polykristalline Zellen

Poly- oder multikristalline Zellen sind im Vergleich zu monokristallinen Zellen günstig und die am häufigsten produzierten Solarzellen. Bei der Herstellung wird hochreines aufgeschmolzenes Silizium in Blöcke gegossen schneller abgekühlt als bei monokristallinen Zellen, wodurch viel Zeit und Energie eingespart wird. Beim Abkühlen entsteht eine Vielzahl kleiner, ineinander verwobener Kristalle, die diesen Zellen das charakteristische tiefblau-kleingesprenkelte Aussehen gibt. Wegen der leichten Unregelmäßigkeiten an den Korngrenzen der einzelnen Kristalle beträgt der Wirkungsgrad nur etwa 13%. [4.27], [4.29] Polykristalline Photovoltaikzellen sind vor allem für die Solarstromerzeugung sehr beliebt, da sie trotz des moderaten Flächenbedarfes wegen des guten Wirkungsgrades hohe Erträge liefern.

### Amorphe Solarzellen

Auf einen Träger wie Glas, Metallband oder Kunststofffolien wird eine hauchdünne Schicht des Halbleiters aufgedampft. Es kann sich keine Kristallstruktur ausbilden. Der Halbleiter liegt in amorpher Form vor. Die Energierücklaufzeit beträgt nur etwa 3 Jahre. [4.27] Amorphe Dünnschichtzellen haben grünlichbraunes Aussehen und können fast beliebig groß produziert werden. Solarpaneele erscheinen daher farblich über die ganze Fläche homogen und werden nur durch die feinen Linien der Stromabnehmerbahnen perforiert. Die mittels Plasmaverfahrens aufgedampfte Siliziumschicht ist mit 0,3  $\mu\text{m}$  etwa tausend mal dünner als bei kristallinen Zellen. [4.29] Die Nennleistung wird niedriger angegeben als die Zellen anfangs leisten. Die Langzeitstabilität ist durch Diffusionsvorgänge im Halbleiter und der

geringen Materialdicke vergleichsweise niedrig. Es werden zehn bis fünfzehn, manchmal sogar 20 Jahre Garantie auf 80% der Nennleistung gewährt. Der Wirkungsgrad beträgt etwa 5 bis 8%. Kupferindiumdiselenid (CIS-Zellen) scheint eine vielversprechende, neue Entwicklung im kostengünstigen Dünnschichtbereich zu sein.

#### Hochleistungszellen (Tandem-, Tripel- oder Stapelzellen)

Mehrschichtzellen bestehen aus unterschiedlichen Halbleiterarten, die Licht nicht nur einer Wellenlänge bevorzugt absorbieren, sondern mehrere, für das jeweilige Material charakteristische Absorptionslinien aufweisen. Dadurch wird die Lichtenergie vor allem im langwelligen Wellenlängenbereich besser ausgenutzt. Da mehr Lichtenergie genutzt und weniger als Wärme verloren geht, bleiben Zellen mit hohem Wirkungsgrad kühler und können als Konzentratorzellen eingesetzt werden. Mit Galliumarsenid-Tandemzelle wurden Wirkungsgrade von 37% erreicht [4.29], mit Stapelzellen, bei denen die Schichten vertikal angeordnet sind, wurden noch höhere Wirkungsgrade erreicht. Letztere werden vorwiegend für die Verwendung in Konzentratoren entwickelt und kosten bis zu 100'000 €/m<sup>2</sup>.

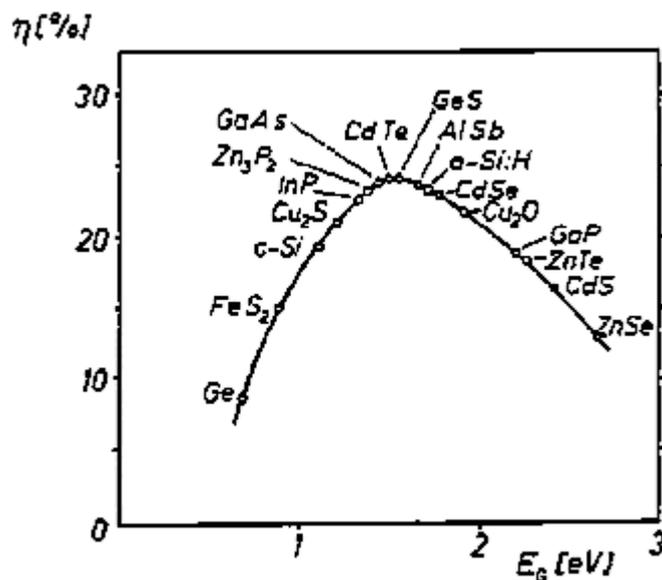


Bild 4.19: Theoretisch maximale Wirkungsgrade verschiedener Halbleitersolarzellen in Abhängigkeit der Energielücke bzw. des Bandabstandes [4.32]

#### Photoelektrische Zellen

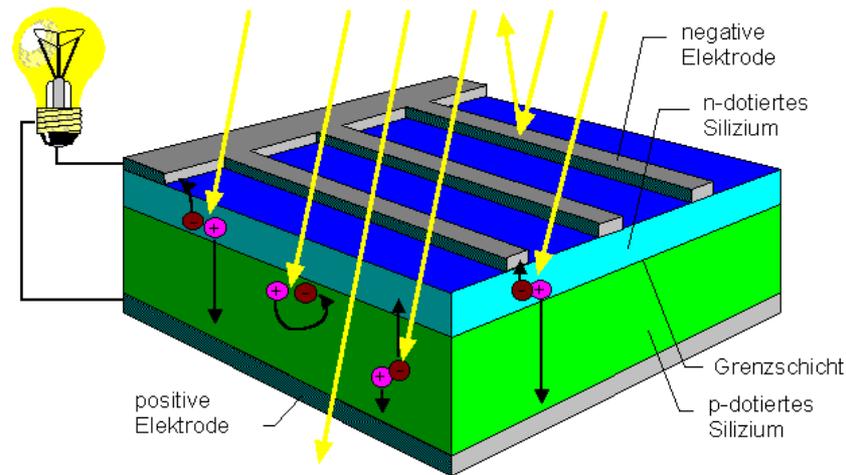
Photoelektrochemische Zellen (PEC) scheinen Zukunftspotential zu haben, auch wenn sie noch relativ kurzlebig sind, stehen sie doch erst am Anfang ihrer Entwicklung. Bei diesen Zellen wird durch Beleuchtung eines Übergangs aus Halbleitern und bestimmten

Salzlösungen ein elektrisches Feld erzeugt. [4.29] Man denkt auch daran die Photosynthese der Pflanzen, die mit etwa 2% Wirkungsgrad funktioniert, zu adaptieren und als relativ günstigen Farbanstrich aufzutragen. [4.25]

### Wirkungsweise einer Halbleitersolarzelle

Photovoltaikanlagen bestehen aus zusammengeschalteten einzelnen Solarzellen, deren eigene elektrische Leistungsfähigkeit selbst sehr gering ist. Durch geschicktes Parallel- und Reihenschalten erreicht man die gewünschten Leistungswerte unter den gewünschten Spannungs- und Stromstärkeverhältnissen. Eine Solarzelle für den leistungsorientierten Gebrauch besteht zumeist aus kristallinem Silizium. Dabei unterscheidet man zwischen mono-, polykristallinem und amorphem Silizium, was mit der Regelmäßigkeit der Anordnung der Atome im Kristall zutun hat. Beim ersten ist der ganze Kristall völlig regelmäßig angeordnet, beim zweiten große Teile jenes und beim letzten nicht regelmäßig. [4.25]

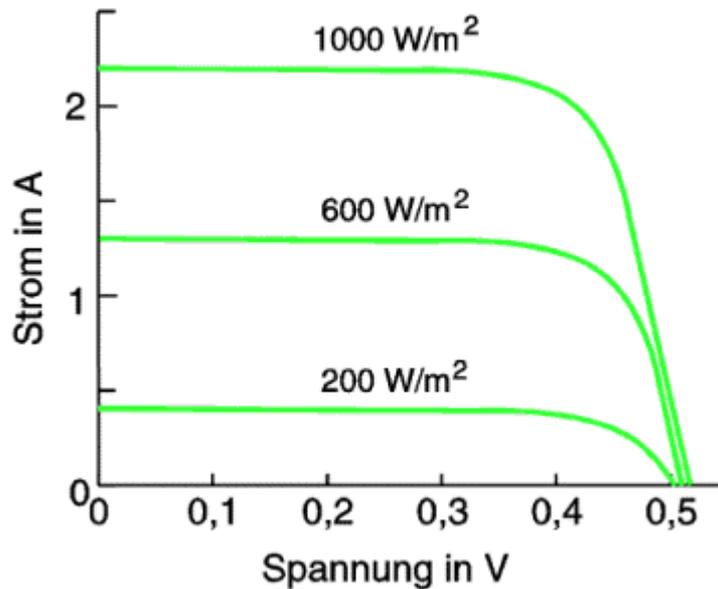
Es ist leicht verständlich, dass mit der Unregelmäßigkeit zwar der Preis aufgrund einfacherer Herstellung abnimmt, der Wirkungsgrad jedoch auch. Wie schon erwähnt, besteht eine Solarzelle aus Silizium, das vier Bindungselektronen aufweist. Für die Stromleitung sind keine Elektronen frei. Um dennoch einen Strom fließen lassen zu können, setzt man gezielt Fremdatome in einen Siliziumkristall ein. Dadurch entsteht ein n-Halbleiter (Elektronenüberschuss) oder p-Halbleiter (Elektronenmangel) Bei einer Solarzelle ist die der Sonne am nächsten stehende Schicht eine n-dotierte Schicht. Sie weist ein Phosphor-Silizium Gitter auf. Von den fünf Bindungselektronen des Phosphors bleibt je ein Elektron über. In der unteren Schicht ist es genau umgekehrt. Diese als p-dotiert bezeichnete Schicht ist ein Bor-Siliziumgitter, in dem es an Elektronen mangelt, da Bor drei Bindungselektronen aufweist. Bringt man nun beide Schichten in Kontakt, wandern die in Nähe der p-dotierten Schicht befindlichen freien Elektronen zu den nicht besetzten Stellen des Bor-Siliziumgitters. Es entsteht eine von außen nicht registrierbare, elektrisch positive obere Schicht aufgrund fehlender Elektronen und eine negative untere Schicht aufgrund der zusätzlichen Elektronen. Den Bereich, in der diese Aufladung stattfindet, nennt man Raumladungszone. Unter Einwirkung von Sonnenlicht werden Bindungselektronen von ihren Atomen gelöst und bewegen sich in Richtung der n-dotierten Schicht, die wie gesagt positiv ist. Wird nun einen Verbraucher an der Solarzelle angeschlossen, werden die offenen Stellen von den Elektronen außerhalb der Solarzelle besetzt, die von unten, dem Pluspol der Solarzelle, nachrücken. Die überschüssigen Elektronen in der oberen Schicht, wandern oben aus dem Minuspol der Zelle heraus und über den Verbraucher zur unteren Schicht der Siliziumsolarzelle. Ein elektrischer Stromfluss außerhalb der Zelle ist die Folge. [4.25]



*Prinzipieller Aufbau einer ca. 0.3 mm dicken Halbleitersolarzelle aus Silizium mit einer 2 nm dicken n-Halbleiterschicht [4.33]*

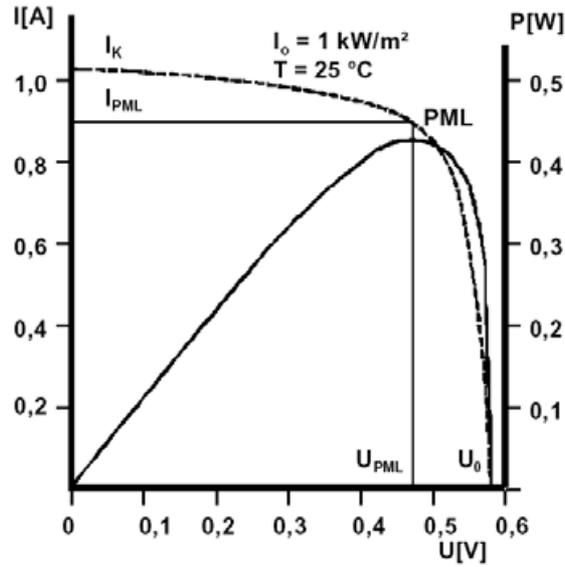
Am p-n-Übergang baut sich ein inneres elektrisches Feld auf, das zu einer Ladungstrennung der bei Lichteinfall freigesetzten Ladungsträger führt. Über Metallkontakte kann eine elektrische Spannung abgegriffen werden. Wird der äußere Kreis geschlossen, das heißt ein elektrischer Verbraucher angeschlossen, fließt ein Gleichstrom von der rückseitigen Metallkontaktfläche zu den Kontaktfingern auf der Oberfläche der Zelle. Eine durchsichtige Antireflexschicht dient zum Schutz der Zelle und zur Verminderung von Reflexionsverlusten an der Zelloberfläche und verleiht der sonst silbrig glänzenden Siliziumzelle ihr charakteristisches Aussehen.

Die an Solarzellen abgreifbare Spannung ist abhängig vom Halbleitermaterial. Bei Silizium beträgt sie etwa 0,5 V. Die Klemmenspannung ist nur schwach von der Lichteinstrahlung abhängig, während die Stromstärke bei höherer Beleuchtungsstärke ansteigt. Bei einer 100 cm<sup>2</sup> großen Siliziumzelle erreicht die maximale Stromstärke unter Bestrahlung von 1.000 W/m<sup>2</sup> etwa einen Wert von 2 A .



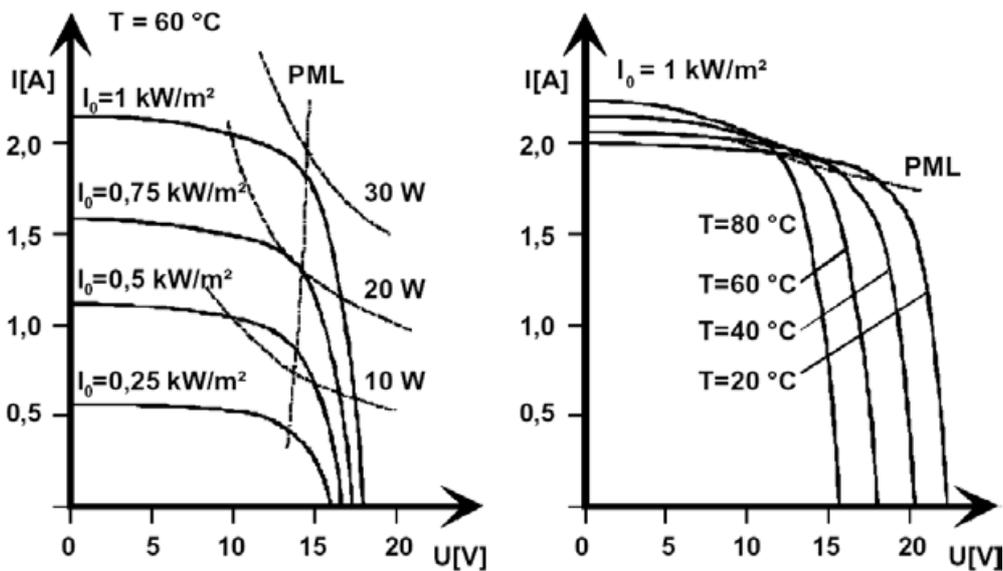
*Strom-Spannungs-Kennlinie einer Si-Solarzelle [4.34]*

Eine Silizium-Solarzelle liefert den maximale Leistung zwischen 0,4 und 0,5 V. Der genaue Wert ist vom Aufbau der Zelle, der Einstrahlung und der Zelltemperatur abhängig. Er lässt sich durch Messung von Strom und Spannung bei unterschiedlicher Belastung messen. Die Abhängigkeit des Stromes vom Spannungsabfall an einem Widerstand wird Kennlinie einer Solarzelle genannt. Der Punkt maximaler Leistung (PML) wird im Englischen als Maximum Power Point (MPP) bezeichnet. Da die Umgebungsbedingungen ständig wechseln, wird ein Maximum Power Point Tracker (MPPT, MPT oder PPT) benötigt, der die Solarzelle immer im optimalen Strom:Spannungsverhältnis betreiben.



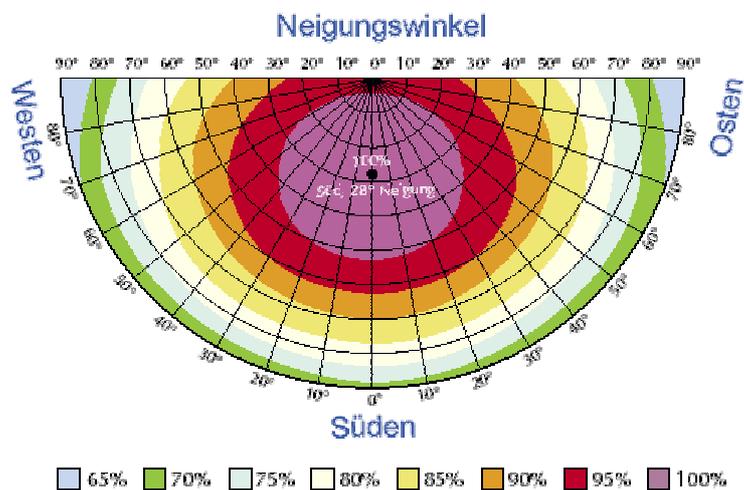
*Kennlinie einer Si-Solarzelle mit Punkt maximaler Leistung (PML), auch Maximum Power Point (MPP) genannt.*

Die Leistung (Produkt aus Strom und Spannung) einer Solarzelle ist stark temperaturabhängig. Höhere Zelltemperaturen führen zu niedrigeren Leistungen und damit zu einem schlechteren Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad gibt an, wie viel der eingestrahnten Lichtmenge in nutzbare elektrische Energie umgewandelt wird.



*Abhängigkeit der Kennlinie eines Photovoltaikmoduls von Sonneneinstrahlung und Temperatur [4.34]*

Aufgrund des unterschiedlichen Sonnenstands und entsprechend veränderlichen Einstrahlungswinkel ist die Ausbeute abhängig von der Neigung und der Orientierung der Solarzellen. Im mitteleuropäischen Raum optimiert eine Neigung von ungefähr  $30^\circ$  und eine Ausrichtung nach Süden den jährlichen Stromertrag. Bei Inselanlagen werden die Solarzellen eher steiler montiert, da dann der Energieertrag in der kalten, dunklen Jahreszeit wenn die Sonne tiefer steht und in der Regel mehr Strom z.B. zur Innenraumbelichtung benötigt wird, höher ist. Für ein Solarfahrrad, das ständig und unabhängig vom Sonnenstand den Standort wechselt, kommt auch wegen der geringeren Windanfälligkeit nur horizontal montierte Zellen in Frage. Unten stehender Grafik zufolge ist der Ertrag bei horizontaler Montage immer noch 95% des maximal möglichen Ertrags fix montierter Solarzellen. Durch genaue Nachführung der Solarzellen könnte noch mehr Energie aus einer gegebenen Solarzellenfläche gewonnen werden.



Abhängigkeit des Energieertrages vom Neigungswinkel fix montierter Solarzellen.

#### 4.1.5 Laderegler

Für Solarmodule gibt es eine Reihe von Laderegler, die auf 12V-Bleiakkus abgestimmt sind. In seltenen Fällen beinhalten sie sogar einen Maximum Power Point Tracker (MPPT). Dies ist eine besonders sinnvolle Lösung, da Laderegler ohnehin eine geregelte Ausgangsspannung besitzen müssen und daher meist die Spannung runter und den Strom hoch regeln. Das ist im Prinzip genau das selbe, dass auch ein MPPT macht.

Darüber hinaus besitzen gute Laderegler eine Lastverteilerschaltung, die je nach System, der Batterie oder der Last den Vorrang gibt. Ein Laderegler, der dem Akku den Vorrang gibt, versorgt diesen immer mit 14,4 V. Je nach Type und Ladezustand des Akkus fließt ein mehr oder weniger großer Ladestrom. Produziert nun die Solarzelle mehr Energie als zum Laden

des Akkus benötigt wird, dann wird die „überschüssige“ Energie über den Lastausgang abgegeben. Bei voller Solareinstrahlung und bei vollem Akku steht am Lastausgang die gesamte Paneelleistung abzüglich der Umwandlungsverluste zur Verfügung.

Vorteil dieser Schaltung ist, dass in dem Fall, wo die vorgesehene Last keinen Strom zieht, die überschüssige Energie über z.B. Heizwendel abgebaut werden kann. Dadurch bleibt die Temperatur der Solarzellen, niedriger, als wenn sie nicht belastet werden würden. Ausserdem wird der Akku auch dann geladen, wenn die Solareinstrahlung nur sehr gering ist.

Nachteil ist, dass für den Fall, dass die Solarzellen nicht ausreichend Energie liefern, die Last an den Akku direkt angeschlossen werden muss und somit die Entladeschlussspannung des Akkus extra überwacht werden muss.

Ein Laderegler, der der Last den Vorzug gibt hat den Nachteil, dass die Akkus nur dann geladen werden, wenn keine Last am Ausgang ist. Dient das Solarsystem zum Beispiel zur Versorgung einer Lichtanlage, dann wird immer über die Glühbirne ein Strom fließen, auch wenn die Spannung nicht mehr reicht, um sie zum Leuchten zu bringen. In diesem Fall hat weder die Lastseite noch die Batterieseite etwas von der eingestrahnten Sonnenenergie

Bei dem Laderegler, den ich zur Verfügung gestellt bekommen habe, handelt es sich um eine Kombination beider Systeme, wobei es eigentlich ein Laderegler der zuerst angeführten Art ist. Bei geringer Sonneneinstrahlung und unterhalb der Entladeschlussspannung gibt er dem Akku den Vorzug. Bei mittlerer Sonneneinstrahlung und vollem Akku bekommt die Last den Vorzug und bei starker Einstrahlung wird die Akkuladespannung auf 14,4 V begrenzt, während die Spannung am Lastausgang im Leerlauf auf Solarpaneelspannung steigt.

Um die Funktionsweise dieses nicht näher bezeichneten Ladereglers herauszufinden, wurden zuerst der Solargenerator durch ein geregeltes Netzgerät simuliert. Dabei konnte das prinzipielle Verhalten des Ladereglers untersucht werden. Um genaue Ergebnisse zu erzielen, wurde ein Schaltung konstruiert, bei der ein Solarmodul im Bereich von einer bis zehn Minuten auf diesen Laderegler und dann auf einen anderen oder auf Leerlauf bzw. Kurzschluss geschaltet wurde. Aus den gemessenen Strömen und Spannungen wollte ich versuchen, Rückschlüsse auf den Wirkungsgrad zu gewinnen und Vergleiche mit herkömmlichen Ladereglern zu ziehen. Zur Datenaufzeichnung wurde eigens ein Lab-View Programm geschrieben, welches über einen längeren Zeitraum Daten aufgezeichnet und zum Teil ausgewertet hätte. Nach zwei Monaten Einarbeitungszeit waren Hardware und Software ausgereift und erprobt, so dass sofort mit der Messdatenaufzeichnung begonnen werden hätte können. Leider waren dann die institutseigenen Solar- und Messanlagen über ein halbes Jahr belegt, weshalb es nicht einmal möglich war, an einem einzigen, sonnigen Tag Aufzeichnungen zu machen um Berechnungen anzustellen.

Zum Vergleich wurde vom Institut ein Solarladeregler zu Verfügung gestellt. Dieser sollte ein Überladen als auch ein Tiefentladen von Blei-Säure-Akkus verhindern. Eine eingebaute

Schutzdiode dient zur Unterbindung einer Selbstentladung über die Solarzellen während der Nacht.

Modulstrom max.	8 A
Laststrom max.	8 A
Systemspannung	12 V
Tiefentladevorwarnung	SOC < 40%
Lastabwurf	SOC < 30%
Rückschaltung	SOC > 50%
Ausgleichsladung (14,7 V)	SOC < 40%
Zyklisches Laden (14,4 V)	SOC < 70%
Ladeendspannung	13,7 V

SOC ... State of Charge ... Ladezustand

*Tabelle 4.21: Daten des Solarladereglers SR8 der Firma Solomon [4.35]*

## Quellen:

- [4.1] Bosch *Kraftfahrtechnisches Handbuch 23*. aktualisierte u. erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg (1999)
- [4.2] Pohl W. *Vergleich von Drehstrommotoren für Elektrofahrzeugantriebe. Der Einsatz der permanentmagneterregten Synchronmaschine mit Feldschwächung in Verbindung mit verschiedenen Getriebekonzepten*. Institut für Elektrotechnik an der Montanuniversität Leoben (1994)
- [4.3] Gross A.C. et al. *Die Aerodynamik von Muskelfraft-Fahrzeugen* Spektrum der Wissenschaft S. 68ff. Feb. (1984)
- [4.4] Fischer, R. *Elektrische Maschinen*. 10., überarb. Aufl. Leipzig (1999)
- [4.5] Storey JW, Schinckel AET, Kyle CR. *Solar Racing Cars 1993 World Solar Challenge*. Australian Government Publishing Service. Canberra (1994)
- [4.6] Verbund selbstverwalteter Fahrradbetriebe e.V. (2002): <http://www.vsf.de/seiten/reif.htm>
- [4.7] Rayovac Corporation (2002): <http://www.rayovac.com/bus OEM/oem/specs/bat813.shtml>
- [4.8] AccuCell (2002): <http://www.accucell.de>
- [4.9] Ovonic (1998): <http://www.ovonic.com/evpacks.html>
- [4.10] Texaco Ovonic Battery Systems LLC (2002): <http://www.ovonic.com>
- [4.11] Kopera, John J.C. *Inside the Nickel Metal Hydride Battery* Texaco Ovonic Battery Systems LLC (2002)
- [4.12] <http://www.electric-fuel.com/EV>
- [4.13] Instant Power Products (2002): <http://www.instant-power.com/index.shtml>
- [4.14] Binyamin K. et al. *3300mAh Zinc-Air Batteries for Portable Consumer Products* Electric Fuel Limited (2001)

- [4.15] Beta Research and Development Ltd (2002):  
[http://www.betard.co.uk/z5c\\_spec.htm](http://www.betard.co.uk/z5c_spec.htm)
- [4.16] Tomazic G. *Zinc-Flow Battery Ready for Mass Production* Powercell Tech Paper. Mürzzuschlag (1995)
- [4.17] Maxwell Technologies Inc. (2002):  
<http://www.maxwell.com/ultracapacitors/products/datasheets.html>
- [4.18] Rehm O. (2002):  
<http://www.rehmweb.de/elektroflieger/Bilder/PbH2SO4-Akkuschema.jpg>
- [4.19] Hawker *When You're Designing in Performance, Don't Settle For Less Than Pure Lead-Tin*. Missouri (2000)
- [4.20] Hawker. *Genesis Selection Guide* 4<sup>th</sup> edition. Missouri (2000)
- [4.21] Optima Batteries Inc. *Superior Life, Superior Power*. Aurora (2000)
- [4.22] Bear J. *Exide Orbital* Unveröffentlichtes Dokument von Exide (2001)
- [4.23] SANYO Energy Europe Co.GmbH *European market situation and trend of Pedal assisted bicycle* Powerpoint-Präsentation. München (2001)
- [4.24] Gérard *General cell characteristics* Saft, Romainville (1999)
- [4.25] Physik-Projekt (Theodor-Heuss-Gymnasiums Recklinghausen):  
<http://www.thg-re.de/projects/focus/solar1.htm>
- [4.26] Lingl S. - Hausarbeit an der Universität Frankfurt (1999):  
<http://www.hausarbeiten.de/rd/archiv/elektro/elektro-solarzell/elektro-solarzell.shtml>
- [4.27] Kronberger H., Nagler H. *Der Sanfte Weg*. 2. erw. u. akt. Auflage. Wien: Uranus (1997)
- [4.28] Zeitschrift Photon (1999):  
[http://photon.de/wissen/geschichte\\_zeitleiste.htm](http://photon.de/wissen/geschichte_zeitleiste.htm)
- [4.29] Physik-Projekt (Friedrich Schiller Gymnasium):  
<http://www.fsg.rt.bw.schule.de/old/shome/sozehmpg/allg/allg1.htm>

- [4.30] United Solar Systems Corp (2001):  
<http://www.unisolar.com>
  
- [4.31] Hilscher G. *Energie für das 3. Jahrtausend*. Wiesbaden: VAP (1996).
  
- [4.32] Streicher W. *Sonnenenergienutzung*. Institut für Wärmetechnik, TU Graz (2000)
  
- [4.33] Quaschnig V. *Regenerative Energiesysteme*. München: 2. Aufl. Carl Hanser Verlag (1999)
  
- [4.34] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (1997):  
[http://www.dgs-solar.org/I\\_pv1.htm](http://www.dgs-solar.org/I_pv1.htm)
  
- [4.35] Montage und Betriebsanleitung für Solarladeregler Solomon SR8

## 5. Messwerte, Messmethoden

Über Testergebnisse lässt sich streiten, besonders dann, wenn nicht nach standardisierten Prüfvorschriften vorgegangen wird. Bei den Elektrofahrradtests, die im Internet zu finden sind, tragen die testenden Personen meist wesentlich zum Ausgang des Tests bei, da das Mitstreiten, auch wenn es zum Test gehört, vom (Gemüts-)Zustand des Fahrers abhängt. Oft wird aufgrund der Vielfalt von Testfahrzeugen und des begrenzten, für den Test zur Verfügung stehenden Zeitraumes, auf mehrere Fahrer unterschiedlicher körperlicher Konstitution zurückgegriffen.

Eine Lösung dieses Dilemmas kann nur ein mobiles Messdatenerfassungsgerät, mit möglichst alle wirkenden Kräfte direkt oder indirekt gemessen und in Echtzeit erfasst werden. Überdies müssen noch Temperatur, Windverhältnisse, Luftdruck, Steigung usw. gemessen werden. Das alles zu machen bedeutet einen ungeheuerlichen Aufwand an Zeit. Deswegen wird versucht, durch Messung der einzelnen Komponenten ein mögliches genaues Bild des Gesamtkonzeptes zu bekommen.

## 5.1 Leistungsfähigkeit von Menschen

Die Angaben für die Leistungsfähigkeit von Menschen gehen stark auseinander. Manche sagen, dass 100 W Leistungsabgabe am Fahrradergometer schon viel sind, andere sprechen von 200 W Dauerleistung für durchschnittliche Bürger. Ohne geeignete Messeinrichtungen lässt sich leider keine vernünftige Messung machen. Trotzdem bot sich während der Diplomarbeit eine günstige Gelegenheit, eine Leistungsmessung durchführen zu können. Bei der steirischen Landesausstellung Energie in Weiz und Gleisdorf (28.Apr. bis 28.Okt. 2001) konnte ich am Fahrradergometer der HTL Bulme einen Test durchführen. Dabei versuchte ich, mit möglichst geringer Anstrengung zu radeln, so dass ich auch über längere Zeit nicht ins Schwitzen gekommen wäre. Wie man sieht, leistete ich spielend 120 W.

Die HTL BULME Graz präsentiert  
ihnen im Rahmen der steirischen Landesausstellung:



**Das Energieerlebnis**  
von:

**MANFRED**

Ist am 01.07.2001 auf dem Energiefahrrad

von 17:44:43 Uhr bis 17:45:43 Uhr 01:00 min

geradelt. In dieser Zeit haben Sie 2,0 Wh erzeugt

und dabei eine durchschnittliche Leistung von 121,1 Watt erreicht.

Mit dieser Energie hätten Sie zum Beispiel  
01:11 Minuten fernsehen können.







Bild 5.1: Leistungstest mit dem Energiefahrrad der HTL Bulme

## 5.2 Motoren

### 5.2.1 Radnabenmotoren

Nach umfangreicher Recherche fiel die Entscheidung auf zwei ähnliche Gleichstrommaschinen, die beide in Fahrradnaben integriert waren. Der Elektrohilfsantrieb Odysseus wurde inklusive Steuerung und Gasdrehgriff von der deutschen Firma Heinzmann gesponsert. Er ist für 36 V Nennspannung ausgelegt und leistet 400 W. Den anderen Motor bekam ich inklusive Steuerung, Gasdrehgriff und Akkubox mit Gepäckträgerhalterung um ca. den halben Preis von der österreichischen Firma Schachner.

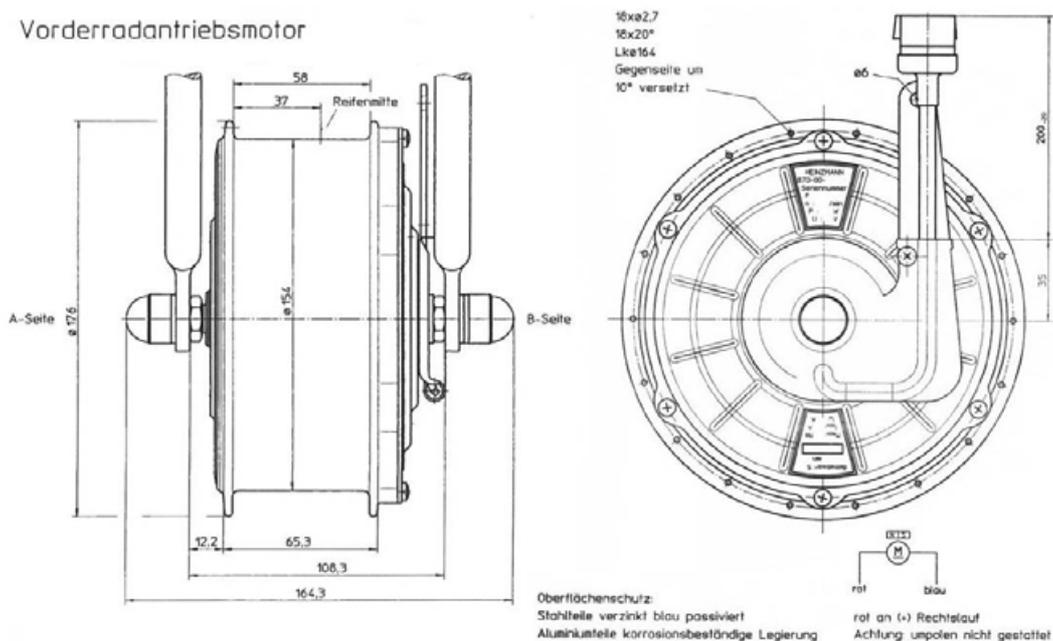


Bild 5.2: Heinzmann Radnabenmotor Odysseus für Vorderrad

Zur Bestimmung der an der Welle abgegebenen Leistung  $P$  in Watt eines Motors wird am besten die Drehzahl  $n$  in Umdrehungen pro Minute und das Drehmoment  $M$  in Newtonmeter gemessen. Dies klingt im ersten Moment sehr einfach, ist es aber nicht. Zu aller erst muss der Motor sicher in einen Motorprüfstand eingespannt und das Drehmoment ausreichend abgestützt werden. Um den Motor nicht nur im Leerlauf testen zu können, wird eine Bremse benötigt. Für genaue Messungen ist eine passende Drehmomentmesswelle notwendig, die zwischen Motor und Bremse geschaltet wird. Schließlich benötigt man noch ein Drehzahlmessgerät, mit dem die Motordrehzahl gemessen werden kann.

$$P = M \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60} \quad \{5.1\}$$

Aufgrund der stark begrenzten Energiespeicherkapazität eines Elektro- oder Solarfahrrades ist besonders wichtig, über den Wirkungsgrad bescheid zu wissen. Für die Auslegung eines Antriebes sollte der Verlauf des Wirkungsgrades über der Drehzahl bzw. über dem Drehmoment bekannt sein. Um eine Aussage über den Verlauf der Kennlinie geben zu können, muss der Motor unter möglichst vielen Betriebspunkten gemessen werden. Neben der an der Welle abgegebenen Leistung muss auch die aufgenommene Leistung bzw. die Leistung, die von der Batterie zur Verfügung gestellt wird, gemessen werden. Bei Messung der Leistung ab Batterie ist die gesamte Wirkungskette von der Batterie bis zur Welle berücksichtig. Dies ist deswegen von Vorteil, weil ein Drehzahl geregelter Motor nie ohne Reglerelektronik betrieben werden kann und somit Regler und Motor eine Einheit darstellen. Die einzigen, bei diese Vorgehensweise nicht berücksichtigten Verluste sind die, welche bei der Umwandlung der chemischen Energie in elektrische innerhalb der Batterien verloren geht.

### 5.2.2 Motorprüfstand

Der neue, vollautomatische Motorprüfstand des Institutes ist ein geniale Sache. Über die Schnittstellenkarten des Messstandrechners werden sämtliche Messdaten aufgezeichnet. Zur einfacheren Verarbeitung wurde mit LabView ein eigenes Messdatenerfassungsprogramm programmiert, mit dem alle möglichen Daten aufgezeichnet und mit einem Timestamp versehen wurden. Die Fragezeichen in den Diagrammen beziehen sich auf Module, die zwar zur Datenaufzeichnung verwendet wurden, aber zum Zeitpunkt der Erstellung des Bildes nicht verfügbar waren.

Gemessen wurde mit dem 3-phasigen Power Analyzer D 4000 von der LEM Norma GmbH. Dieses Gerät hat 3 potentialgetrennte Spannungs- und 3 potentialgetrennte Stromeingänge und misst Gleichspannungen bzw. Wechselspannungen zwischen 0,1 Hz...300 kHz. Die DC-Messgenauigkeit zwischen 10 kHz und 100 kHz beträgt für Spannungen  $\pm (0,04/\text{kHz} \% \text{ Messwert} + 0,3 \% \text{ Messbereich})$ , für Ströme am 30A-Eingang  $\pm(0,5/\text{kHz} \% \text{ Messwert} + 0,3 \% \text{ Messbereich})$  und für Leistungen am 30A-Eingang  $\pm(0,5/\text{kHz} \% \text{ Messwert} + 0,45 \% \text{ Messbereich})$ .

Eine Oberschwingungsanalyse wird nach der Fast Fourier-Transformation durchgeführt. Die Messwerte (Effektivwerte  $U$  und  $I$  bzw. Wirkleistung  $P$ ) werden folgendermaßen ermittelt:

$$U_{RMS[V]} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt \right)^{1/2} \quad \{5.2\}$$

$$I_{RMS[A]} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt \right)^{1/2} \quad \{5.3\}$$

$$P_{ACT[W]} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i dt \right) \quad \{5.4\}$$

Die Messwandlerkarten stammen von der Dewetron Elektrische Messgeraete Ges.m.b.H. Das Dewe-Rack-16, in dem 6 DAQP-V-DSUB Messkarten ( $\pm 10$  mV... $\pm 50$ V  $\pm 0,05\%$ ) stecken, konnte mit LabView ausgelesen werden.

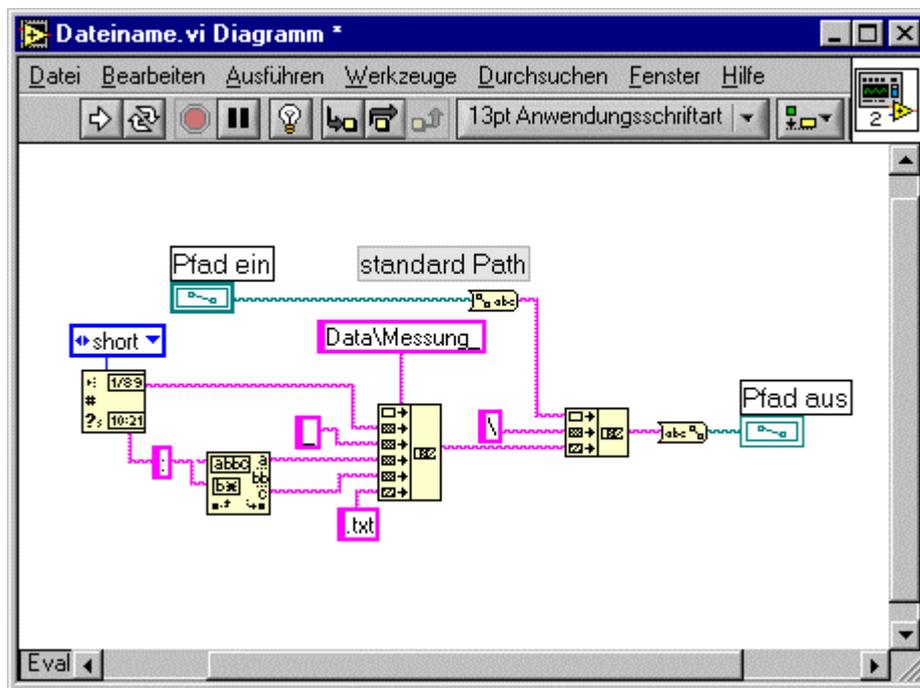


Bild 5.3: Diagramm des Virtual Instruments „Dateiname.vi“

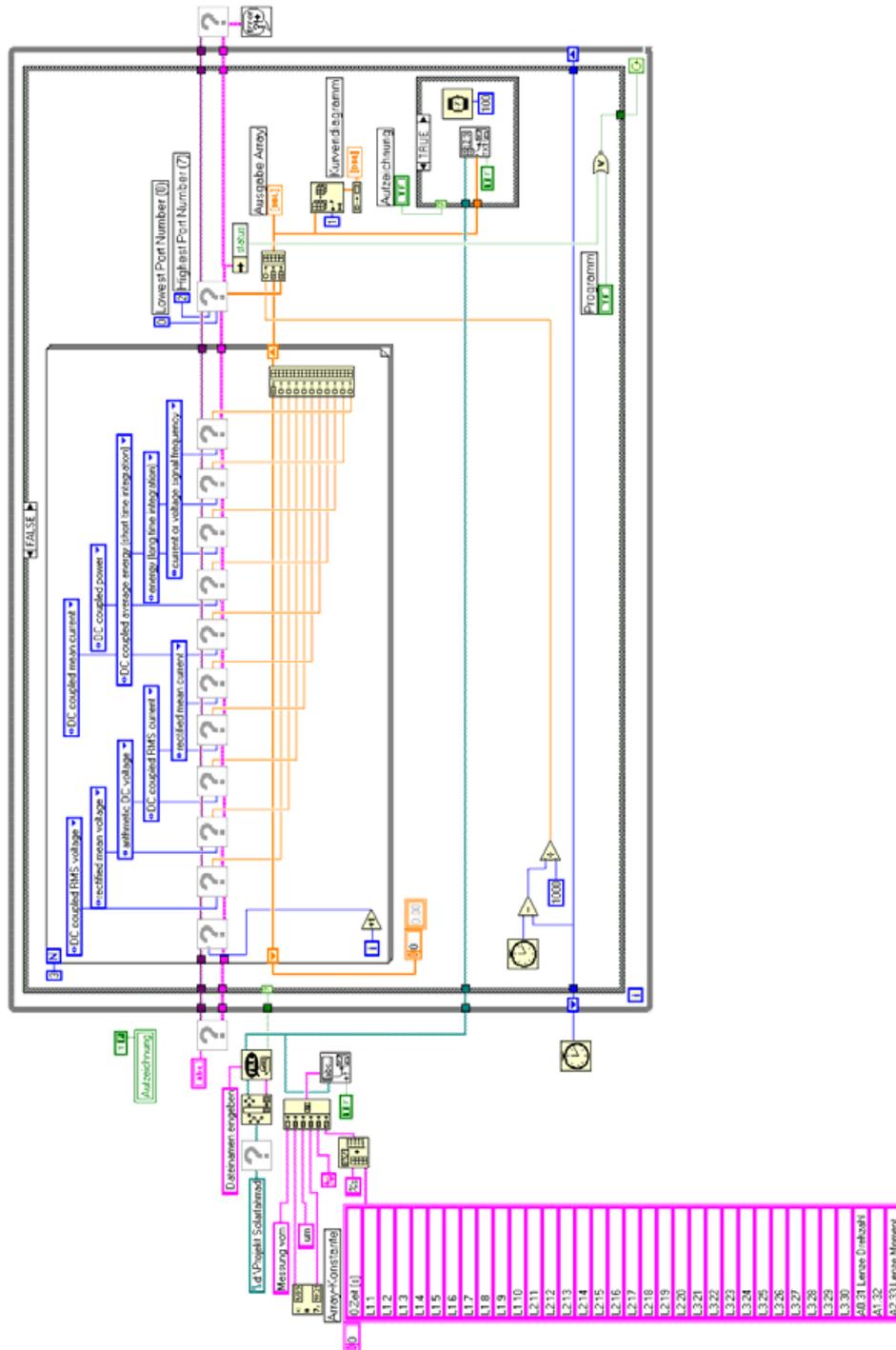


Bild 5.4: Diagramm des LabView-Programms zur Datenerfassung (Motorprüfstand)

Statt einer Bremse wurde ein Servomotor von Lenze verwendet, von dem jeder Betriebspunkt bekannt war. Durch Vorgabe eines bestimmten Bremsmoments konnten so unterschiedliche Belastungszustände gemessen werden. Zur Drehmomentmessung wurde eine Drehmomentmesswelle von Staiger & Mohilo eingesetzt. Zum Kalibrieren wurde auf der Prüfmaschinenseite ein Balken mit beidseitig gleichlangen Armen, an deren Enden auf Waagschalen Messgewichten gegeben wurden, montiert. Die Bremsmaschinenseite wurde so

blockiert, dass sich der Balken in horizontaler Position befand. Nun wurden einmal links ( $m_{links}$ ) und einmal rechts ( $m_{rechts}$ ) Messgewichte bis zu 7 kg auf die Wagschalen gegeben. Die Hebelarme  $r$  beider Seiten waren genau 1 m lang, so dass sich das Drehmoment  $M$  folgender Weise berechnen ließ:

$$M = m \cdot g \cdot r = (m_{rechts} - m_{links}) \cdot 9,81 \text{ ms}^{-1} \cdot 1 \text{ m} \quad \{5.5\}$$

Die Momente wurden anschließend über der Spannung in ein Diagramm eingetragen und die Trendgerade bestimmt. Zur Ermittlung der Trendgeraden wurden am 5.3.02 die Spannungswerte unter 0,5 V weggelassen und das Vorzeichen der fälschlicher Weise aufgezeichneten, gleichgerichtete mittlere Spannung in den Fällen geändert, in denen die linke Masse größer war als die rechte. Die gleichgerichtete mittlere Spannung unterschied sich abgesehen vom Vorzeichen nur leicht von der bei den nachfolgenden Tagen aufgezeichneten arithmetische Gleichspannung.

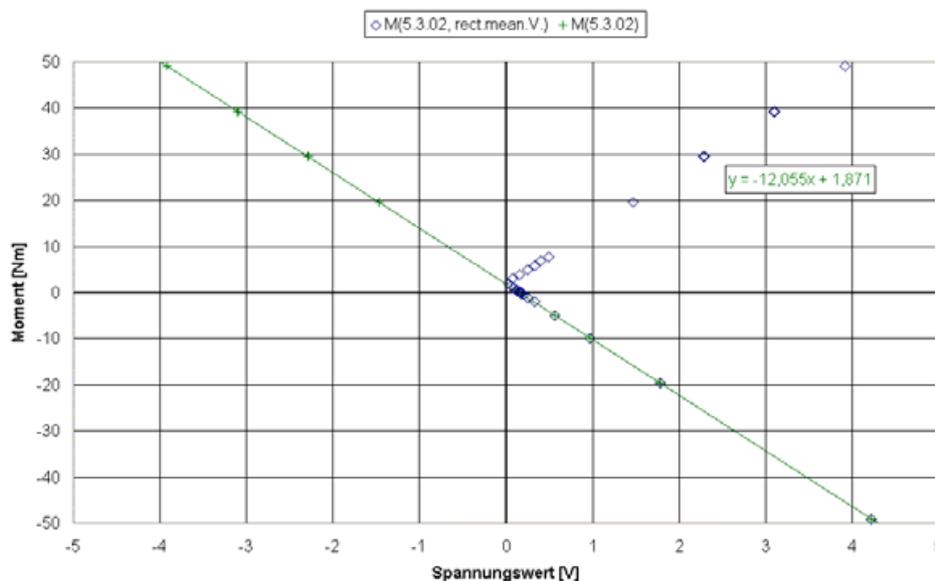


Bild 5.5: Kalibriergeraden der Drehmomentmesswelle vom 5.3.02 mit den aufgezeichneten quadratischen Mitteln der Spannungswerte

Interessanter Weise wurden am nächsten Tag trotz gleicher Messgesichte andere Spannungswerte aufgezeichnet, so dass sicherheitshalber vor jeder Motormessung eine neue Kalibriergerade aufgezeichnet wurde. Um einem Verfälschen der gemessenen Spannungen durch das leichte schwingen des Messbalkens entgegen zu wirken, wurden bei jeder Änderung der Masse mehrere Messwerte aufgenommen und bei der Auswertung gemittelt. Für die Messung wurden z.B. am 13.3.02 durch diese Vorgehensweise 198 Werte in gut einer Stunde (am 6.3.02 sogar 451 in drei Stunden) aufgezeichnet.

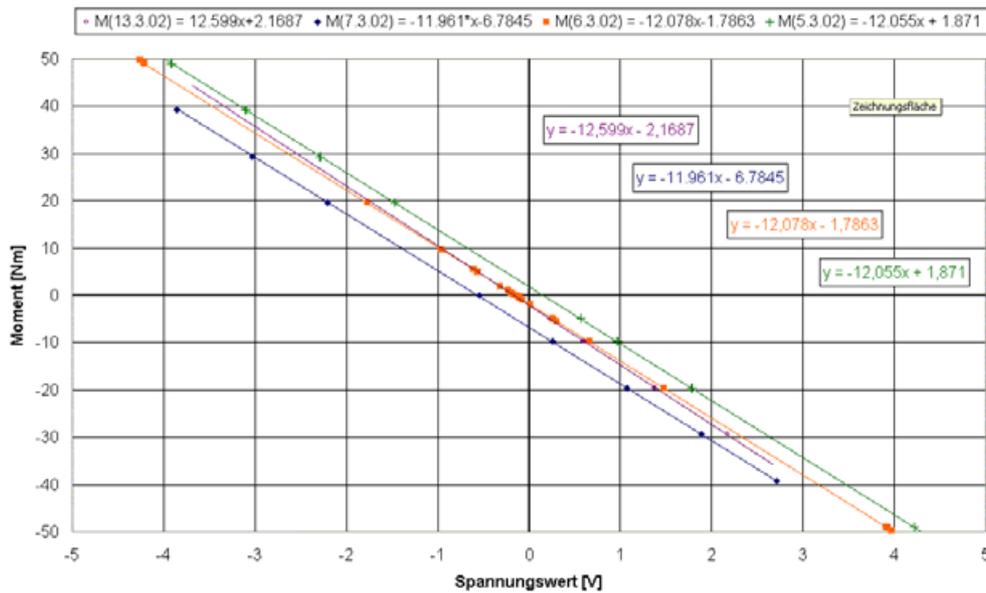


Bild 5.6: Kalibriergeraden der Drehmomentmesswelle zwischen 5.3. und 13.3.02. Die eingezeichneten Punkte wurden mit Hilfe der Geradengleichung

### 5.2.3 Radnabenmotor von Heinzmann

Der Motor von Heinzmann wurde etwa zehn Minuten mit Nennspannung (35,004 bis 37,466 V mit einer mittleren Spannung von 36,802 V) am Prüfstand betrieben. Acht Minuten lang wurden Datensätze vom Prüfstandsrechner mit dem LabView-Programm aufgezeichnet. Auf die Daten konnten leider nicht in Echtzeit zugegriffen werden. Die Zeitperiode zwischen den Aufzeichnungsperioden variierten sehr stark im Bereich von 0,218 bis 0,538 s. Die mittlere Zeit zwischen dem Schreiben der Datensätze betrug 0,380 s. Da jeder Motor eine gewisse Warmlaufphase benötigt, wurden nur letzten 1000 Datensätze über etwa 6 Minuten 20 Sekunden ausgewertet. Bei der Analyse der Messwerte fiel auf, dass nur zwischen einer Drehzahl von 138 bis 218 Umdrehungen pro Minute brauchbare Werte aufgezeichnet wurden. Aus diesem Grund wurden vorab Datensätze mit Drehzahlen unter 130 und über 230 Umdrehungen pro Minute nicht in die Auswertung miteinbezogen.

Bei üblicher Betriebsdrehzahl oder umgerechnet etwa 20 km/h hat dieser Motor trotz Getriebe einen erstaunliche guten Wirkungsgrad von über 80%!

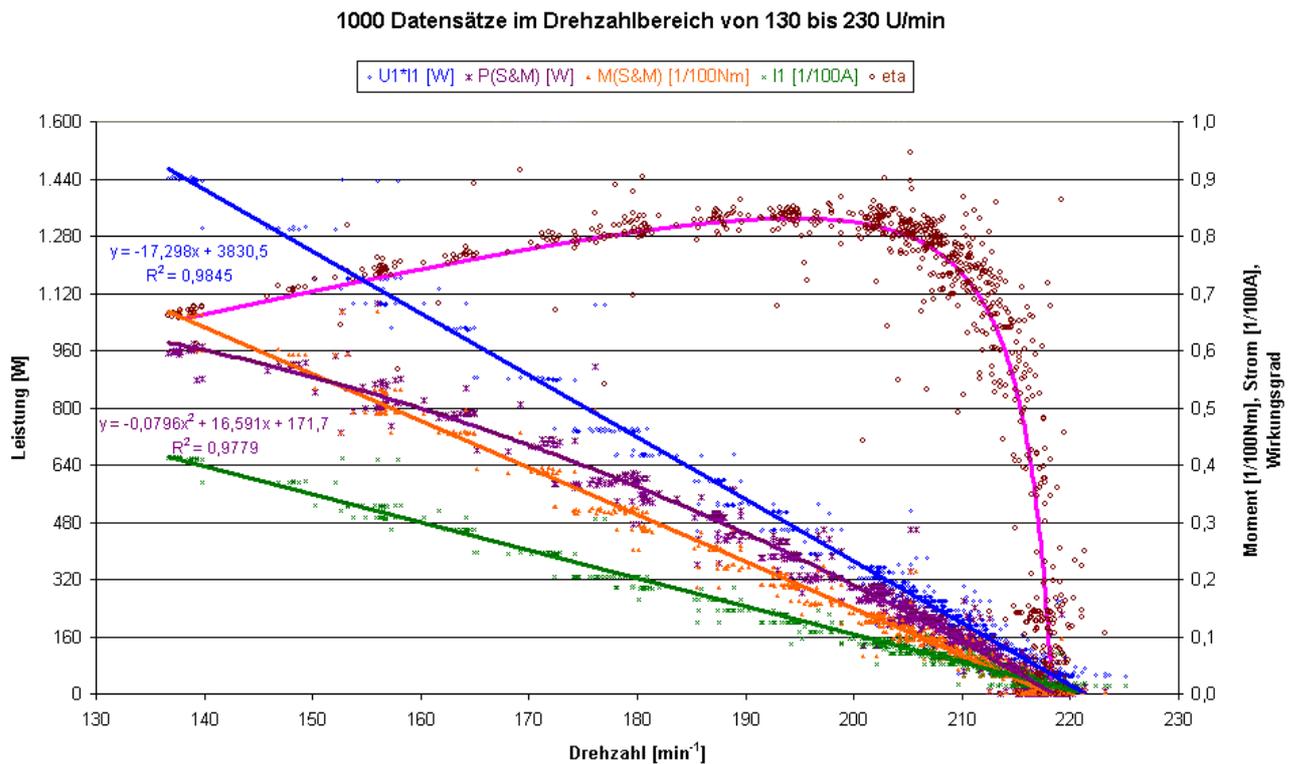


Bild 5.7: Messergebnis des Heinzmannmotors

#### 5.2.4 Radnabenmotor von Schachner

Die Messung des Schachner-Motors verlief nicht so glatt. Der Motor wurde über die elektronische Regelung betrieben wurde, welche den Gleichstrom der Batterie mit etwa 20 kHz zerhackt. Je nach Drehgriffstellung änderte sich das Puls-Breiten-Verhältnis, so dass bei vollem Drehgriffausschlag das Puls-Breitenverhältnis am größten ist. Bei halber Drehgriffstellung war das Puls-Breitenverhältnis etwa 1:1. Weil nun aber das Strom- und Spannungsmessgerät eine Abtastfrequenz von nur 300 kHz hatte und die Ausgangsspannung der Motorregelung ein zu unperfektes Signal lieferte, konnte die mittlere, aufgenommene Leistung nicht genau genug gemessen werden. Folglich ergaben sich stark abweichende Werte, die eine Auswertung sinnlos machten.

Ursprünglich wurde mit Hilfe eines Oszilloskops versucht, Pulsweiten von 25%, 50% und 75% einzustellen, um eine Fahrt im Teillastbereich zu simulieren. Die Werte konnten mit dem Oszilloskop auf Diskette abgespeichert werden.

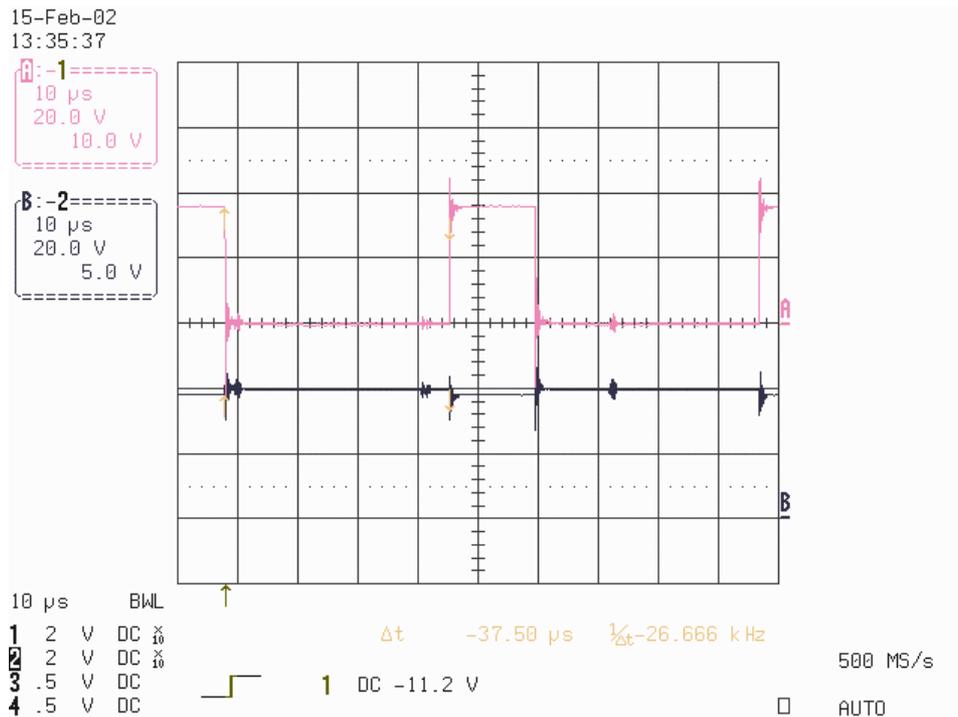


Bild 5.8: 25% Pulsweite, teilbelastete Maschine

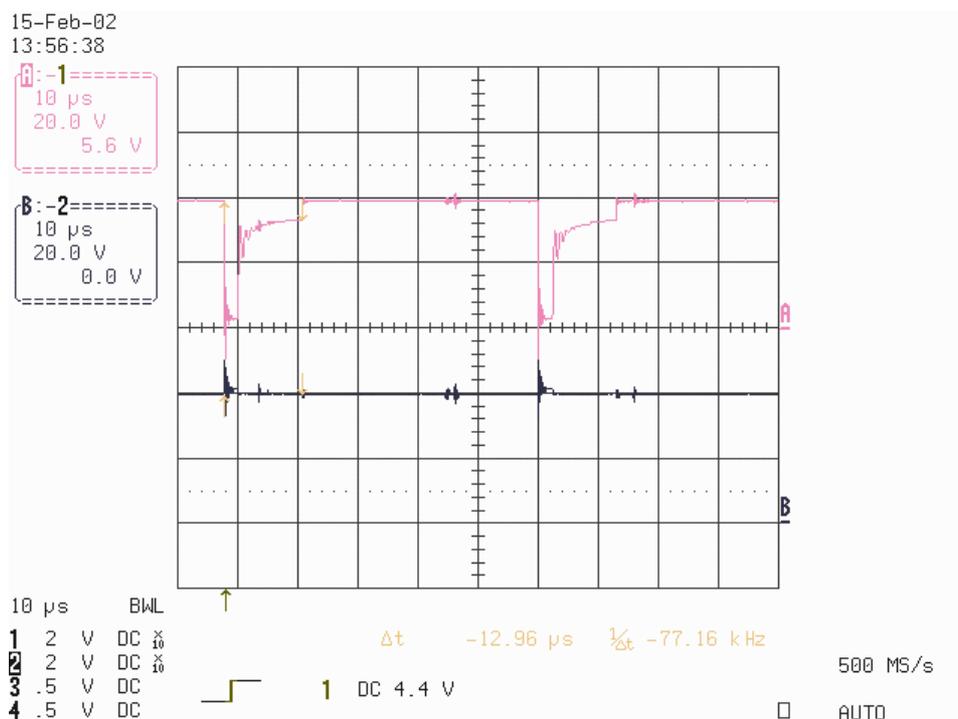


Bild 5.9: 75% Pulsweite im Leerlauf

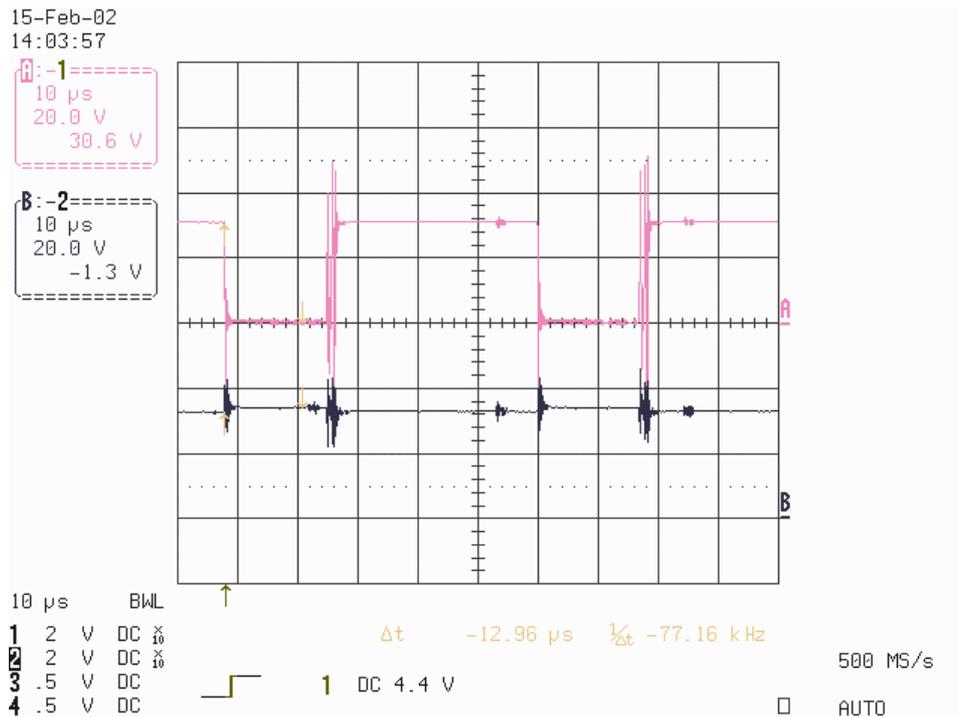


Bild 5.10: 75% Pulsweite teilbelastet

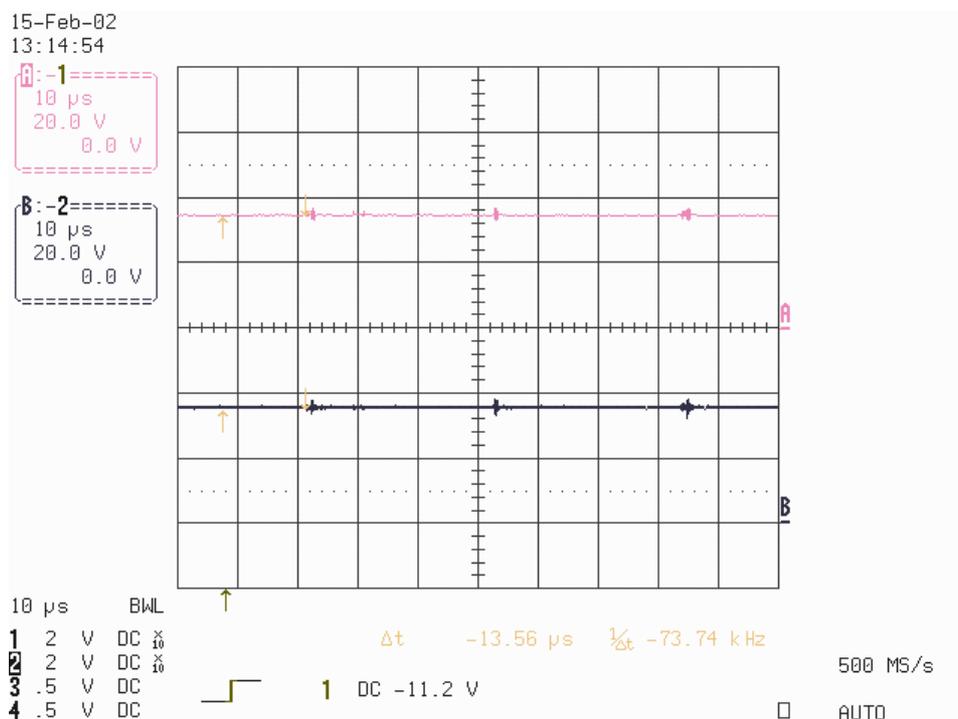


Bild 5.11: 100% Pulsweite, Leerlauf

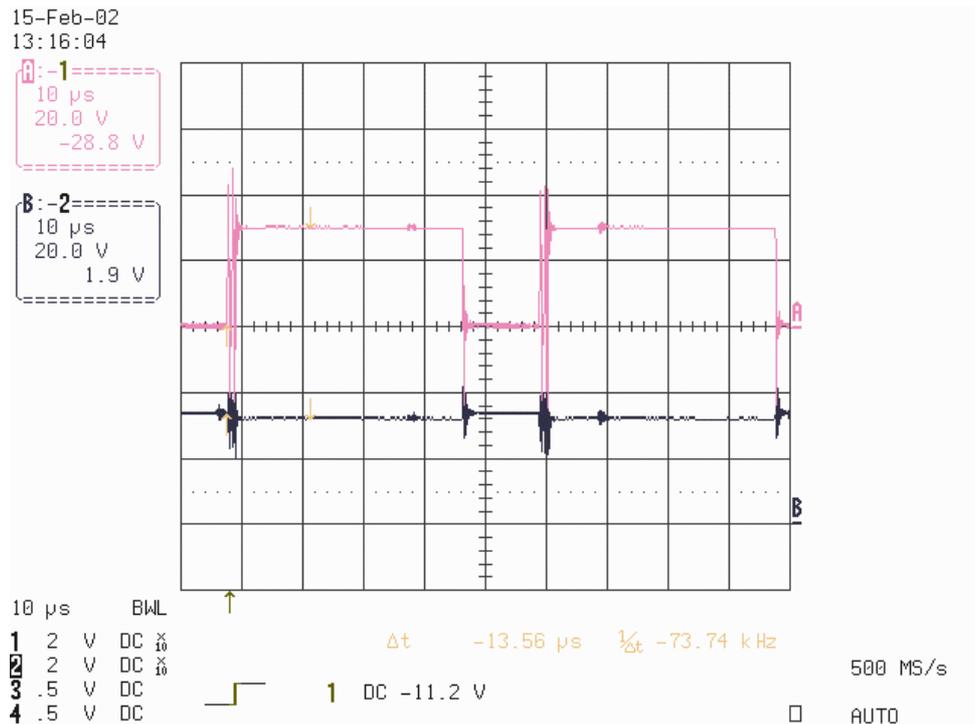


Bild 5.12: 100% Pulsweite, teilbelastet

Aus die Oszilloskopbildern ist sehr schön zu erkennen, dass bei stärker werdender Belastung die Spannung leicht einbricht. Interessant ist, dass auch die Pulsweite verkürzt wird. Dies dürfte eine Art Überlastschutz für den Motor oder eine Leistungsbegrenzung sein. Im Leerlauf fällt auf, dass die Spannung schon vorzeitig in Form eines leichten Bogens angehoben wird, wobei es zu einer starken Abweichung vom idealen Rechteckimpuls kommt. Als nicht unwesentlich sei noch angemerkt, dass die Pulsweite immer im Leerlauf eingestellt wurde und im Falle der 100% auch unter Last bei vollem Gasdrehgriffausschlag aufgezeichnet wurde.

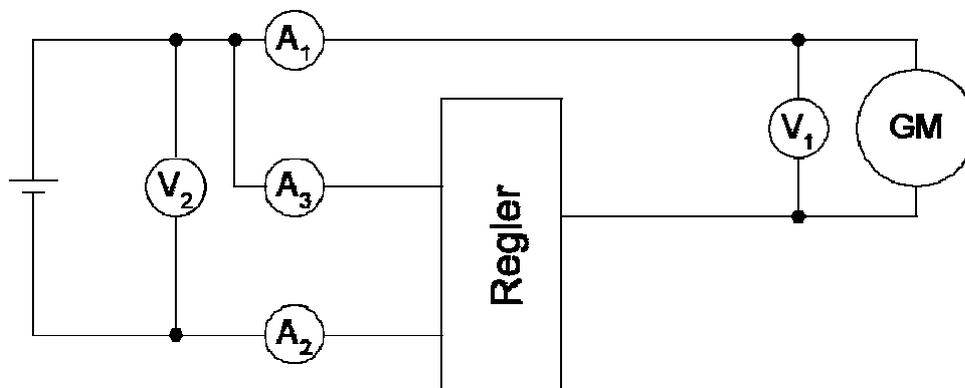


Bild 5.13: Messschema für die Vermessung des Motors von Schachner

## 5.3 Akkus

### 5.3.1 Gemeinhin bekannte Probleme

In Sekundärzellen, auch Akkumulatoren oder Akkus bezeichnet, finden beim Laden und Entladen chemische Reaktionen statt. Nun ist bekannt, dass die Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Reaktionen stark von der Temperatur abhängt. Aus diesem Grund haben Akkus bei unterschiedlichen Temperaturen unterschiedliche Kapazitäten und benötigen unterschiedliche Ladespannungen.

Beim Laden bzw. Entladen wird meist eine Elektrode zersetzt während sich auf der anderen Material abscheidet. Die Materialabscheidung beziehungsweise der Zersetzungsprozess werden durch den Zufall gesteuert. Es ist kann sein, dass eine Elektrode stellenweise total aufgelöst wird, so dass zum Beispiel bei Bleiplatten nur mehr das Elektrodengitter übrig bleibt. Auf der anderen Elektrode kann es zu einem derart starken Dendritenwachstum kommen, dass der Abstand zwischen den Elektroden überbrückt wird, wodurch in der Zelle einen Kurzschluss entsteht. Diese Unregelmäßigkeiten werden durch Verunreinigungen, durch ungleichmäßigen Beschaffenheit der Elektroden oder durch eine Verlagerung des Elektrolyten verursacht.

Bei Blei-Säure-Batterien nur durch das Gasen beim Überladen und durch regelmäßigen Gebrauch eine Elektrolytschichtung verringert. Ist dies nicht der Fall, so werden die Platten oben stärker zersetzt als unten. Dadurch sinkt die Strombelastbarkeit. Die Elektrodenplatten werden ebenfalls durch Vibrationen zerstört. Elektrodenmaterial, dass von den Platten abblättert sinkt zu Boden und kann dort ebenfalls einen Kurzschluss verursachen. Um diesen Vorgängen entgegenzuwirken wird versucht, den Elektrolyten, Schwefelsäure im Falle der Bleiakkus, durch ein feines Vlies (verschlossene Pb-Säure-Akkus), dass sich zwischen den Platten befindet, oder durch eine gelartige Masse (Gelakkus) zu fixieren. Während früher unbefüllte Blei-Säure-Akkus praktisch unbegrenzt lagerbar waren, entladen sich die wartungsfreien Akkus von selbst, so dass der Ladezustand lagertemperaturabhängig nach ein bis drei Monaten auf 90% der ursprünglichen Kapazität gefallen sein kann.

Zu guter Letzt spielt auch der Elektrolyt eine wesentliche Rolle. Als Elektrolyten werden saure, basische oder organische Lösungen eingesetzt. Diese können sich natürlich mit der Zeit verändern. Bei Pb-Akkus kommt es zum Beispiel zu einer Ausscheidung von Sulfat, dass sich als dünner Film über die Bleiplatten legt, die aktive Fläche verkleinert und somit die Strombelastbarkeit senkt. Diesem als Sulfatierung bekannt gewordenen Prozess kann durch Spannungspulse während des Nichtbetriebes entgegengewirkt werden. Bei NiCd-Zellen kommt es zu einem ähnlichen Prozess. Der sogenannte Memoryeffekt wird durch Kristallisation des Elektrolyten verursacht.

Die mehrfach angesprochene Stromfähigkeit von Akkus hängt natürlich von der aktiven Oberfläche der Elektroden und dem Querschnitt der leitenden Platten und Verbindungen ab. Da sich diese beiden Eigenschaften umgekehrt proportional verhalten, kann eine Hochstromzelle nicht gleichzeitig eine Hochenergiezelle sein. Bei Hochstromzellen müssen stärkere, am chemischen Prozess unbeteiligte Leiter verwendet werden, welche die spezifische Energie bzw. die Energiedichte senken.

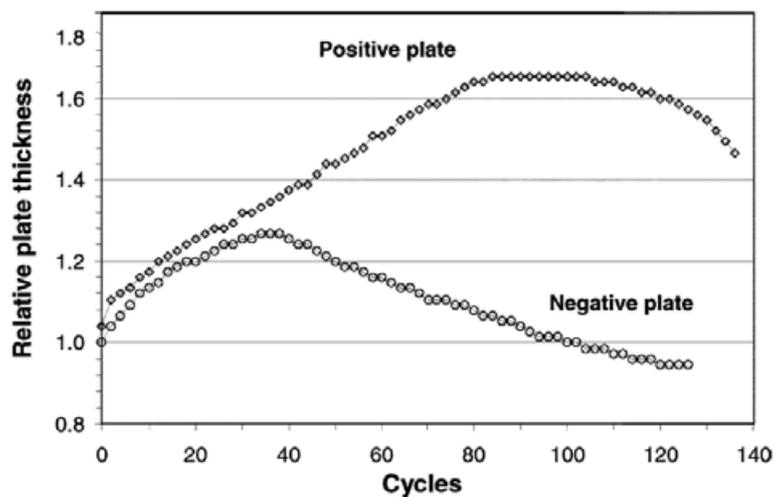


Bild 5.14: Veränderung der Plattendicke von Bleiakku über der Zyklanzahl [5.1]

Nun kann sich jeder gut vorstellen, dass Akkus nur schwer getestet werden können. Ich konnte auch keine guten Vergleichstest im Internet finden. Aus diesem Grund habe ich versucht, mit dem vorhandenen Material einfache Entlade- und Ladeversuche zu machen und die Messdaten auszuwerten.

### 5.3.2 NiCd-Zellen von Sanyo

Die 32 NiCd-Akkus von Sanyo sollten „zykliert“ werden, Zyklieren nennt man das wiederholte Entladen und Laden von Akkus, um sie „aufzufrischen“. NiCd-Akkus haben, wie auch andere Akku-Typen, die Eigenschaft, erst nach ein paar Ladezyklen volle Kapazität zu erreichen. Um dies nachzuvollziehen wurden die Akkus fünfmal entladen und wieder geladen. Je nach Ladestrom dauerte ein Zyklus fast einen ganzen Tag. Bei 32 Akkus ergibt das insgesamt 160 Zyklen, wobei oft nur zwei oder weniger der vier Ladeausgänge des Ladegerätes verwendet werden konnten. Einmal verursachte ein schlechtes Kabel falsche Messwerte, dann wieder brannte eine Sicherung nach der anderen durch und irgendwann versagte der automatische Lüfter des Ladegerätes, das dann wegen Überhitzung abschaltete.

Und zu guter Letzt war es mit diesem Ladegerät entgegen den Herstellerangaben nicht möglich, 4 Zellen gleichzeitig mit den maximalen 2 A zu laden, weil das Ladegerät die Spannungsüberhöhung am Ladeende nicht mehr korrekt erkennen konnte und die Akkus „ewig“ weitergeladen hätte. Dies erklärt auch die einmal mit einem älteren, 7 Ah Akku gemessenen, 23 Ah, die laut Anzeige gespeichert werden hätten sollen. Vermutlich ist die angezeigte Ladekapazität auch nur ein Produkt aus Ladezeit  $\Sigma\Delta t$  und Ladestrom  $I$  und nicht:

$$\text{Kapazität} \approx \frac{\Sigma(U_t \cdot I_t \cdot \Delta t)}{\text{Nennspannung}} \quad \{5.6\}$$

wobei  $U_t$  und  $I_t$  Spannung bzw. Strom zum Zeitpunkt  $t$  und  $\Delta t$  die zwischen zwei Messungen vergangene Zeitdauer ist.

Jeder Zyklus begann mit einem Entladevorgang. Die Startzeit und die ermittelte Entladekapazität wurden gespeichert. Nach kurzer Pause (ca. 30 Minuten) wurde mit dem Laden begonnen. Die ermittelte Ladekapazität, die Zeit bei Ladeende und die Ladeschlussspannung  $U_{\text{Ende}}$  wurden gespeichert.  $U_{\text{Start}}$  wurde direkt vor jedem Ladebeginn notiert,  $U$  sobald ich das Ende des Ladevorganges bemerkt habe.

Nr.	Start	U_Start	Ende	U	Kap.Entl.	Kap. Lad.	U_End	Meldung
#	Tag, Zeit	V	Tag, Zeit	V	mAh	mAh	V	P3 Entladen-Laden 500mA
1	22.11.01 8:45	?	23.11.01 16:50	1,33	4.363	6.945	?	
2	22.11.01 8:45	?	23.11.01 16:50	1,33	4.553	6.083	?	
3	23.11.01 16:50	?	26.11.01 10:50	1,34	4.136	6.318	1,38	
4	23.11.01 16:50	?	26.11.01 10:50	1,34	4.521	6.116	1,39	
5	26.11.01 10:50	1,06	27.11.01 9:55	1,36	31	?	?	
6	26.11.01 10:50	1,11	27.11.01 9:55	1,36	120	6.588	1,42	
7	27.11.01 9:55	?	28.11.01 10:10	1,36	40	6.816	1,43	
8	27.11.01 9:55	1,06	28.11.01 10:10	1,36	54	7.520	1,41	
9	28.11.01 10:10	1,12	29.11.01 9:00	1,36	67	6.338	1,43	
10	28.11.01 10:10	1,05	29.11.01 9:00	1,36	33	8.125	1,43	
11	29.11.01 9:00	1,10	4.12.01 12:00	1,36	111	6.210	1,41	
12	29.11.01 9:00	1,09	4.12.01 12:00	1,36	93	6.850	1,42	
13	4.12.01 12:00	1,05	6.12.01 15:20	1,36	36	6.491	1,42	
14	4.12.01 12:00	1,07	6.12.01 15:20	1,36	34	7.215	1,43	
15	6.12.01 15:20	1,07	10.12.01 11:45	1,37	66	6.086	1,43	
16	6.12.01 15:20	1,07	10.12.01 11:45	1,37	70	6.981	1,43	
17	12.12.01 14:00	1,11	13.12.01 9:50	1,37	116	6.573	1,44	
18	12.12.01 14:00	1,06	13.12.01 9:50	1,36	31	6.698	1,46	Das Ladegerät schaltet
19	13.12.01 9:50	1,05	14.12.01 15:05	1,36	16	6.768	1,47	immer wieder kurz (~5s) auf
20	13.12.01 9:50	1,09	14.12.01 15:05	1,36	59	6.747	1,43	Laden (-> Erhaltungsladen)
21	28.12.01 20:40	1,22	29.12.01 8:10	1,36	114	6.083	1,44	
22	28.12.01 20:40	1,11	29.12.01 8:10	1,36	132	4.369	1,44	
23	29.12.01 8:10	1,06	31.12.01 17:40	1,33	36	6.492	1,46	Gerät wurde (nach???) dem
24	29.12.01 8:10	1,23	31.12.01 17:40	1,32	268	6.678	1,46	Laden ausgeschaltet, die
25	31.12.01 17:45	1,10	1.1.02 11:15	1,37	97	6.375	1,45	gespeicherten Werte wurden
26	31.12.01 17:45	1,07	1.1.02 11:15	1,37	35	7.022	1,48	notiert (Nr. 23 u. 24)
27	1.1.02 11:15	1,05	2.1.02 16:10	1,37	21	7.700	1,50	
28	1.1.02 11:15	1,07	2.1.02 16:10	1,38	54	6.734	1,49	
29	2.1.02 16:10	1,08	3.1.02 9:45	1,37	71	6.818	1,47	
30	2.1.02 16:10	1,08	3.1.02 9:45	1,37	73	6.690	1,44	
31	3.1.02 9:45	1,10	4.1.02 20:00	1,38	106	7.289	1,46	Erhaltungsladen wurde kurz
32	3.1.02 9:45	1,10	4.1.02 20:00	1,38	90	7.141	1,46	vorher durchgeführt (autom.)

*Tabelle 5.1: Ergebnis des 1. Messzyklus (Akkus Nr. 1 bis 4 wurden 3 Monate zuvor schon einmal geladen)*

Die Zellen Nr. 1 bis 4 lud ich gleich nachdem ich sie nach Leoben gebracht habe. Die Entlade-/Ladezyklen dauerten entsprechend lange, weil ich nur C/10 (Strom entspricht der Kapazität in Ah gebrochen durch 10 Stunden) eingestellt habe. Nun konnte ich nicht so lange am Institut bleiben, weshalb ich mir dann etwa drei Monate später das Ladegerät ausgeborgt habe und die Akkus zuhause zyklert habe. Sobald ich abschätzen konnte, wann ein Akku fertig war, wartete ich meist neben dem Ladegerät und schloss nach Ladeende sofort den nächsten Akku an. Dadurch konnte ich etwas an Zeit einsparen. Nach dem 5. Zyklus wurde dann leider das Ladegerät wieder am Institut benötigt.

Nr.	Start	U_Start	Ende	U	Kap.Entl.	Kap. Lad.	U_Ende	Meldung
#	Tag, Zeit	V	Tag, Zeit	V	mAh	mAh	V	P3 2000Entladen-1750Laden
1	4.3.02 19:00	1,27	5.3.02 1:26	1,37	5.241	5.981	1,46	
2	5.3.02 1:26	1,28	5.3.02 7:27	1,39	4.963	5.911	1,46	
3	5.3.02 7:27	1,28	5.3.02 13:27	1,39	5.038	5.921	1,47	
4	5.3.02 13:27	1,27	5.3.02 10:50	1,36	5.001	5.981	1,46	
5	5.3.02 10:50	1,28	6.3.02 5:57	1,40	5.197	5.981	1,48	
6	6.3.02 5:57	1,28	6.3.02 11:23	1,37	5.012	5.981	1,44	
7	6.3.02 11:23	1,28	6.3.02 18:10	1,36	5.196	5.981	1,47	
8	6.3.02 18:10	1,28	7.3.02 0:10	1,40	5.040	5.981	1,43	
9	7.3.02 0:10	1,28	7.3.02 9:27	1,36	5.218	5.981	1,46	
10	7.3.02 9:27	1,27	7.3.02 19:02	1,36	5.256	5.981	1,47	
11	7.3.02 19:02	1,28	8.3.02 1:08	1,40	5.187	5.995	1,45	
12	8.3.02 1:08	1,27	8.3.02 7:19	1,38	5.194	5.901	1,44	
13	8.3.02 7:19	1,28	8.3.02 13:32	1,37	5.085	5.981	1,45	
14	8.3.02 13:32	1,28	8.3.02 19:40	1,40	5.249	5.986	1,45	
15	8.3.02 19:40	1,28	9.3.02 7:30	1,36	5.222	5.984	1,45	
16	9.3.02 7:30	1,27	9.3.02 14:30	1,35	5.204	5.983	1,44	
17	10.3.02 2:49	1,28	10.3.02 10:44	1,36	5.247	5.981	1,45	
18	9.3.02 20:40	1,28	10.3.02 2:49	1,39	5.172	5.981	1,45	
19	9.3.02 14:30	1,28	9.3.02 20:40	1,38	5.267	5.983	1,47	
20	10.3.02 10:44	1,27	10.3.02 16:52	1,39	5.156	5.986	1,45	
21	10.3.02 16:52	1,27	10.3.02 22:57	1,39	5.082	5.981	1,43	
22	10.3.02 22:57	1,28	11.3.02 5:10	1,39	5.334	5.995	1,47	
23	11.3.02 5:10	1,28	11.3.02 13:09	1,36	5.230	5.981	1,45	
24	11.3.02 13:09	1,27	11.3.02 23:01	1,36	5.194	5.981	1,47	
25	11.3.02 23:01	1,27	12.3.02 8:41	1,37	5.090	5.981	1,44	
26	12.3.02 8:41	1,27	12.3.02 14:58	1,37	5.181	5.981	1,47	
27	12.3.02 14:58	1,27	12.3.02 21:07	1,39	5.226	5.981	1,48	
28	12.3.02 21:07	1,27	13.3.02 3:16	1,39	5.253	5.981	1,45	
29	13.3.02 3:16	1,27	13.3.02 9:29	1,38	5.220	5.981	1,47	
30	13.3.02 9:29	1,28	13.3.02 15:35	1,40	5.130	5.981	1,45	
31	13.3.02 15:35	1,28	13.3.02 21:45	1,38	5.092	5.981	1,45	
32	13.3.02 21:45	1,28	14.3.02 4:55	1,35	5.123	5.981	1,45	

Tabelle 5.2: Ergebnis des 5. Messzyklus

Fasst man die Messergebnisse aller fünf Zyklen zusammen, ist deutlich erkennbar, dass die Entladekapazität der Zellen Nummer 5 bis 32 im Mittel um 12% zwischen zweitem und fünftem Entladevorgang gestiegen ist. Dass nicht jedes Mal die selben Ströme flossen, die tatsächliche Raum- bzw. Zelltemperatur nicht gemessen oder die Zeiten zwischen den Zyklen unterschiedlich waren, wird diese Aussage kaum beeinflussen.

<b>Zellen 1 bis 4</b>		<b>Zyklus 0</b>	<b>Zyklus 1</b>	<b>Zyklus 2</b>	<b>Zyklus 3</b>	<b>Zyklus 4</b>	<b>Zyklus 5</b>
<b>Entladestrom</b>	mA	?	500	500	1500	2000	2000
<b>Ladestrom</b>	mA	?	500	500	1500	1750	1750
<b>U_Start</b>	V	?	?	1,25	1,26	1,26	1,28
<b>U</b>	V	?	1,34	1,39	1,35	1,37	1,38
<b>Kap. Entl.</b>	mAh	?	4.393	4.704	4.772	5.007	5.061
<b>Kap. Lad.</b>	mAh	?	6.366	6.085	6.040	5.969	5.949
<b>U_Ende</b>	V	?	1,39	1,45	1,39	1,46	1,46
<b>Zellenanzahl</b>		?	4	4	2	4	4
<b>Zyklendauer</b>	hh:mm	?	21:31	21:34	07:12	05:54	05:55
<b>Entl:Lad</b>		?	69%	77%	79%	84%	85%

*Tabelle 5.3: Mittlere Messwerte der ersten vier Zellen. Von Zyklus 0 fehlen leider die Daten.*

Entlade- und Ladestrom wurden am Bedienfeld des computergesteuerten Ladegerätes voreingestellt. U\_Start ist die Spannung, die das Ladegerät direkt vor Entladebeginn angezeigt hat. U ist die Spannung, die das Ladegerät dann angezeigt hat, wenn ich die Zelle abgeschlossen habe und U\_Ende ist die Spannung, die das Ladegerät am Ende des Ladevorganges gespeichert hat. Die Kapazitäten beim Entladen bzw. beim Laden hat das Ladegerät abgespeichert. Die Werte sind vermutlich das Produkt aus gesamter Entlade-/Ladezeit und eingestelltem Strom. Auf diese Art habe ich dann auch die mittlere Zyklendauer errechnet. Zellanzahl gibt die für die Mittelwertbildung herangezogenen Datensätze an. Aufgrund manchmal vorkommender Störungen bzw. Ausfälle standen nicht jedes Mal alle Daten eines Zyklus zur Verfügung. Die Zellen, bei denen es Probleme gegeben haben, wurden unberücksichtigt dessen in die Statistik der nächsten Zyklen aufgenommen. Würde man Zellen mit gleicher Vorgeschichte vergleichen, dann würde sich das Ergebnis ein kleinwenig besser für die Zellen ausfallen.

Wichtig ist, dass bei den Messungen auf die Selbstentladung keine Rücksicht genommen wurde. Weil zwischen den Zyklen eine gewisse Zeit vergangen ist, fallen die Entladekapazitäten niedriger aus, als sie nach sofortiger Entladung sein würden. Dies senkt natürlich auch das Kapazitätsverhältnis von Entlade- und Ladevorgang. Während der 5 Zyklen vergingen doch über 2 Monate. Der Entlade-/Ladewirkungsgrad müsste daher um einiges höher liegen.

Zellen 5 bis 32		Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 4	Zyklus 5
<b>Entladestrom</b>	mA	500	500	1500	2000	2000
<b>Ladestrom</b>	mA	500	500	1500	1750	1750
<b>U_Start</b>	V	1,09	1,27	1,26	1,26	1,28
<b>U</b>	V	1,36	1,36	1,36	1,37	1,38
<b>Kap. Entl.</b>	mAh	74	4.621	4.918	5.140	5.181
<b>Kap. Lad.</b>	mAh	6.718	5.813	6.034	5.994	5.980
<b>U_End</b>	V	1,44	1,34	1,44	1,46	1,45
<b>Zellenanzahl</b>		27	25	23	27	28
<b>Zyklendauer</b>	hh:mm	13:35	20:52	07:18	05:59	06:00
<b>Entl:Lad</b>		1%	79%	82%	86%	87%

Tabelle 5.4: Mittlere Messwerte der Zellen Nr. 5 bis 32

Zur Abschätzung des Ladewirkungsgrades gehe ich von der von AccuCell für NiCd-Akkus angegebenen, monatlichen Selbstentladungsrate von 20% aus [4.8]. Während des halben Monats zwischen 4. und 5. Ladezyklus sank die Zellkapazität also auf etwa  $\sqrt{80\%} = 89,4\%$ . Nach dem vierten Mal Laden hätten die Zellen Nr. 5 bis 32 somit  $5181 \text{ mAh} / 89,4\% = 5793 \text{ mAh}$  Kapazität haben müssen. Der Lade-/Entladewirkungsgrad zwischen viertem und fünften Zyklus wäre dann  $5793 \text{ mAh} / 5994 \text{ mAh} = 96,6\%$  gewesen! Geht man von einer geringeren monatlichen Selbstentladungsrate mit 10% aus, so wäre der Wirkungsgrad mit 91,1% immer noch über 90%.

Dies ist ein überraschend guter Wert und bestätigt meine Vorhersagen über die Leistungsfähigkeit eines Solarfahrrades. Andererseits sind dies nur Laborergebnisse, die nun in der Praxis überprüft werden müssten.

### 5.3.3 Gewickelte Blei-Vlies-Akkus von Exide

Mit den gewundenen Blei-Vlies-Akkus von Exide konnten vorerst keine sinnvollen Messungen durchgeführt werden, da kein geeignetes Ladegerät zur Verfügung stand. Die Akkus wurden monatlich mit einem einfachen Ladegerät aufgeladen, um eine Sulfatierung vorzubeugen. Der extrem niedrige Innenwiderstand des 12 V Akkus lässt auf eine extrem hohe Ladeakzeptanz selbst bei fast vollem Akku schließen. Sobald sich eine Gelegenheit ergibt, werde ich dies außerhalb dieser Arbeit nachholen.

## 5.4 Laderegler

Die zwei zur Verfügung stehenden Solarladeregler sollten mit zwei im Betrieb miteinander verglichen werden. Dazu wurde ein LabView-Programm geschrieben, das über Wandlerkarten Spannungs- und Stromwerte aufnimmt, bearbeitet und Datensatzweise in eine Datei schreibt. Als Hardware sollte die Anlage des SunPower1-Projekts und von einem Vorgänger gemachte Wandlerkarten dienen. Damit beide Laderegler unter (annähernd) gleichen Bedingungen gemessen werden können, wurde ein Multiplexer entworfen, der ein Solarmodul, einen Akku und eine Last für kurze Zeit auf den einen und anschließend auf den anderen Laderegler schaltet. Der Multiplexer bestand aus 230 V Schaltrelais, die von LabView aus über die Datenerfassungskarte des Rechners und über eine Wandlerkarte geschaltet werden. Die Messung sollte über einen ganzen Tag von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang im Minutentakt durchgeführt und auf Festplatte aufgezeichnet werden.

Die Wandlerkarten mussten zum Teil adaptiert werden. Das Programm, welches von einem Vorgänger übernommen wurde, wies am Ende kaum noch Ähnlichkeiten mit dem Original auf. Es folgten mehrere Testläufe, die vielversprechend verliefen. Am Tag der geplanten Messung fiel unglücklicherweise der Rechner aus. An den folgenden Tagen war zu wenig Sonne und dann wurde die Messvorrichtung von einem anderen Diplomanden in Anspruch genommen.

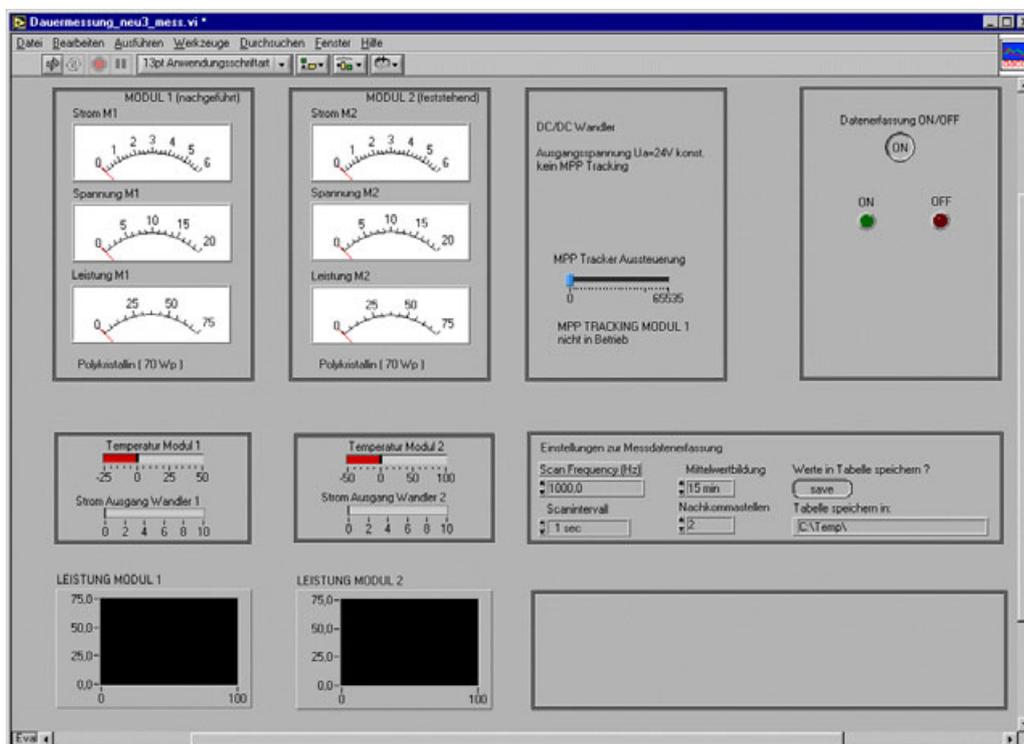


Bild 5.15: Virtual Instruments Panel für Solar datenerfassung

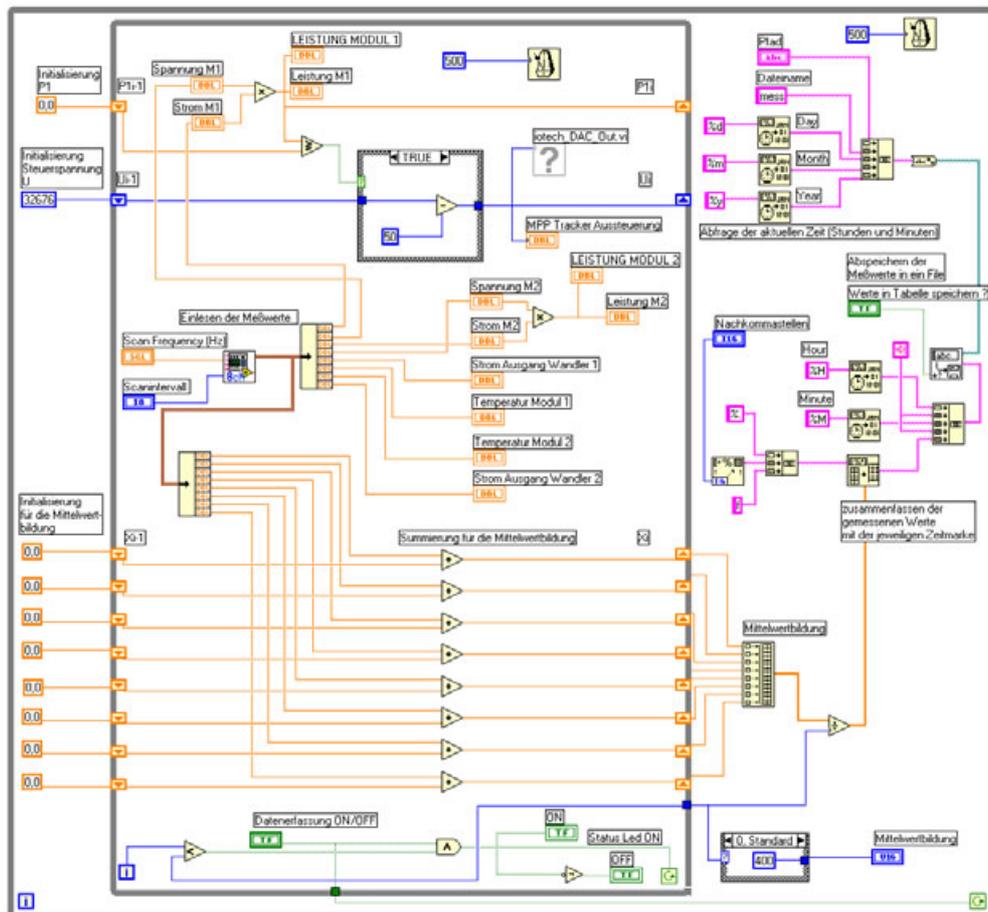


Bild 5.16: Virtual Instruments Diagramm für Solardatenerfassung

Um dennoch Daten über die Laderegler zu messen, wurden diese an einem Netzteil mit Spannungs- und Strombegrenzung vermessen. Für die grobe Charakterisierung der Laderegler reicht das aus. Die Strombegrenzung wurde auf 0,6 A eingestellt und die Spannung wurde langsam nach oben gedreht. Der Akkuanschluss und der Anschluss für die Last blieben unbelegt. Es wurde also nur die Leerlaufspannung gemessen. Der Wirkungsgrad konnte so zwar nicht gemessen werden, da hierfür das Produkt aus Strom und Spannung bekannt sein musste.

Bei dieser Messung ist zu bedenken, dass bei Solarzellen die Stromstärke mit der Einstrahlungsintensität sinkt wohingegen die Leerlaufspannung relativ gleich hoch bleibt. Leerlaufspannungen um 10 V oder darunter kommen also nur bei geringen Einstrahlungen vor, bei denen kaum noch Stromerträge erzielt werden können.

Überdies wurde das Spannungsmuster der Solarladeregler nicht untersucht. Denkbar wäre, dass der Solarladeregler Nr.1 eine gepulste Spannung an den Batterieanschluss legt, die in

etwa der Ladespannung von Akkus entspricht. Auch wenn kein Oszilloskop zur Verfügung steht, würde eine einfache Überprüfung dieser Überlegung durch Anschluss eines Kondensators möglich sein. Ein kleiner Kondensator ist auch mit Nadelimpulsen ladbar. Wird die Spannung anschließend mit einem möglichst hochohmigen Spannungsmessgerät abgenommen, so würde nach einer gewissen Zeit die Spannung am Kondensator annähernd so wie die Nadelimpulse sein.

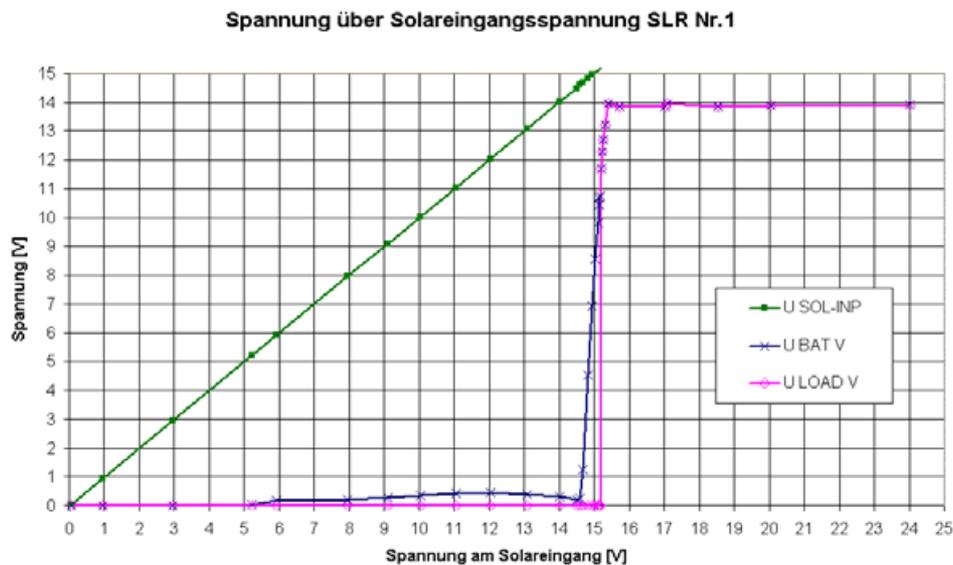


Bild 5.17: Leerlaufspannungen am Solarladeregler Nr.1

Die Messung des SLR SR8 konnte mit der beschriebenen Versuchsanordnung deswegen nicht abgeschlossen werden, weil beim Solarladeregler SR8 über 14,56 V Solareingangsspannung und 12,86 V Spannung am Lampenausgang ein Regelmechanismus in Gang gesetzt wird, bei dem der Strombedarf über die Begrenzung des Netzgerätes ansteigt, worauf die Spannung einbricht. Sobald die Spannung tiefer liegt, schaltet der Regler wieder in die ursprüngliche Regelung zurück, wodurch die Spannung wieder den Grenzwert übersteigt und es zu einem unstillen Verhalten kommt. Dieses Reglerprellen könnte vermutlich durch einen starken Kondensator am Solarspannungseingang verringert werden.

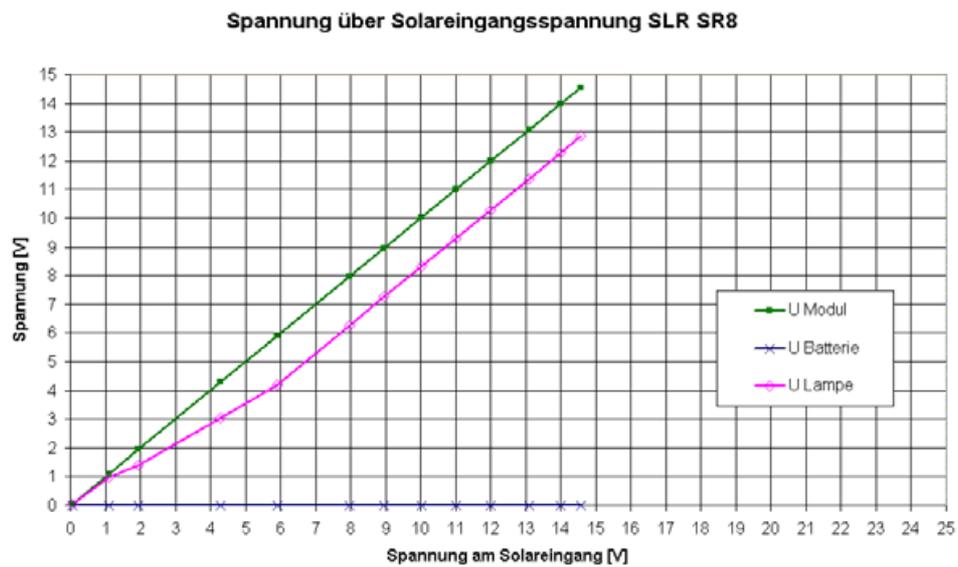


Bild 5.18: Leerlaufspannungen am Solarladeregler SR8

Sinnvoll wäre eine derartige Messung nur dann, wenn keine Solarstrahlung bzw. kein Solarmodul zur Verfügung steht und wenn ähnlich dem geplanten Messaufbau der Laderegler mit einem strom- und spannungsgeregelten Netzteil, einem realistischen Batteriemodell und einem Lastwiderstand gemessen wird, wobei die Eingangsspannung so geregelt werden kann, dass sie verschiedenen Einstrahlungsstärken entspricht. Dazu müssen die Strom-Spannungskennlinien des Solarmoduls bekannt sein. Ein idealisiertes Batteriemodell ist für einfache Vergleiche einer Batterie deswegen vorzuziehen, weil der Zustand eines halbvollen Akkus nicht reproduzierbar ist.

## 5.5 Quellen

- [5.1] Pavlov D. et al. *Strap grid tubular plate—a new positive plate for lead–acid batteries. Processes of residual sulphation of the positive plate.* Central Laboratory of Electrochemical Power Sources, Bulgarian Academy of Sciences. Published in *Journal of Power Sources* 5009 (2002)

## **6. Technische Daten**

Hier werden kurz die Eckdaten der verschiedenen Bestandteile, welche getestet wurden, zusammengefasst. Die Werte wurden größtenteils den Herstellerangaben entnommen.

## 6.1 Fahrräder

### 6.1.1 Elektrodreirad von Velocab

Als Basis für den Prototypen I wurde das Elektrofahrrad Flyer ausgewählt, das ich ein Jahr lang leihweise zur Verfügung gestellt bekommen habe. Es ist eine durchwegs einfache Konstruktion mit zwei Blei-Gel-Akkus, welche auch größere Reichweiten ermöglichen. Durch das sportliche Design ist es auch für junge Fahrer geeignet. Auf meinen Testfahrten quer durch die Bezirkshauptstadt Vöcklabruck fuhr so mancher Autofahrer neben mir her. In der Stadt selbst fühlte ich mich wie in einem Ferrari-Cabrio.

Geschwindigkeit	6 - 25 km/h je nach Motortyp
Reichweite	ca.30 km ohne Mittreten ca.45 km bei normalem Mittreten
Elektroantrieb	24 Volt
Batterien	2 bzw. 3 Blei-Gel Akkus mit 24 Ah
Ladegerät	220 V, Ladezeit ca. 5 Std.
Schaltung	7-Gang Nabenschaltung
Gewicht	60 kg mit Batterie
zul. Gesamtgewicht	180 kg
Maße Länge	ca. 200 cm
Breite	ca. 80 cm
Höhe	ca. 120 cm
Extras	Edelstahlrahmen Rücklicht mit Standlicht großer Einkaufskorb

*Tabelle 6.1: Elektrofahrrad Flyer von Velocab*

### 6.1.2 Solarfahrrad Prototyp I

Prototyp I basiert auf dem Elektrodreirad Flyer von Velocab. Die Dachkonstruktion mit dem Solarmodul von Stromaufwärts ist abnehmbar, damit der Rahmen durch den Umbau unverändert blieb. Der Grundrahmen des Flyers ist ausreichend stabil, die Dachkonstruktion war etwas wackelig. Es fehlten Verstrebungen und außerdem waren die Rohre am Steuerkopf nur mit einem Band fixiert. Bei normalen Kurven machte der hohe Schwerpunkt kein

Problem, in schnell gefahrenen, nach außen hängenden Kurven bekam man wegen dem etwas wackeligen Dachgestell ein etwas ungesütes Gefühl. Passiert ist nie etwas. Die Daten des Elektrofahrrades sind bis auf das Gesamtgewicht von 75 kg mit denen des Flyers ident.



*Bild 6.1: Der Prototyp I – ein „echtes“ Solarfahrrad (8,8% Steigung)*



*Bild 6.2: Der Prototyp I – ein „echtes“ Solarfahrrad*

## 6.2 Motoren

### 6.2.1 Fahrrad-Nachrüstsatz von Heinzmann

Die Fritz Heinzmann GmbH aus Deutschland sponserte großzügigerweise ihren Elektrohilfsantrieb Odysseus mit Motorsteuerung und Gasdrehgriff.

Hersteller	Heinzmann
Artikelnummer	870-00-151-2328
Reifendurchmesser	20 Zoll
Höchstgeschwindigkeit *	22 km/h
Steigung max. **	12%
Leistung max.	400 W
Nennbetriebszeit (25°C Umgebungstemperatur)	24,3 Minuten
Motorstrom max.	25 A
Getriebe	Kunststoff

\* ... Betriebswarmer Zustand (bei 25°C sind die Geschwindigkeiten ca. 5% kleiner)

\*\* ... max. Motorstrom, 100 kg Gesamtmasse, ohne Mititreten

*Tabelle 6.2: Vorderrad-Nabenmotor Odysseus von Heinzmann*

### 6.2.2 Fahrrad-Nachrüstsatz von Schachner

Elektromobilbau Schachner gewährte für ihren Radnabenmotor-Nachrüstsatz etwa 50% Nachlass auf den Verkaufspreis. Der Motor ist ein Scheibenläufermotor mit integriertem, zweistufigen Stirnradgetriebe. Die eisenlosen Spulen werden über Kohlekontakte mit pulsweiten-modulierter Gleichspannung versorgt. Am Umfang neben dem Spulenkreis sind wechselweise sechs Seltenerd-Magnete angeordnet. Den magnetischen Rückschluss zur zweiten Spulenseite bildet das massive Eisengehäuse. In die Radnabe wurde ein zweistufiges Stirnradgetriebe integriert.

<b><u>Motor</u></b>	
Hersteller	Schachner
Type	RNM EA 1/95
Bauart	Fahrradnaben-Scheibenläufer mit zweistufigem Stirnradgetriebe
Einbaubreite	110 mm
Nennleistung	250 W
Nendrehzahl	160 min <sup>-1</sup>
Motorsteuerung	Pulsweiten-Modulation
<b><u>Akku</u></b>	
Akkutype	NiCd
Nennspannung	36 V
Kapazität	4,4 Ah
Lebensdauer	1000 Vollzyklen
Gewicht der Tragebox	4,4 kg
<b><u>Ladegerät</u></b>	
Eingangsspannung	220 V, 50 Hz
Ladespannung	36 V
Ladedauer	4-5 h

*Tabelle 6.3: Fahrradnabenmotor-Nachrüstsatz von Schachner*

## 6.3 Akkus

### 6.3.1 Bleiakku von Exide

Die Exide Batteriewerke GmbH sponserte 3 der hochwertigsten 12V Blei-Akkus von Exide.

Hersteller	Exide
Type	Maxxima 900 Deep Cycle
Masse in kg	18,4
Abmessungen (LxBxH) in mm <sup>3</sup>	260x172x210
Nennspannung in V	12
Ladespannung max in V	14,4
Kapazität bei 20stündiger Entladung in Ah	50
Energieinhalt in Wh	600
Ladestrom max in A	100
Kaltstartleistung nach EN in A	750

*Tabelle 6.4: Vergleich zweier Akkusysteme eines Solarfahrrades mit bei einer Tageskilometerleistung von 36 km an 104 Tagen im Jahr*

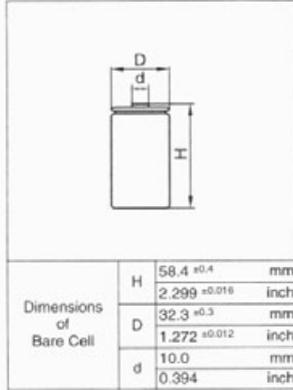
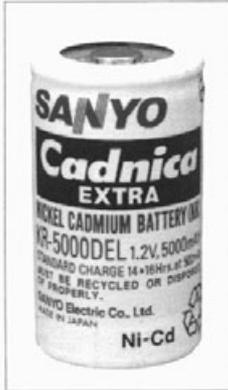


*Bild 6.3: Exide Maxxima 900 Deep Cycle*

### 6.3.2 NiCd-Akku von Sanyo

Sanyo Energy Europe sponserte 32 Stück NiCd-Zellen mit Lötflächen.

**SANYO**  
**Cadnica**

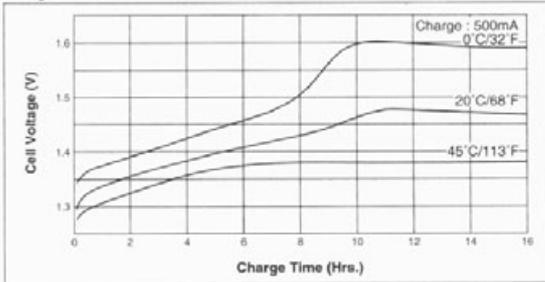


**Cell Type KR-5000DEL**  
**Specifications**

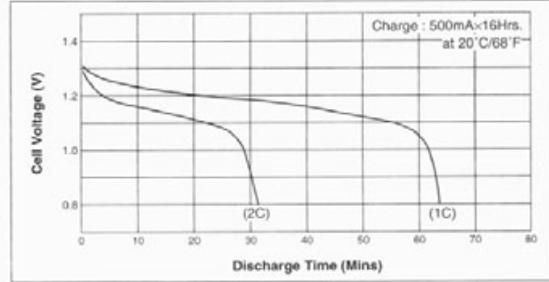
Nominal Capacity		5000mAh	
Nominal Voltage		1.2V	
Charging Current	Standard	500mA	
	Fast	7500mA	
Charging Time	Standard	14 to 16Hrs.	
	Fast	about 1Hr.	
Ambient Temperature	Charge	Standard	0 to 45°C [32 to 113°F]
		Fast	0 to 45°C [32 to 113°F]
	Discharge	-20 to 60°C [-4 to 140°F]	
	Storage	-30 to 50°C [-22 to 122°F]	
Internal Impedance(Av.) (at 50% discharge)		3.5mOhms (at 1000Hz)	
Weight		150g/5.28oz	
Dimensions(D)x(H) (with tube)		33.0 <sup>0</sup> <sub>-0.1</sub> x 60 <sup>0</sup> <sub>-0.2</sub> mm 1.3 <sup>0</sup> <sub>-0.04</sub> x 2.36 <sup>0</sup> <sub>-0.08</sub> inch	

**Typical Characteristics**

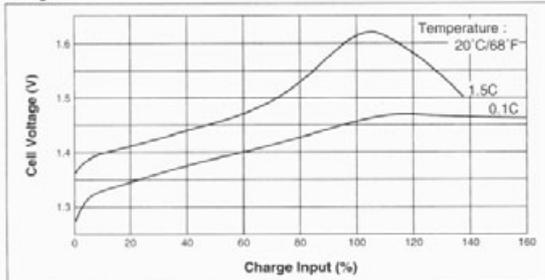
**Charge**



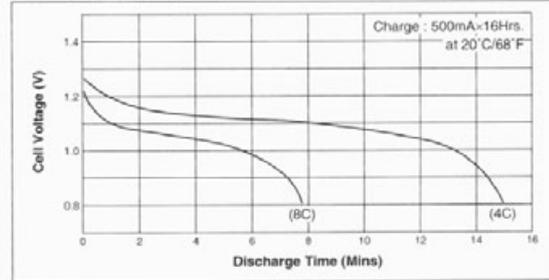
**Discharge (at high rate)**



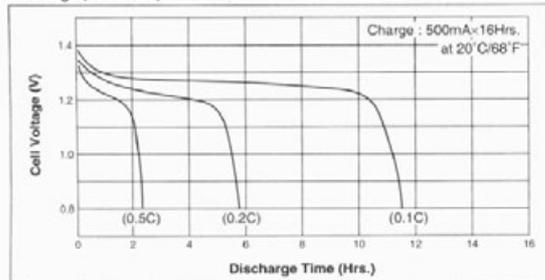
**Charge**



**Discharge (at high rate)**



**Discharge (at low rate)**



**Temperature (Charge & Discharge)**

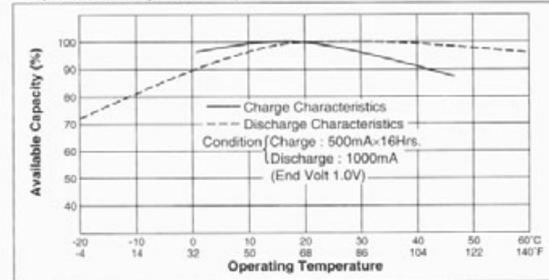
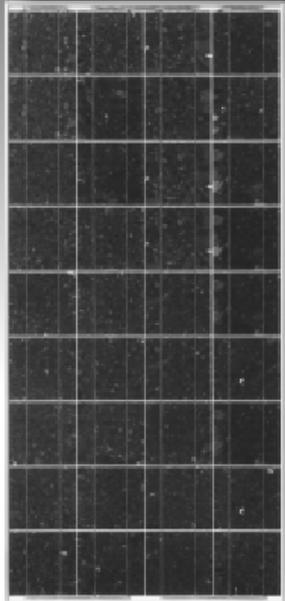


Bild 6.4: Datenblatt der NiCd-Mono-Zelle von Sanyo (Abbildung ohne Lötflächen)

## 6.4 Solarzellen

### 6.4.1 Das von Stromaufwärts gesponserte Kyocera-Solarmodul KC 120-1

Stromaufwärts aus Vorarlberg sponserte die Solarzellen für den Prototyp I. Bei diesen polykristallinen Zellen sticht der für diesen Zelltyp extrem hohe Modulwirkungsgrad von 12,9% und das für diese Bauweise vergleichsweise geringe Gewicht auf.

	Hersteller	Kyocera
	TYP	KC 120-1
	Nennleistung	120 W $\pm$ 5%
	Betriebsspannung (Up)	16,9 V
	Betriebsstrom (Ip)	7,10 A
	Leerlaufspannung (Uoc)	21,5 V
	Kurzschlußstrom (Isc)	7,45 A
	Max. Systemspannung	600 V
	Länge	1425 mm
	Breite	652 mm
	Rahmenhöhe	36 mm
	Höhe inkl. Anschlußbox	52 mm
	Modulfläche	0,93 m <sup>2</sup>
	Temperaturbereich	-40°C bis +90°C
	Gewicht	11,9 kg

Die elektrischen Daten verstehen sich unter folgenden Standard-Bedingungen:  
Einstrahlung: 1000 W / m<sup>2</sup>, Luftmasse AM 1,5 und Zelltemperatur 25 °C

*Tabelle 6.5: Daten des Kyocera KC120-1 Photovoltaikmoduls für den Prototyp I [2.9]*

## 6.5 Solarladeregler

Über den Solarladeregler Nr. 1 stehen leider keine Daten zur Verfügung. Vom Solarladeregler SR8 dafür umso mehr.

### 6.5.1 Solarladeregler Solomon SR8

<b>Hersteller</b>	<b>Solomon</b>
<b>Model</b>	<b>SR8</b>
Systemspannung	12 V
Ladeschlussspannung	12,7 V
Modulstrom max.	8 A
Laststrom max.	8 A

<b>Ladezustand</b>	<b>Betriebsart</b>
< 40%	Tiefentladevorwarnung
< 30%	Lastabwurf
> 50%	Rückschaltung
< 40%	Ausgleichsladung mit 14,7 V
< 70%	Zyklischens Laden mit 14,4 V

*Tabelle 6.6: Solarladeregler SR8 von Solomon [4.35]*

## **7. Anhang**

Zu guter Letzt wird hier die österreichische Fahrradverordnung von 2001 und ein paar Rechenbeispiele für Schüler der Unterstufe abgedruckt. Erstere wird vermutlich bis November 2003 an die EU-Richtlinie 2002/24/EG über die Typengenehmigung für zweirädrige und dreirädrige Kraftfahrzeuge angepasst werden. Die Rechenbeispiele wurden am Beginn der Diplomarbeit im Sommer 2001 zusammengestellt, um das Vorstellungsvermögen und Umweltverständnis von Schülern im Bereich Energieverbrauch und -einsparungspotentiale zu fördern. In einer Klasse der Hauptschule I in Vöcklabruck wurde in Bildnerische Erziehung auf meine Anregung hin versucht, „Solarfahrräder - Verkehrsmittel der Zukunft“ auf Papier zu bringen. Für die Umsetzung möchte ich mich bei Zeichenlehrer Baumgartner Wolfgang recht herzlich bedanken.

## 7.1 Fahrradverordnung (gültig seit 1.Mai 2001)

### **Verordnung der Bundesministerin für Verkehr, Innovation und Technologie über Fahrräder, Fahrradanhänger und zugehörige Ausrüstungsgegenstände (Fahrradverordnung)**

Auf Grund des § 66 Abs. 2 der Straßenverkehrsordnung 1960, BGBl. Nr. 159, zuletzt geändert durch BGBl. I Nr. 134/1999, und aufgrund des § 8 Abs. 1 des Produktsicherheitsgesetzes 1994, BGBl. Nr. 63/1995, wird - nach erfolgter Notifizierung gemäß der Richtlinie 98/34/EG des Rates vom 22. Juni 1998 (Notifikationsnummer 99/536 A) - hinsichtlich der Bestimmungen der §§ 1 Abs. 1 bis 3, 2, 3 Abs. 1, 4 Abs. 2, 5 Abs. 1 bis 3 sowie Abs. 5 und 6, 6 Abs. 2 und 3 sowie § 8 im Einvernehmen mit dem Bundesminister für Justiz, verordnet:

#### Allgemeines

§ 1. (1) Jedes Fahrrad, das in Verkehr gebracht wird, muß - sofern sich aus den folgenden Bestimmungen nichts anderes ergibt - ausgerüstet sein:

1. mit zwei voneinander unabhängig wirkenden Bremsvorrichtungen, mit denen auf trockener Fahrbahn eine mittlere Bremsverzögerung von  $4 \text{ m/sec}^2$  bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 20 km/h erreicht wird;
2. mit einer Vorrichtung zur Abgabe von akustischen Warnzeichen;
3. mit einem helleuchtenden, mit dem Fahrrad fest verbundenen Scheinwerfer, der die Fahrbahn nach vorne mit weißem oder hellgelbem, ruhendem Licht mit einer Lichtstärke von mindestens 100 cd beleuchtet;
4. mit einem roten Rücklicht mit einer Lichtstärke von mindestens 1cd;
5. mit einem weißen, nach vorne wirkenden Rückstrahler mit einer Lichteintrittsfläche von mindestens  $20 \text{ cm}^2$ ; der Rückstrahler darf mit dem Scheinwerfer verbunden sein;
6. mit einem roten, nach hinten wirkenden Rückstrahler mit einer Lichteintrittsfläche von mindestens  $20 \text{ cm}^2$ ; der Rückstrahler darf mit dem Rücklicht verbunden sein;
7. mit gelben Rückstrahlern an den Pedalen; diese können durch gleichwertige Einrichtungen ersetzt werden;
8. mit Reifen, deren Seitenwände ringförmig zusammenhängend weiß oder gelb rückstrahlend sind, oder an jedem Rad mit mindestens zwei nach beiden Seiten wirkenden gelben Rückstrahlern mit einer Lichteintrittsfläche von mindestens  $20 \text{ cm}^2$  oder mit anderen rückstrahlenden Einrichtungen, die in der Wirkung den zuvor genannten entsprechen;
9. wenn das Fahrrad für den Transport mehrerer Personen bestimmt ist, für jede Person mit einem eigenen Sitz, mit einer eigenen Haltevorrichtung und eigenen Pedalen oder Abstützvorrichtungen.

(2) Bei bestimmungsgemäßer Verwendung von Fahrrädern abseits der Fahrbahn muß die Bremsverzögerung - unbeschadet des Abs. 1 Z 1 - einen Wert erreichen, der einen sicheren Gebrauch des Fahrrades gewährleistet.

(3) Sofern Scheinwerfer oder Rücklicht mit einem Dynamo betrieben werden, gilt Abs. 1 Z 3 und Z 4 mit der Maßgabe, daß die dort genannte Wirkung ab einer Geschwindigkeit von 15 km/h erreicht werden muß.

(4) Bei Tageslicht und guter Sicht dürfen Fahrräder ohne die in Abs. 1 Z 3 und 4 genannte Ausrüstung verwendet werden.

#### Mehrspurige Fahrräder

§ 2. Die Bestimmungen des § 1 gelten für mehrspurige Fahrräder mit folgenden Maßgaben:

1. es müssen jeweils zwei Rücklichter und Rückstrahler in gleicher Höhe so angebracht sein, daß sie die seitliche Begrenzung des Fahrrades erkennen lassen;
2. die Bremsen müssen auf alle Räder und innerhalb einer Achse gleichzeitig und gleichmäßig wirken;
3. wenn das Fahrrad für den Transport mehrerer Personen bestimmt ist, muß abweichend von § 1 Abs. 1 Z 9 für jede beförderte Person lediglich ein eigener Sitz vorhanden sein.

Bestimmungen über das Ziehen von Anhängern

§ 3. (1) Für Fahrräder, die einen Anhänger ziehen, gelten außer den Vorschriften der §§ 1 und 2 noch folgende Bestimmungen:

1. der Tretmechanismus des Fahrrades muß zumindest eine Gangstufe mit einer Entfaltung von höchstens 4 m pro Kurbelumdrehung aufweisen;
2. wenn mit dem Anhänger Kinder befördert werden, ist das Fahrrad oder der Anhänger so auszurüsten, daß ein Berühren der Speichen durch beförderte Kinder und ein Einklemmen von Gliedmaßen zwischen Hinterrad und Radabdeckung ausgeschlossen ist;
3. das Fahrrad muß über einen Fahrradständer verfügen.

(2) Rennfahrräder dürfen nicht zum Ziehen von Anhängern verwendet werden.

#### Rennfahrräder

§ 4. (1) Als Rennfahrrad gilt ein Fahrrad mit folgenden technischen Merkmalen:

1. Eigengewicht des fahrbereiten Fahrrades höchstens 12 kg;
2. Rennlenker;
3. äußerer Felgendurchmesser mindestens 630 mm und
4. äußere Felgenbreite höchstens 23 mm.

(2) Rennfahrräder dürfen ohne die in § 1 Abs. 1 Z 2-8 genannte Ausrüstung in Verkehr gebracht werden; bei Tageslicht und guter Sicht dürfen Rennfahrräder ohne diese Ausrüstung verwendet werden.

#### Fahrradanhänger

§ 5. (1) Jeder Fahrradanhänger, der in Verkehr gebracht wird, muß ausgestattet sein:

1. mit einer vom Fahrrad unabhängigen Lichtanlage,
2. mit einem roten Rücklicht,
3. vorne mit einem weißen und hinten mit einem roten Rückstrahler; die roten Rückstrahler dürfen mit den Rücklichtern verbunden sein; sowie
4. jeweils einem gelben Rückstrahler an den seitlichen Flächen.

Bei Anhängern, die breiter als 60 cm sind, sind jeweils zwei Rücklichter sowie zwei weiße und zwei rote Rückstrahler so anzubringen, daß die Breite des Anhängers zweifelsfrei erkennbar ist. Sämtliche Rückstrahler müssen eine rückstrahlende Fläche von jeweils mindestens 20 cm<sup>2</sup> aufweisen.

(2) Fahrradanhänger sind einachsiger und mit einer Radblockiereinrichtung, die auf beide Räder wirkt, oder einer Feststellbremse auszustatten.

(3) Zum Personentransport bestimmte Fahrradanhänger müssen unabhängig von Abs. 1 und 2 zusätzlich ausgerüstet sein:

1. mit geeigneten Rückhalteeinrichtungen,
2. mit einer mindestens 1,5 m hohen, biegsamen Fahnenstange mit leuchtfarbenem Wimpel und
3. mit einer Vorrichtung, die zur Abdeckung der Speichen und der Radhäuser und gegenüber Hinausbeugen und gegenüber Kontakt der Beine mit der Fahrbahn wirksam ist.

(4) Personen dürfen nur in Fahrradanhängern befördert werden, die zum Personentransport bestimmt sind (Abs. 3). Die Angaben des Herstellers über Gewicht, Größe und Anzahl der zu transportierenden Personen sind einzuhalten. Die Befestigung am Fahrrad darf ausschließlich über eine betriebssichere Kupplung erfolgen.

(5) Die Beschaffenheit der Kupplung muß gewährleisten, daß der Anhänger aufrecht stehen bleibt, wenn das Zugfahrrad umkippt.

(6) Fahrradanhänger dürfen nur zusammen mit

1. einer leicht verständlichen Betriebsanleitung für die sichere Befestigung am Fahrrad

- a) in deutscher Sprache oder
- b) in Form einer bildlichen Darstellung und

2. sofern der Anhänger für den Personentransport bestimmt ist, einem Sicherheitshinweis

- a) in deutscher Sprache laut Anhang I oder
- b) in bildlicher Darstellung, wobei die Inhalte laut Anhang I dargestellt werden müssen, in Verkehr gebracht werden.

#### Kindersitze

§ 6. (1) Der für ein mitfahrendes Kind bestimmte Sitz muß mit dem Fahrradrahmen fest verbunden sein. Der Sitz ist hinter dem Sattel so anzubringen, daß der Fahrer nicht in seiner Sicht, Aufmerksamkeit oder Bewegungsfreiheit behindert oder in seiner Sicherheit gefährdet werden kann. Die Beförderung von mehr als einem Kind ist unzulässig.

(2) Jeder Kindersitz, der in Verkehr gebracht wird, muß ausgestattet sein:

- 1. mit einem Gurtsystem, das vom Kind nicht leicht geöffnet werden kann,
- 2. mit einem höhenverstellbaren Beinschutz,
- 3. mit Fixierriemen für die Füße und
- 4. mit einer Lehne, die das Abstützen des Kopfes erlaubt.

(3) Kindersitze dürfen nur mit einem Sicherheitshinweis

- 1. in deutscher Sprache laut Anhang II oder
- 2. in bildlicher Darstellung, wobei sämtliche Inhalte laut Anhang II dargestellt werden müssen, in Verkehr gebracht werden.

#### Ladegewicht

§ 7. Das Ladegewicht darf bei der Beförderung von Lasten oder Personen nicht überschreiten:

- 1. bei mehrspurigen Fahrrädern 250 kg,
- 2. bei durchgehend- und auflaufgebremsten Anhängern 100 kg,
- 3. bei ungebremsten Anhängern 60 kg.

#### Gleichwertigkeitsklausel

*§ 8. Von den in den §§ 1- 7 beschriebenen Anforderungen für Fahrräder, Fahrradanhänger und zugehörige Ausrüstungsgegenstände darf dann abgegangen werden, wenn diese in anderen Mitgliedstaaten der Europäischen Union sowie in anderen Vertragsstaaten des Abkommens über den EWR rechtmäßig hergestellt oder in Verkehr gebracht werden dürfen und die Anforderungen dasselbe Niveau für den Schutz der Gesundheit und für die Verkehrssicherheit gewährleisten, wie in dieser Verordnung verlangt.*

#### Inkrafttreten

§ 9. (1) Diese Verordnung tritt mit 1.Mai 2001 in Kraft.

(2) Mit Inkrafttreten dieser Verordnung tritt die Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr vom 24. April 1986 über die technischen Merkmale von Rennfahrrädern, BGBl. Nr. 242/1986, außer Kraft.

### Übergangsbestimmungen

§ 10. (1) Fahrräder, die beim Inkrafttreten dieser Verordnung in Verwendung stehen und den Bestimmungen der Straßenverkehrsordnung 1960 idF der 19. StVO-Novelle, BGBl. Nr. 518/1994, nicht aber dieser Verordnung entsprechen, sind innerhalb von zwei Jahren ab dem Inkrafttreten entsprechend dieser Verordnung nachzurüsten; bis zu diesem Zeitpunkt dürfen sie weiter verwendet werden.

(2) Fahrradanhänger, die nicht den Bestimmungen dieser Verordnung entsprechen und bezüglich derer vor dem Inkrafttreten dieser Verordnung die Beförderung von Personen durch die Behörde bewilligt wurde, gelten als dieser Verordnung entsprechende Anhänger, sofern der Bewilligungsbescheid während der Beförderung mitgeführt wird.

### ANHANG I

#### Sicherheitshinweise für Fahrradanhänger zum Personentransport

Da Kinder im Fahrradanhänger bei einem Unfall (Sturz) einem besonderen Risiko ausgesetzt sind, sollten Sie diese niemals ohne Fahrradhelm oder unangegurtet transportieren.

Achten Sie darauf, daß die Kinder nicht in die Speichen greifen können, sich nicht hinausbeugen und mit den Beinen nicht mit der Fahrbahn in Kontakt kommen können.

Hinaushängende Schals und dergleichen können in die Räder gelangen und zur tödlichen Falle werden. Verwenden Sie keinen Schal im Anhänger.

### ANHANG II

#### Sicherheitshinweise für Fahrradkindersitze

Nach der Montage des Kindersitzes sollten Sie nochmals überprüfen, ob alle Bauteile gemäß der Montageanleitung montiert und solide befestigt worden sind.

Beim Befördern eines Kindes ändern sich die Fahreigenschaften des Fahrrades. Eine Probefahrt mit dem Kind gibt Ihnen für die Verwendung auf der Straße die nötige Sicherheit. Kontrollieren Sie anschließend die Befestigung der Bauteile.

Da nicht auszuschließen ist, daß sich das Kind mit den Beinen aus der Schutzvorrichtung befreit, sollten die Speichen des Fahrrades, auf das der Kindersitz montiert ist, möglichst weiträumig abgedeckt sein. Ein Speichenschutz ist im Fachhandel erhältlich.

Um zu vermeiden, daß sich das Kind mit den Fingern in die Stahlfedern des Sattels einklemmt, sollte ein Sattel ohne Stahlfeder oder eine Sattelfederabdeckung montiert werden, die im Fachhandel erhältlich ist.

Transportieren Sie das Kind niemals, ohne den Sicherheitsgurt und den Fußriemen zu befestigen.

Da Kinder auf dem Fahrradsitz bei einem Unfall (Sturz) einem besonderen Risiko ausgesetzt sind, sollten Sie diese niemals ohne Fahrradhelm transportieren.

Lassen Sie das Kind niemals alleine im Kindersitz. Schon durch eine kleine Bewegung des Kindes kann das Fahrrad umstürzen.

## 7.2 Rechenbeispiele für Hauptschule

### Photovoltaik-Rechenbeispiele für Hauptschule

Rechenbeispiele zur Abschätzung der Tagesreichweite eines Solarfahrrades

*DIE DURCHSCHNITTLICHE SONNENEINSTRALUNG (SOLARKONSTANTE) BETRÄGT IN ÖSTERREICH CA. 1.100 KWH/M<sup>2</sup>A. AUF EINEN QUADRATMETER WAAGRECHTER FLÄCHE WERDEN ALSO PRO JAHR CA. 1.100 KWH SONNENENERGIE (HAUPTSÄCHLICH SICHTBARES LICHT) EINGESTRAHLT.*

Käufliche, großflächige polykristalline Solarmodule haben bei einem Einstrahlungswinkel von 90° einen Modulwirkungsgrad von etwa 13%.

Da aber die Sonne nicht immer genau im Zenit steht, wird in unseren Breiten bei waagrechter Montage 1,5 mal weniger als im günstigsten Fall in elektrische Energie umgesetzt.

→ Wie viel elektrische Energie produziert also eine Solarzelle bei waagrechter Montage während eines ganzen Jahres?

Eine Kilowattstunde (kWh) sind 1.000 Wattstunden (Wh) und eine Wattsekunde (Ws) sind 1 Joule (J). Um eine Stunde lang 100 Watt leisten zu können, benötigt man 100 Wh.

→ Wie viel Joule sind also eine Kilowattstunde?

→ Wie viel Joule werden benötigt, wenn 2 Stunden 125 Watt geleistet werden?

In Weyregg werden auf 469 m Seehöhe in den Monaten April, Mai, Juni, Juli und September folgende Energiemenge auf eine horizontale Fläche eingestrahlt: 117,5 148,7 150,5 156,9 143,4 104,5 (in kWh/m<sup>2</sup>). *Quelle: Stromaufwärts Photovoltaik GmbH.*

→ Wie viel Wattstunden Energie produziert ein Solarmodul an einem durchschnittlichen Juni- bzw. an einem durchschnittlichen Augusttag?

→ In welchem Monat ist die durchschnittliche Energieproduktion am höchsten bzw. am niedrigsten?

→ Wie viel Wattstunden Energie werden in der anderen Jahreshälfte (von Oktober bis März) produziert, wenn die Solarkonstante für Weyregg 1095 kWh/m<sup>2</sup>a beträgt?

Beim gemächlichen Radeln tritt ein durchschnittlicher, erwachsener Mensch mit einer Leistung von ca. 50 Watt in die Pedale. Bei einem billigen Elektrofahrrad werden wegen des Mehrgewichts und der vielen Verluste für die selbe Geschwindigkeit eine 2,5-fach so hohe elektrische Leistung benötigt.

→ Wie viele Stunden kann man mit dem Elektrofahrrad fahren, wenn eine halbe Kilowattstunde elektrischer Energie zur Verfügung stehen (Akku) und nicht mitgetreten wird?

→ Wie lange kann man mit der selben Energiemenge fahren, wenn mit einer Leistung von 50 Watt mitgetreten wird?

- Wie sehen die Ergebnisse aus, wenn unsere Versuchsperson statt mit 50 W mit 120 Watt in die Pedale tritt?
- Welche Strecke wird zurückgelegt, wenn angenommen wird, dass bei einer Leistung von 50 W auf ebener Fahrbahn eine Geschwindigkeit von 11 km/h und bei 120 W 18 km/h gefahren wird?

Ein gutes Solarfahrrad mit einem einen Quadratmeter großen Solarmodul nutzt die von den Modulen produzierte elektrische Energie trotz Zwischenspeicherung im Akku genauso gut wie obiges Elektrofahrrad.

- Wie viele Stunden kann man mit dem Solarfahrrad an einem Tag bei einer Gesamteinstrahlung von 5 Kilowattstunden (5.000 Wh) ohne mitzutreten fahren?
- Wie viele Stunden kann man fahren, wenn man am Morgen eines sonnigen Tages mit vollem Akku (500 Wh zusätzlich) wegfährt und mittritt?
- Wie weit kommt man unter den im vorigen Beispiel getroffenen Geschwindigkeitsannahmen mit unserem Solarfahrrad?

Macht eine Klassenstatistik über die Zeit, die Ihr für den Weg zur Schule und wieder nach Hause benötigt. Schreibt gleichzeitig auf, wie lang die kürzeste Strecke ist, die mit einem Fahrrad befahrbar ist. Errechnet daraus die durchschnittliche theoretische Geschwindigkeit, die Ihr fahren müsst, um schneller als mit dem herkömmlichen Verkehrsmittel zu sein.

Ermittelt auch die durchschnittliche Geschwindigkeit, die Ihr mit dem Rad fahren würdet (sie sollte zwischen 10 km/h für kurze Strecken durch die Stadt und 20 km/h für lange Überlandstrecken liegen). Wie lange braucht Ihr, wenn Ihr davon ausgeht, dass Ihr mit einem Elektrorad trotz geringerer Anstrengung 50% schneller seid? Wie viel elektrische Energie benötigt Ihr, wenn Ihr einen Verbrauch von 20 Wh/km annehmt? Wie viel Prozent der Klasse kommt mit der Reichweite eines Solarfahrrades aus, wenn der Akku 400 Wh Energie abgibt? Würde es Sinn machen, den Akku während der Schulzeit nachzuladen (wie viel Prozent der Klasse benötigen mehr als 400 Wh, wie viel Prozent der Klasse mehr als 800 Wh?)

So, mehr fällt mir im Moment nicht mehr ein. Ich hoffe, Ihr könnt damit etwas anfangen und habt somit Spaß beim Rechnen! Vielleicht diskutiert Ihr auch, welche Vorteile ein energieautarkes Fahrzeug für die Umwelt hat. Für ein energieautarkes Fahrzeug wird nur bei der Herstellung Energie benötigt. Sobald es fahrbereit ist, lädt es sich selbst immer wieder von neuem auf – bis in alle Ewigkeit oder bis es kaputt geht. Dadurch ist es auch billiger als andere motorisierte Verkehrsmittel (Bsp. Moped oder Auto, 100 mal in die Schule und retour zu je 10 km sind 20.000 km pro Jahr. Bei Spritkosten von 1 öS pro Kilometer sind das .....öS/Jahr usw.)

In diesem Sinne mit sonnigen Grüßen,  
Euer Manfred Neudorfer.