

Marco Reichel

Der Energiebedarf von Elektromobilen

Allgemeine Grundlagen

Eine leichtverständliche Einführung mit
geschichtlichem Hintergrund,
Berechnungen
Messungen
Wirkungsgefüge zum Primärenergiebedarf.

2. neubearbeitete Auflage Mai 1994
Reprint Juli 2001

© *Marco Reichel Software*
Reifenberg 85
91365 Weilersbach

Alle Rechte vorbehalten.

Vorwort

Das Büchlein "Der Energiebedarf von Elektromobilen" soll als Hintergrundinformation für das Computer-Programm Solarsoft dienen und allgemeine Grundlagen vermitteln.

Die Entwicklung von Solarsoft und dem Büchlein durch Reichel Software wurde kräftig unterstützt. Wir bedanken uns bei folgenden Personen und Organisationen:

Bundesverband Solarmobil, Roland Reichel
Dr. Rolf Klug,
Entwicklungsabteilung des Mini-El Herstellers und
Herrn Studiendirektor Hubert Wicklein

Von Reichel Software eingesetzt und weiterentwickelt wurde Solarsoft auf folgenden Solar- und Elektromobil Veranstaltungen:

1. Hanse Solarmobil Cup 1989,
Grand prix Int. Formel E in Emmen (Schweiz) 1989,
SOLAR + MOBIL Frankfurt 1989,
Solarmobil Cup Hamburg-Berlin 1990
Tour de Sol (Schweiz) 1992, 1993
Solarmobil Cup Kassel-Berlin 1992
Tour de Ruhr 1993, Lauf zur Deutschen Solarmobil Meisterschaft
Bayern Solar 1993, Lauf zur Deutschen Solarmobil Meisterschaft

Wir hoffen, daß Ihnen Solarsoft bei Planung, Analyse und Vergleich von Elektrofahrzeugen dienen kann.

So kann z.B. ein Fahrzeugkonstrukteur die Werte seines geplanten Fahrzeugs eingeben, und durch Verändern der Fahrzeugwerte die Auswirkungen von Optimierungen am Bildschirm sofort erkennen. Ein Käufer eines Elektrofahrzeugs kann Herstellerangaben objektiv überprüfen, und verschiedene Fahrzeuge bequem durchrechnen lassen. Ein Eigentümer eines Elektrofahrzeugs kann Berechnungen mit seinen Erfahrungswerten vergleichen und z.B. abschätzen wieviel Solarzellen er benötigt, um sein Elektromobil in ein Solarmobil zu verwandeln.

Denn erst wenn der gesamte Energieverbrauch eines Elektromobils über Solarzellen oder andere regenerative Energiequellen gedeckt wird, darf man dieses dann besonders umweltfreundliche Fahrzeug ein Solarmobil nennen.

Inzwischen gibt es neben solaren Stromtankstellen auch die Möglichkeit, Anteilsscheine an einer gemeinschaftlich finanzierten Solaranlage zu erwerben.

Eine gesunde Umwelt,

wünscht Ihnen Reichel Software

Inhaltsverzeichnis

1. Das goldene Zeitalter der ersten Elektromobile	1
2. Die wichtigsten Formeln.....	3
2.1 Widerstände	3
2.2 Wirkungsgrade	8
2.3 Arten des Energieverbrauchs	11
3. Berechnungen und Messungen	14
3.1 Fehlerbetrachtung	15
3.2 Beispiel Mini-El.....	16
4. Energiesparwettfahrten.....	22
4.1 Der Wertungsfaktor	22
4.2 Einfluß der Fahrweise	23
4.3 Steigungen und ihre Auswirkungen.....	24
5. Primärenergiebedarf	25
5.1 Allgemeines zum Wirkungsgefüge.....	25
5.2 Wirkungsgefüge zum Energiebedarf von Elektromobilen	25
Anhang	28
1. Glossar	28
2. Mathematische Herleitungen	29
3. Meßergebnisse	30

Literaturverzeichnis

In dem folgenden Verzeichnis sind die Quellen aufgeführt, die bei der Bearbeitung benutzt wurden, und dem Leser zur Vertiefung des Stoffes dienen können.

- Brusa** (Hrg.) Elektronik, Mess- und Regeltechnik, Antriebe und elektronische Komponenten für Solar- und Elektro-Leichtbaufahrzeuge, Ch Gams o.J. (Katalog)
- Buberl, A.** 1835-1990 Die Entwicklung der Elektrofahrzeuge bis zur Gegenwart, in: Auto Gestern Heute Morgen 1989/1
- Bucher, S.** Effiziente Reifen für Leichtfahrzeuge, in: Solarmobile im Alltag (Bd. 6) 1992, S.70-73
- Eckel, H-G.** Rollwiderstand und Verlustleistung von Personenwagenreifen auf unterschiedlich gekrümmter Fahrbahn, Karlsruhe 1985 (Dissertation TH Karlsruhe)
- Görlach, U.** Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und Reichweite von Elektrofahrzeugen, in: ETZ-A Bd. 94 1973/11
- Jeanneret, R.** Solarantrieb und Solarauto, in: Solarmobile im Alltag (Bd. 1) 1987, S.39-60
- Jeltsch, T.** Konstruktion eines Rennsolarmobils, Erlangen 1990, 1. Auflage (G. Reichel Verlag)
- Kinder, H./Hilgemann, W.,** (Hrg.)
dtv-Atlas zur Weltgeschichte Band 2 Von der Französischen Revolution bis zur Gegenwart, München 1991, 25. Auflage (dtv) zitiert Kinder, S.
- Legler, T.** Studienarbeit Erstellen eines Bond-Graphen für das Karlsruher Solarmobil und numerische Auswertung der Meßdaten, Karlsruhe o.J. (Studienarbeit TH Karlsruhe)

Naunin, D. Elektrische Straßenfahrzeuge Technik, Entwicklungsstand und Einsatzbereiche, Ehningen bei Böblingen 1989 (expert verlag)

Naunin, D./Gutekunst K./Thieler/Klug R.

Entwicklung und Erprobung elektrisch betriebener Leichtmofas/Mofas, Nürnberg-Schweinfurt-Berlin 1988 (Lärmbekämpfung Forschungsbericht 88-105 05 132/02) zitiert Gutekunst, S.

Neckarwerke Esslingen

Strom macht mobil Kapitel: Die historische Entwicklung der Elektrofahrzeuge S.75-77, Esslingen 1990 (Katalog zur Ausstellung "Strom macht mobil") zitiert Neckarwerke, S.

Rosenthal, B. Elektroleichtfahrzeuge für den Straßenverkehr, Erlangen Nürnberg 1991, 1. Auflage (Verlag Solare Zukunft)

Solarmobil Verein Erlangen (Hrg.)

Solarmobile und ihre Komponenten, Erlangen 1990, 2. Auflage, G. Reichel Verlag zitiert R. Reichel, S.

VEBA AG (Hrg.), Das Elektroauto - Fakten und Argumente, Düsseldorf 1992 (Studie des VEBA-Konzerns)

Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (Hrg.)

Mit Strom mobil. Das Elektroauto., Frankfurt a. M. 1991 zitiert Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke, S.

Vester, F. Ausfahrt Zukunft, München 1990, 2. Auflage (Heyne)

Wille, G. Ein Beitrag zur Ermittlung des Energieverbrauchs und der Restreichweite von Elektrostrassenfahrzeugen, Aachen 1983 (Dissertation TH Aachen)

Zomotor A. Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, Würzburg 1991, 2. Auflage (Vogel Buchverlag)

1. Das goldene Zeitalter der ersten Elektromobile

Als in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts der wissenschaftliche und technische Fortschritt - 1827 Ohmsches Gesetz (Ohm), 1831 Elektrisches Induktionsgesetz (Faraday), 1834 Elektromotor (Jacobi) - die Nutzung von neuen Energieformen wie Dampf, explodierende Gase und Elektrizität möglich machte, gab es bereits Erfinder, die "Elektrizität" zum Antrieb von Verkehrsmitteln einsetzen wollten.¹

"Bereits im Jahr 1835 bauten Sibrandus Stratingh und Bäcker in Gröningen Straßenfahrzeuge und Boote, die mit Elektromotoren angetrieben wurden."² Ähnliche Versuche, Automobile elektrisch zu betreiben, erfolgten in Mailand, Frankfurt und Edinburgh bis der französische Physiker Gaston Plantée 1859 den ersten technisch brauchbaren Bleiakкумуляtor entwickelte. Dadurch und mit der Erfindung der Dynamomaschine durch Siemens und Wheatstone im Jahre 1866, die es ermöglichte, Bleibatterien wieder aufzuladen, wurde die Entwicklung der Elektromobile erheblich beschleunigt.

Ohne die Probleme der batteriebetriebenen Fahrzeuge fuhren schon 1879 in Berlin die erste elektrische Straßenbahn und der erste Elektrobus, der Strom aus einer Oberleitung bezog, ein sogenannter Obus.

Noch im selben Jahr als T.A. Edison die ersten Elektrizitätswerke eröffnet hatte³, erreichte der vom Franzosen Raffard 1881 gebaute "Tramcar", der von Akkus betrieben wurde und bis zu 50 Personen befördern konnte, besonderes Aufsehen, und der Durchbruch für Elektromobile schien geschafft. In kurzer Zeit folgten zahlreiche Entwicklungen: Jeantaud baute 1881 einen Elektrowagen, 1882 fuhr in Berlin ein batteriebetriebener leichter Jagdwagen über den Kurfürstendamm, 1885 konstruierte Ingenieur Volk in England ein akkubetriebenes Fahrzeug, etc.

1889 stellte T.A. Edison der Öffentlichkeit sein Fahrzeug "Electric Runabout" vor, das trotz der geschilderten Vorgänger (z.B. auch 1888 "Electrics" von Kimball und Pratt) in der Literatur oft als erstes Elektromobil bezeichnet wird.

Tatsächlich ermöglichte die frühe Entwicklung der Elektromobile, neben der erfolgreichen Teilnahme an Automobilrennen, das Aufstellen von Weltrekorden:

In der Nähe von Paris (in Achères) stellte der Französische Automobilklub im Jahr 1889 auf einem Kilometer eine Durchschnittsgeschwindigkeit des Jeantaud-Elektroauto von 63,157 km/h fest. 1899 erreichte der Belgier C. Jenatzy mit seinem selbst konstruierten Elektromobil "Jamais contente" einen Weltrekord mit der Durchschnittsgeschwindigkeit von 66,666 km/h. Diesen Wert konnte er noch im selben Jahr auf 105,882 km/h verbessern.

¹ Kinder, S. 343; Buberl, S. 20

² Buberl, S. 20

³ Neckarwerke, S.75

"In einem Straßenwettbewerb auf Long Island besiegte Wrioth Electric in einem 80 km – Rennen innerhalb 2 Stunden und 3,5 Minuten das gesamte Benzin- und Dampfswagen-Feld"(1901)⁴

Insgesamt gab es um die Jahrhundertwende – besonders in den USA – mehr Elektroautos als Autos mit Verbrennungsmotor. "Sie waren die Luxus-Autos der Vornehmen, da sie leise, abgasfrei und ohne Hilfskräfte (fürs Anlassen) fahren konnten. In Berlin gab es damals zeitweise 13 Firmen, die sich mit Elektromobilbau beschäftigten."⁵

Der private Elektrowagen verkehrte üblicherweise wegen der schlechten Straßenverhältnisse und der begrenzten Reichweite innerhalb der Städte, und war als Auto der Reichen im Aufbau meist konservativ und in der Farbe schwarz. So hieß der 1904 von der Akkumulatorenfabrik Hagen präsentierte Stadtwagen, der eine Reichweite von nicht weniger als 100 km bei 30 km/h Höchstgeschwindigkeit gehabt haben soll, Urbanus.⁶

Seitdem bereits 1896 Elektrofahrzeuge mit einer Reichweite von 60 km als Taxis in den Dienst gestellt wurden, nahm die Anzahl der Elektrotaxis derart zu, daß bis 1910 alle größeren Städte, besonders Berlin, "geradezu (...) eine Flotte von Elektro-Taxis" vorweisen konnten.⁷

"Das geräusch- und geruchlos dahingleitende Gefährt, das spielend zu betreiben war und weder besondere Manipulationen mit der Startkurbel erforderte, noch ein Scheuen der Pferde befürchten ließ, (...) fand vor allem den Beifall der begüterten Damenwelt."⁸ Unter anderem bevorzugte die Gattin von Henry Ford einen Detroit Electric Coupé.

Trotz der zahlreichen geschilderten Vorteile markiert die Erfindung des elektrischen Starters 1912 den Zeitpunkt, von dem ab sich die Benzinautos immer stärker gegen die Elektromobile durchsetzen sollten. Ab 1901 wurde durch die Erschließung großer Erdölvorkommen in Texas Benzin allgemein verfügbar. Weiterhin zum Erfolg der Benzinautos führte ihr vergleichsweise niedriger Preis und ihre größere Reichweite. So kostete beispielsweise das Ford-Modell K von 1906 ungefähr die Hälfte eines Elektrowagens. Schon 1898 wurde das elektrische Automobil in einem Vortrag über Betriebskosten als Sport- und Luxusfahrzeug bezeichnet.⁹

Somit legten bereits die technischen Erfindungen und der wissenschaftliche Fortschritt im 19. und im frühen 20. Jahrhundert Grundsteine für die heutige Entwicklung elektrischer Straßenfahrzeuge.

⁴ Buberl, S.27

⁵ Naunin, S.1

⁶ Buberl, S.21

⁷ Buberl, S.21

⁸ Buberl, S. 28

⁹ Buberl, S.28; VEBA, S.15

2. Die wichtigsten Formeln

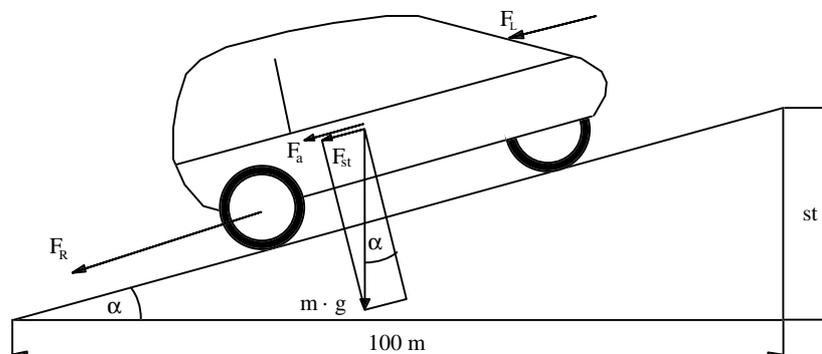
Da Berechnungen des Energiebedarfs für verschiedene Geschwindigkeiten, Steigungen und Fahrzeugwerte recht umfangreich werden können, wurde zur bequemen und schnellen Berechnung Solarsoft, ein PC-Programm, entwickelt.

Im folgenden werden die wichtigsten Formeln als allgemeine Grundlage für Verständnis und Berechnung erläutert. Für die Darstellung von Herleitungen wird auf den Anhang verwiesen.

Wichtig bei der Berechnung des Energiebedarfs von Fahrzeugen ist der Widerstand, der sich der Bewegung des Gefährts entgegensetzt. Da sich dieser Widerstand aus verschiedenen Einzelwiderständen zusammensetzt, soll er im weiteren Gesamtwiderstand genannt werden. Grundsätzlich bestimmt der Gesamtwiderstand, unabhängig von der Antriebsart, den Energieverbrauch am Rad eines Fahrzeugs (sowohl bei Autos mit Verbrennungsmotor als auch bei Elektromobilen).

Das Verbrennungsgauto und das Elektromobil unterscheiden sich erheblich in ihren Komponenten mit den jeweiligen Wirkungsgraden. Analog zum Gesamtwiderstand soll die Bezeichnung Gesamtwirkungsgrad eingeführt werden. Der Gesamtwirkungsgrad wird als Produkt der verschiedenen Wirkungsgrade berechnet.

2.1 Widerstände



Kräfte diagramm für den Mini-EI¹⁰

Der Gesamtwiderstand setzt sich hauptsächlich aus der Summe folgender Fahrwiderstände zusammen:

- Rollwiderstand,
- Steigungswiderstand,
- Luftwiderstand,
- Beschleunigungswiderstand.

Er bestimmt das notwendige Drehmoment an den Antriebsrädern, die zu erbringende Leistung des Motors und die Höhe des Energiebedarfs.

¹⁰ vgl. Rosenthal, S.49

2.1.1 Rollwiderstand

Die Kräfte, die am Rad gegen die Bewegung wirken, werden Radwiderstände genannt. Beim geradeaus fahrenden Fahrzeug hat der **Rollwiderstand** den größten Anteil an den Radwiderständen. "Er entsteht hauptsächlich durch die Formänderungsarbeit im Reifen beim Abrollen auf einer ebenen Fahrbahn."¹¹ Darüber hinaus geht die Verformung des Bodens bei weichem Untergrund in die Größe des Rollwiderstands ein. Der Rollwiderstand ist von der Betriebsdauer, der Umgebungstemperatur, der Radlast, dem Reifenluftdruck, der Fahrgeschwindigkeit, etc. abhängig. Zusätzlich spielen Reifentyp (Reifenaufbau, Gummimischung und Reifenhalbmesser), Fahrgeschwindigkeit und Fahrbahnbeschaffenheit eine Rolle.

Hinweis: Bei kleinen konstanten Geschwindigkeiten ist der Anteil des Rollwiderstandes am Gesamtwiderstand der größte.

Der Rollwiderstand ist nach folgender einfacher Gleichung proportional zum Betrag der Kraft, mit der das Fahrzeug auf die Straße gepreßt wird:

$$F_R = k_R \cdot m \cdot g \quad (\text{Gl. 1})$$

F_R	N	Rollwiderstandskraft
k_R	-	Rollwiderstandszahl
m	kg	Gesamtgewicht
g	m/s	Erdbeschleunigung

Bei Messungen auf nassen Fahrbahnen wird ein weiterer Radwiderstandsanteil, der **Schwallwiderstand**, zum Rollwiderstand addiert. "Er entsteht dadurch, daß der Reifen Wasser verdrängen muß. Der Schwallwiderstand hängt von der Fahrgeschwindigkeit, der Reifenbreite und der Wasserfilmdicke ab. Bei größeren Wasserfilmdicken und Geschwindigkeiten schwimmt der Reifen auf, d.h., es kommt zu Aquaplaning."¹²

Neben dem Rollwiderstand und dem Schwallwiderstand gehören zu den Radwiderständen die **Lagerreibung** und der **Vorspurwiderstand**, der durch seitliche Deformation von schräg zur Fahrbahn laufenden Reifen entsteht. Die letzten beiden Anteile sind vernachlässigbar klein und werden bei Messungen dem Rollwiderstand zugeordnet.

Anmerkung:

Bei Kurvenfahrt tritt ein zusätzlicher Widerstand, der ebenfalls zu den Radwiderständen gehört auf. Der Kurvenwiderstand ist nach folgender Gleichung proportional zur Gewichtskraft.¹³

¹¹ Zomotor, S.17

¹² Zomotor, S.19

¹³ Zomotor, S.21

$$F_{\text{RK}} = k_{\text{RK}} \cdot m \cdot g \quad (\text{Gl. 2})$$

F_{RK}	N	Kurvenwiderstandskraft
k_{RK}	-	Kurvenwiderstandszahl
m	kg	Gesamtgewicht
g	m/s ²	Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Die Kurvenwiderstandszahl ist abhängig von der Geschwindigkeit, dem Kurvenradius, den Fahrzeugabmessungen (Radstand, Abstände von Vorder- und Hinterachse zum Schwerpunkt), und den Winkeln der schräg zur Fahrbahn laufenden Reifen.

2.1.2 Steigungswiderstand

Die Steigungswiderstandskraft F_{St} muß beim Befahren von Steigungen überwunden werden. Man bezeichnet sie in der Physik üblicherweise als Hangabtriebskraft.

$$F_{\text{St}} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (\text{Gl. 3})$$

F_{St}	N	Steigungswiderstandskraft
m	kg	Startgewicht
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
α	[°]	Steigungswinkel

Die Steigung von Straßen wird üblicherweise in Prozent angegeben. Eine Steigung von 10 % beispielsweise bedeutet einen Anstieg von 10 Metern auf einer waagerechten Länge von 100 Metern, oder $\tan \alpha = 0,1$.

$$\tan \alpha = \frac{\text{st}}{100} \quad (\text{Gl. 4})$$

st	[%]	Steigung
----	-----	----------

Toleriert man bei der Berechnung des Steigungswiderstandes einen Fehler von unter 5%, dann kann man bei Steigungen bis zu 30 % $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ setzen. Eine Steigung von 30 % entspricht einem Winkel von 17°.

Steigung in %	5	10	15	20	25	30
Fehler in %	0,12	0,50	1,12	1,98	3,08	4,40

Fehler Abschätzung beim Steigungswiderstand

Dadurch vereinfacht sich die Rechnung:

$$F_{\text{St}} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \approx m \cdot g \cdot \tan \alpha = m \cdot g \cdot \frac{\text{st}}{100} \quad (\text{Gl. 5})$$

Toleriert man keinen Fehler, möchte man aber dennoch der Einfachheit halber mit $\tan \alpha$ oder der Steigung rechnen, so ergibt sich folgende Formel:

$$F_{St} = m \cdot g \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} = m \cdot g \cdot \frac{st}{\sqrt{100^2 + st^2}} \quad (\text{Gl. 6})$$

2.1.3 Luftwiderstand

Bei Umströmung des Fahrzeugs durch den Fahrtwind entsteht bei Geradeausfahrt eine gegen die Fahrtrichtung gerichtete Luftwiderstandskraft:

$$F_L = c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot v^2 \quad (\text{Gl. 7})$$

F_L	N	Luftwiderstandskraft
c_w	-	Luftwiderstandszahl
A	m^2	Querspanfläche (angeströmte Fläche)
ζ	kg/m^3	Luftdichte
v	m/s^2	Anströmgeschwindigkeit

Die Luftdichte ändert sich mit dem Luftdruck d und der Temperatur ϑ :

$$\zeta = \frac{348,7 \cdot d}{273,2 + \vartheta} \quad (\text{Gl. 8})$$

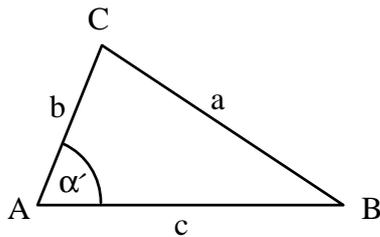
ζ	kg/m^3	Luftdichte
d	bar	Luftdruck
ϑ	$^{\circ}C$	Temperatur

Bei einer Temperatur von $20^{\circ}C$ und einem Luftdruck von 1 bar beispielsweise beträgt die Luftdichte $1,19 \frac{kg}{m^3}$.

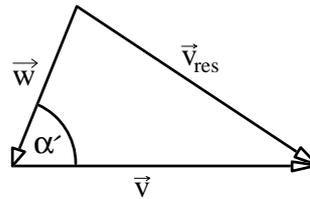
Bei Wind überlagert sich die Windgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit des Fahrtwindes.

$$\vec{v}_{res} = \vec{v} + \vec{w} \quad (\text{Gl. 9})$$

Der Betrag der resultierenden Luftanströmgeschwindigkeit kann mit Hilfe des Kosinussatzes berechnet werden.



Kosinussatz-Dreieck



Resultierende Luftanströmgeschwindigkeit

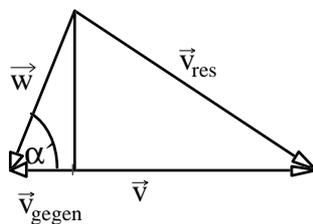
Kosinussatz:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos \alpha' \quad (\text{Gl. 10})$$

$$v_{\text{res}}^2 = w^2 + v^2 - 2 \cdot v \cdot w \cdot \cos \alpha' \quad (\text{Gl. 11})$$

Bei Wind, der keinen direkten Gegenwind darstellt, muß nicht nur eine neue Anströmgeschwindigkeit berechnet werden, sondern man muß anstelle des Luftwiderstandsbeiwertes den Tangentialkraftbeiwert c_T einsetzen. Er ist abhängig vom Anströmwinkel und den aerodynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs. Der c_w -Wert ist nur bei dem Anströmwinkel $\alpha' = 0^\circ$ gültig. Auch muß für A die tatsächlich angeströmte Fläche und nicht die Stirnfläche berücksichtigt werden.

Hinweis: Möchte man bei Gegenwind weiterhin mit dem c_w -Wert rechnen, so wird in erster Näherung der Anteil der Windgeschwindigkeit, der gegen die Fahrtrichtung gerichtet ist, zu der Fahrgeschwindigkeit addiert.



$$v_{\text{gegen}} = w \cdot \cos \alpha' \quad (\text{Gl. 12})$$

$$v_{\text{Anström}} = v + v_{\text{gegen}} \quad (\text{Gl. 13})$$

Gegenwind-Dreieck

Im Luftwiderstand ist auch der Lüfterwiderstand der Räder infolge Rotation enthalten. Bezogen auf den Gesamtluftwiderstand, kann er jedoch vernachlässigt werden.¹⁴

2.1.4 Beschleunigungswiderstand

Bei der Beschleunigung eines Fahrzeugs entsteht durch das Bestreben der beteiligten Massen, in ihrem Bewegungszustand zu bleiben, ein Beschleunigungswiderstand. Dieser Effekt wird Massenträgheit genannt. Zusätzlich zur Beschleunigung in Fahrtrichtung (translatorische Be-

¹⁴ Zomotor, S. 29

schleunigung) widersetzen sich sogenannte rotatorische Massen (Räder, Achsen, etc.) ihrer Drehbeschleunigung.

$$F_a = F_{a,trans} + F_{a,rot} = m \cdot a + J_{Rad} \cdot \frac{\epsilon}{r_{dyn}} \quad (\text{Gl. 14})$$

F_a	N	Beschleunigungswiderstandskraft
m	kg	Masse des Fahrzeugs (mit Zuladung)
a	m/s	lineare (translatorische) Beschleunigung
J_{Rad}	kg m	Summe der rotatorischen Trägheitsmomente, bezogen auf die Winkelgeschwindigkeit des Antriebrades
ϵ	1/s	Winkelbeschleunigung des Rades
r_{dyn}	m	dynamischer Radius des Rades

"Der dynamische Radius entspricht nicht dem Halbmesser des Rades, denn durch das Fahrzeuggewicht, das auf dem Reifen lastet, wird der Reifen an der Berührungsfläche mit der Fahrbahn abgeplattet, es entsteht der sogenannte Latsch. Des weiteren hängt der Durchmesser eines Rades vom Luftdruck, von der Reifenabnutzung und den dort wirkenden Fliehkräften ab".

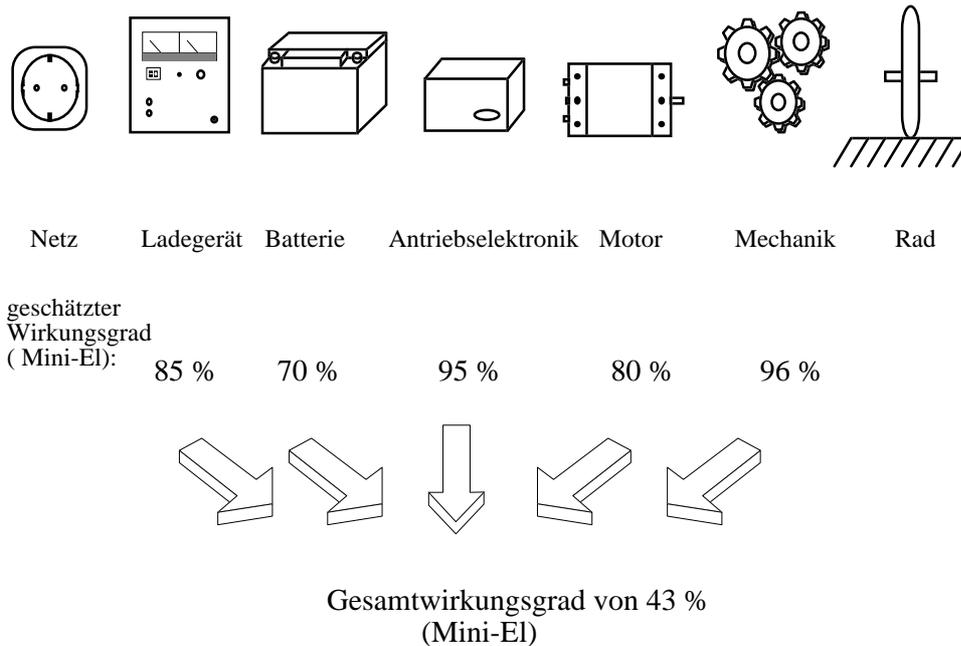
Um den rotatorischen Massenanteil aus der vorhergehenden Gleichung in einer vereinfachten Berechnung des Beschleunigungswiderstandes zu berücksichtigen, kann ein Drehmassenfaktor eingeführt werden:

$$F_a = k_m \cdot m \cdot a \quad (\text{Gl. 15})$$

F_a	N	Beschleunigungswiderstandskraft
k_m	-	Drehmassenfaktor
m	kg	Masse des Fahrzeugs (mit Zuladung)
a	m/s	translatorische Beschleunigung

2.2 Wirkungsgrade

Der Gesamtwirkungsgrad eines Elektromobils läßt sich aus dem Produkt der Wirkungsgrade der Einzelkomponenten des Fahrzeugs berechnen.



2.2.1 Mechanik

Trotz zahlreicher verschiedener Antriebsarten können hohe mechanische Gesamtwirkungsgrade von bis zu 98% erreicht werden. Der Getriebewirkungsgrad hängt stark von Reibungsverlusten ab, die unter anderem von der Art und der Temperatur des Schmiermittels und von der Belastung abhängen.

Zahnradwechselgetriebe (im Extremfall)	98%-99%
Getriebe mit stufenloser Wandlung	ca. 96%
Stufenloses Schubgliedergetriebe	98%-99%
Deltamat-Getriebe (Rennausführung)	90%-95%
Kettengetriebe	ca. 95%
Zahnriemen	98%
Scheibenkupplung	99,5%
Gelenkwelle	99,5
Achsenantrieb mit Differential	99%
Lager	99,5%

Wirkungsgrade einiger möglichen mechanischen Antriebskomponenten¹⁵

Erwähnt sei hier noch der Polygoneffekt beim Kettenantrieb. "Die vieleckige Auflage der Kette auf den Kettenrädern verursacht eine Schwankung des wirksamen Durchmessers und

¹⁵ R.Reichel, Kapitel 3

damit der Kettengeschwindigkeit. Dadurch kommt es zu einer überlagerten Beschleunigung und Verzögerung der Kette, es entstehen Verluste und Geräusche."¹⁶

2.2.2 Motor

Der Motor ist eine der wichtigsten Komponenten am Fahrzeug. Von den verschiedenen Typen der Elektromotoren, Gleich- und Drehstrommotoren, haben sich nach der Tour de Sol 1987, als der damalige Gewinner gleich zwei Wagen mit Drehstrom-Synchronmotoren erfolgreich einsetzte, die vorher kaum eingesetzten Drehstromantriebe immer stärker durchgesetzt. Die Motorwirkungsgrade sind je nach verwendeter Motorart zwischen 70 bis über 90%. Sie liegen bei sogenannten bürstenlosen Gleichstromantrieben, die vom Prinzip her Drehstrom-Synchronmaschinen sind, am höchsten.¹⁷

Hinweis: Da sich der Wirkungsgrad des Antriebs während einer Fahrt stark ändert, wird eine Berechnung des Energiebedarfs erschwert.

Rekuperation

Die Rückgewinnung von kinetischer Energie in speicherbare Energie durch generatorisches Bremsen wird Rekuperation, Nutzbremung oder Rückspeisung genannt. Rekuperation ist bei den meisten Elektromotoren möglich, da sie auch als Generatoren wirken können, aber in der Praxis nicht immer verwirklicht. Mit Nutzbremung sind bei Elektrofahrzeugen in der Praxis Energieeinsparungen zwischen 5% und 25% möglich.¹⁸

2.2.3 Antriebselektronik

Die Firma Brusa Elektronik geht in einem Angebot einer Gleichstrom-Motorsteuerung von einem mittleren Wirkungsgrad von mindestens 97% aus. Jeanneret stellt für die Antriebselektronik des Fahrzeug der Ingenieurschule Biel (1987) in einen Wirkungsgrad von 93% – 97% fest.¹⁹

2.2.4 Batteriewirkungsgrad

Batterie- typ	Energetischer Wirkungsgrad ohne Heizung	Betriebs- temperatur
Pb-PbO	75%	0 bis 55°
Ni-Cd	60%	-20 bis 55°
Na-S	88%	300 bis 380°

Batterie Wirkungsgrade²⁰

¹⁶ Legler, S. 39

¹⁷ R. Reichel, S.4-7

¹⁸ Wille, S. 109

¹⁹ Jeanneret, S.48

²⁰ Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke, S.7

Hinweis: Exakte Angaben zum Wirkungsgrad der verschiedenen Batterie Typen finden sich kaum, da viele Parameter wie Strom, Temperatur, Alter, etc. berücksichtigt werden müssen.

2.2.5 Ladegerätwirkungsgrad

Ein Ladegerät paßt die Wechsellspannung des öffentlichen Stromnetzes an die Batteriegleichspannung an und schützt die Batterie vor Überladen (z.B. durch eine Begrenzung der Ladespannung). Der Wirkungsgrad guter Ladegeräte beträgt heute zwischen 85% bis 95%. Die Firma Brusa Elektronik bietet ein Netz-Ladegerät mit einem mittleren Wirkungsgrad von 90% - 95% an.

2.3 Arten des Energieverbrauchs

Soll der Energieverbrauch eines Fahrzeugs berechnet werden, muß zunächst der Energieverbrauch am Rad errechnet werden, der dann als Grundlage für weitere Berechnungen von den verschiedenen Arten des Energieverbrauchs dienen kann.

Der "Energieverbrauch" am Rad wird unabhängig von der Antriebsart bei jedem Fahrzeug auf Rädern durch den Gesamtwiderstand und somit durch folgende Fahrzeugwerte bestimmt:

Masse,
Rollwiderstandszahl,
Luftwiderstandszahl
Querspantfläche

Möchte man für die Fortbewegung möglichst wenig Energie aufwenden, so sind grundsätzlich bei jedem Fahrzeug die oben genannten Größen durch folgende Maßnahmen klein zu halten:

- Leichtbauweise (kleine Masse)
- Verwendung von Reifen mit geringem Rollwiderstand, Maloya Energy Saving Tyre, oder Continental/Mini-El, etc. (kleine Rollwiderstandszahl)
- Bau von windschlüpfrigen Karosserien mit kleiner Querspantfläche

Die Komponenten des Elektromobils und ihr Wirkungsgrad bestimmen neben den Fahrzeugwerten den Energiebedarf ab Akku und ab Netz. Der Energiebedarf ab Akku begrenzt aufgrund der beschränkten Speicherkapazität der Batterien die Reichweite des Elektromobils.

2.3.1 Leistung am Rad und am Motor

Der Betrag der Radleistung, der erforderlich ist, um den Gesamtwiderstand bei einer konstanten Geschwindigkeit zu überwinden, ergibt sich als Produkt aus dem Gesamtwiderstand und der Geschwindigkeit:

$$P_{\text{rad}} = F_{\text{ges}} \cdot v \quad (\text{Gl. 16})$$

Berechnet ein Fahrzeugbauer die Leistung am Rad für die erwünschte Höchstgeschwindigkeit, so kann er über den Wirkungsgrad zwischen Motor und Rad Rückschlüsse auf die benötigte Leistungsfähigkeit des Motors ziehen.

Von den Vereinfachungen mit den Wirkungsgraden ausgehend wird die Leistung am Motor auf folgende Weise berechnet:

$$P_{\text{Motor}} = \frac{P_{\text{rad}}}{\eta_{\text{Me}} \cdot \eta_{\text{Mo}} \cdot \eta_{\text{Ae}}} = \frac{F_{\text{ges}} \cdot v}{\eta_{\text{Me}} \cdot \eta_{\text{Mo}} \cdot \eta_{\text{Ae}}} \quad (\text{Gl. 17})$$

2.3.3 Energieverbrauch am Rad

Die Arbeit am Rad ist die Arbeit, die benötigt wird, um den Gesamtwiderstand zu überwinden. Sie kann durch folgende Gleichung allgemein angegeben werden:

$$W_{\text{rad}} = \int_{s_1}^{s_2} F_{\text{ges}}^{\text{p}}(s) \, ds = \int_{t_1}^{t_2} F_{\text{ges}}(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad (\text{Gl. 18})$$

Da das Berechnen des Integrals bei konstanter Geschwindigkeit sehr einfach ist, wird zunächst die Arbeit am Rad bei konstanter Geschwindigkeit untersucht, obwohl wir nach der Berechnung des Integrals für konstante Beschleunigung und Einsetzen einer Beschleunigung von 0 das gleiche Ergebnis erhalten müssten.

$$\begin{aligned} W_{\text{Rad}} &= \int_{s_1}^{s_2} F_{\text{ges}}^{\text{p}} \, ds = (F_R + F_{St} + F_L) \int_{s_1}^{s_2} ds = \\ &= (k_R \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \frac{st}{\sqrt{100^2 + st^2}} + c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot v^2) \cdot (s_2 - s_1) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 19})$$

Für konstante Beschleunigung gilt:

$$\begin{aligned} W_{\text{rad}} &= \int_{s_1}^{s_2} F_{\text{ges}}^{\text{p}}(s) \, ds = \int_{s_1}^{s_2} (k_R \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \sin \alpha + c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot v^2 + m \cdot a) \cdot ds = \\ &= (F_R + F_{St} + F_{L_{v_1}} + F_{L_a} + F_a) \cdot (s_2 - s_1) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 20})^{21}$$

mit

$$F_{L_{v_1}} = c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot v_1^2; \quad F_{L_a} = c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot a \cdot (s_1 + s_2) \quad (\text{Gl. 21})$$

Für $a = 0$ entspricht die Gleichung für konstante Beschleunigung erwartungsgemäß der Gleichung für konstante Geschwindigkeit.

²¹ Herleitung siehe Anhang

2.3.4 Energieverbrauch ab Akku

Die Formeln für den Energiebedarf ab Akku und ab Netz basieren auf der Formel für die Arbeit am Rad²². Der Einfachheit halber beziehen wir Rekuperation²³ hier nicht ein. Da beim Bremsen ein negativer Energieverbrauch am Rad entstehen kann, darf bei der einfachen Rechnung nur der positive Energieverbrauch am Rad berücksichtigt werden.

$$E_{\text{Akku}} = \frac{E_{\text{rad,pos}}}{\eta_{\text{Me}} \cdot \eta_{\text{Mo}} \cdot \eta_{\text{Ae}}} \quad (\text{Gl. 22})$$

Der Energieverbrauch ab Akku für eine bestimmte Strecke ist für den Fahrer des elektrischen Straßenfahrzeuges von besonderer Bedeutung (vor allem bei Rennen, Reichweitentests, oder anderen Wettbewerben). Kennt er den durchschnittlichen Verbrauch seines Fahrzeugs in Wh oder Ah pro Kilometer, so kann er über die Kapazität seiner Fahrzeugbatterien seine Reichweite abschätzen. Unter anderem beeinflusst erfahrungsgemäß sein Fahrverhalten – insbesondere häufiges Beschleunigen, wie im Kapitel "Einfluß der Fahrweise" quantitativ untersucht wird – trotz eventuell vorhandener Rekuperationsmöglichkeit stark die Höhe des Verbrauches.

2.3.5 Energieverbrauch ab Netz

Zur Deckung des Energiebedarfs, der von außen dem Elektromobil zugeführt werden muß, kann das öffentliche Stromnetz benutzt werden. Selbst einige Millionen Elektrofahrzeuge können von dem bereits bestehenden Leitungsnetz versorgt werden.²⁴

Aber erst wenn der gesamte Energieverbrauch eines Elektromobils über Solarzellen oder andere regenerative Energiequellen gedeckt wird, darf man dieses dann besonders umweltfreundliche Fahrzeug ein Solarmobil nennen.

Bei folgender einfacher Formel wurde der Energieverbrauch im Stand und Rekuperation (siehe Glossar im Anhang) nicht berücksichtigt:

$$E_{\text{netz}} = \frac{E_{\text{akku}}}{\eta_{\text{AN}}} = \frac{E_{\text{rad,pos}}}{\eta_{\text{Me}} \cdot \eta_{\text{Mo}} \cdot \eta_{\text{Ae}} \cdot \eta_{\text{AN}}} = \frac{E_{\text{rad,pos}}}{\eta_{\text{ges}}} \quad (\text{Gl. 23})$$

2.3.6 Zyklusverbrauch

Da sich Fahrten in der Praxis aus Abfolgen von Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit und Beschleunigung zusammensetzen, ist der Zyklusverbrauch eines Elektromobils für den durchschnittlichen Energiebedarf realitätsnäher und aussagekräftiger als der Energieverbrauch für konstante Geschwindigkeit oder Beschleunigung. Wir verwenden die von Wille vorgeschlagene Definition: "Als Zyklusverbrauch wird die Energiemenge bezeichnet, die ein

²² für konstante Geschwindigkeit

²³ siehe Glossar

²⁴ Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke, S.4

Fahrzeug für eine Fahrt nach einem vorgeschriebenen Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf benötigt."²⁵

Anhand von Zyklen soll der Verbrauch für bestimmte Fahrsituation (z.B. Stadtverkehr, Überlandfahrten, Bergprüfungen) repräsentativ ermittelt werden. Der Zyklus setzt sich aus einzelnen Phasen (Beschleunigung, Verzögerung, Konstantfahrt, Stillstand, schnelle Autobahnfahrt) mit jeweils unterschiedlicher Dauer und Häufigkeit zusammen. So kann beispielsweise der für eine Stadtfahrt charakteristische "stop and go" Verkehr nachempfunden werden.

"Die grundsätzliche Schwierigkeit bei der Ermittlung des Zyklenverbrauches ist die experimentelle Reproduktion eines vorgegebenen Geschwindigkeit-Zeit-Verlaufes. Ohne hohen Aufwand an Steuer- und Regelmechanismen und ohne spezielles Versuchsgelände ist i.d.R. eine solche Fahrweise nicht zu realisieren."²⁶

Um die Schwierigkeiten bei der experimentellen Reproduktion zu vermeiden, kann der Zyklusverbrauch für verschiedene Fahrzeuge und Zyklen durch Computerprogramme, wie z.B. Solarsoft, theoretisch ermittelt werden.

3. Berechnungen und Messungen

Berechnungen verschiedener Art lassen sich mit obigen Formeln einerseits per Taschenrechner oder andererseits bequemer und schneller mit dem PC-Programm Solarsoft durchführen. Nach Eingabe bzw. Laden der benötigten Werte, können menügesteuert entweder Tabellen oder Diagramme zur Darstellung der Ergebnisse ausgewählt werden.

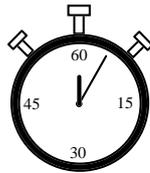
Eine Schwierigkeit bei Berechnungen liegt in der Ermittlung der genauen Fahrzeugwerte insbesondere der Wirkungsgrade. Können keine Angaben vom Hersteller oder sonstwie ermittelt werden, so kann man immer noch Standardwerte eingeben.

Ein wichtiges aber aufwendigeres Mittel zum Kennenlernen des Energiebedarfs sind Messungen. Durch zahlreiche Messungen und durch ihre statistische Auswertung könnte die aufgestellte Theorie empirisch überprüft werden. Hier wird allerdings mit einem Vergleich von einigen wenigen Meßergebnissen und Berechnungen vorlieb genommen.

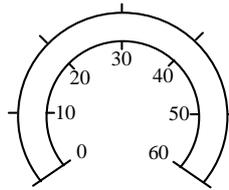
Durchgeführt wurden Messungen des Energiebedarfs ab Akku für verschiedene konstante Geschwindigkeiten und für Beschleunigungen von 0 auf verschiedene Endgeschwindigkeiten, sowie Messungen des Verbrauches ab Akku und ab Netz für die Strecke Reifenberg-Ebermannstadt Gymnasium und zurück. Bei den Messungen wurden folgende Instrumente benutzt:

²⁵ Wille, S.9

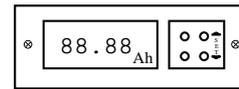
²⁶ Wille, S.11



Stoppuhr



Geschwindigkeitsmesser



Ah - Meßgerät

Mit dem Batterieüberwachungssystem DCC 4000 werden die Ah, die aus der Batterie fließen, auf zwei Kommastellen genau gemessen. Mit relativ schlechter Genauigkeit ($\pm 2,5 \text{ km/h}$) wird die Geschwindigkeit abgelesen. Über die mit einer Stoppuhr auf die Sekunde genau gemessene Zeit wird der zurückgelegte Weg berechnet.

Wegen der vielen verschiedenen mit Solarsoft leicht durchführbaren Berechnungen können alle Messungen mit Berechnungen verglichen werden.

3.1 Fehlerbetrachtung

Aufgrund mehrerer unten aufgeführter Fehlerquellen bietet es sich an, für die Rechnungen einen Korrekturfaktor einzuführen.

3.1.1 Fehlerquellen

Die Modellannahmen:

- Vernachlässigung des Schwallwiderstandes
- Vernachlässigung des Vorspurwiderstandes
- konstante Rollwiderstandszahl
- konstante Fahrzeugmasse
- konstanter Steigungen für einzelne Strecken
- kein Wind
- konstante Luftdichte
- Vernachlässigung der rotatorischen Massenanteile
- konstante Wirkungsgrade

verursachen Fehler.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle stellt die Ermittlung der einzusetzenden Fahrzeugwerte dar (Rollwiderstand, Wirkungsgrade, etc.) dar.

In der Rechnung nicht berücksichtigt, aber in die Meßwerte mit eingehend ist der Energieverbrauch der Nebenverbraucher. D.h. der Verbrauch von Scheinwerfern, Scheibenwischer, Bremslichter und Verbrauch im Stand wird nicht berücksichtigt, obwohl die Nebenverbraucher ihre Energie aus den Antriebsbatterien beziehen können.

Die Meßwerte können durch Unregelmäßigkeiten wie Verschmutzung der Strecke, Wettereinflüsse auf die Straße (Wasser, Reif), sich ändernde Windverhältnisse nachteilig verändert werden. Beim Ablesen der Meßdaten können neben dem Fehler der Meßgeräte Ungenauigkeiten auftreten. Der Fahrer kann beim Regulieren der Geschwindigkeit für konstante Fahrt

durch den Verkehr und durch das Aufschreiben von Ergebnissen gestört werden. Das Umspringen und das nicht Umspringen der Ah-Anzeige könnte einen weiteren Fehler bewirken.

3.1.2 Fehlerbeseitigung

Zur Verminderung der Abweichungen würde eine Verbesserung der Berechnungen (z.B. durch das Miteinbeziehen der rotatorischen Massen) beitragen. Neben der Beseitigung der oben aufgeführten Fehlerquellen (z.B. durch ein Versuchsgelände) wären zahlreiche Messungen und ihre statistische Auswertung notwendig, um exakte Aussagen über die Abhängigkeit des Energieverbrauch von allen Parametern geben zu können.

Um von vornherein Fehler zu beseitigen, wird ein sogenannter Korrekturfaktor eingeführt.

3.1.3 Korrekturfaktor

Mit dem Korrekturfaktor sollen die fehlerbedingte Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Werten ausgeglichen werden. Folgende Werte werden unten mit dem Korrekturfaktor multipliziert:

- Leistung am Motor
- Verbrauch ab Akku
- Verbrauch ab Netz

Wird der Korrekturfaktor auf 1 gesetzt, so wirkt er sich nicht aus.

3.2 Beispiel Mini-El

Für die verschiedenen Berechnungen müssen folgende wichtige Fahrzeugwerte ermittelt werden:

Startgewicht,
Rollwiderstandszahl,
Luftwiderstandszahl,
Querspanntfläche,
Raddurchmesser
Nennspannung
Wirkungsgrad Ladegerät,
Wirkungsgrad Batterie,
Wirkungsgrad Antriebselektronik,
Wirkungsgrad Motor,
Wirkungsgrad Mechanik, etc.

Der Korrekturfaktor wurde beim Mini-El für folgende Berechnungen auf 1,3 gesetzt.

3.2.1 Ermittlung der Fahrzeugwerte

Aus der Betriebsanleitung des Mini-EI City läßt sich entnehmen, daß das Eigengewicht einschließlich Batterien und Ladebox 290 kg beträgt. Das Körpergewicht des Fahrers einschließlich Kleidung beläuft sich auf ca. 75 kg, standardmäßige Zuladung wie Warn-dreieck, Ersthilfekissen, Bordwerkzeug, Kabeltrommel etc. macht ca. 4,0 kg aus. Dazu kommt das nachträglich installierte Solardach und zusätzlich eingebaute Meßgeräte mit insgesamt ca. 10,5 kg. Zu diesen bisher knapp 380 kg kommt je nach Fahrt zusätzliche Zu-ladung so daß mit einem Startgewicht (= tatsächliches Gewicht) von 390 kg gerechnet werden kann.

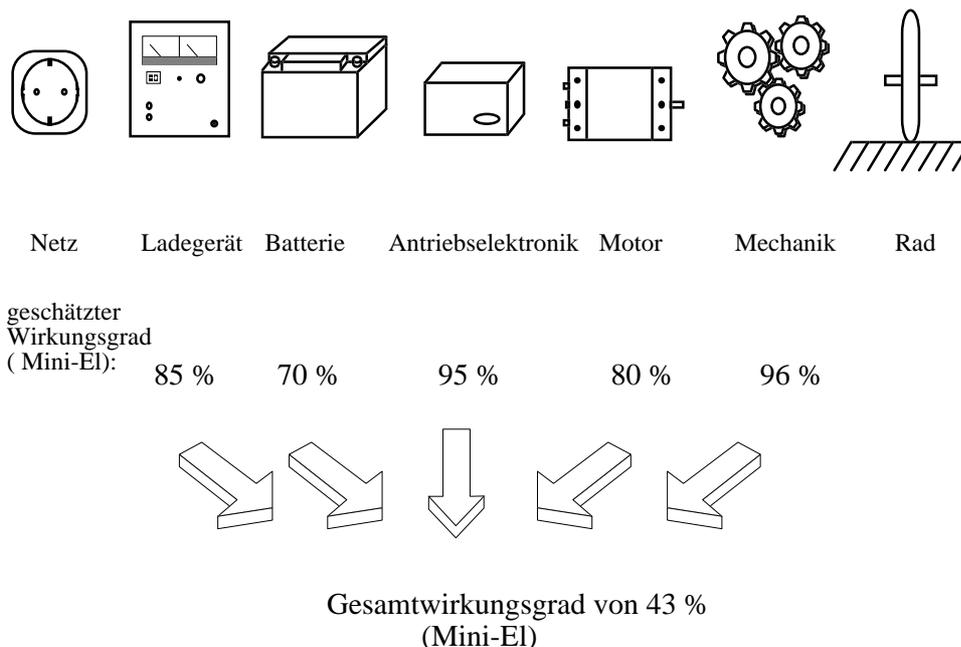
Übliche Werte für die Rollwiderstandszahl liegen zwischen 0,01...0,02 je nach Straßenbelag. Auf Anfrage gab die Herstellerfirma des Mini-EI eine Rollwiderstandszahl von 0,011 bekannt.

Durch den Aufbau von Solarzellen hat sich sowohl die ursprüngliche Stirnfläche von 0,99 m² als auch die ursprüngliche Luftwiderstandszahl von 0,31 (laut Entwicklungsabteilung der Mini-EI bzw. City EI Hersteller) verändert. Durch Addition der zusätzlichen Stirnfläche errechnet sich eine Stirnfläche von 1,008 m². Da geringfügig größere Rückspiegel als die vom Werk eingebauten nachgerüstet wurden, rechnen wir mit einer Stirnfläche von 1,01 m². Schätzungsweise beträgt die neue Luftwiderstandszahl 0,34. Eine Windkanalmessung, um den genauen Wert zu bestimmen, wurde nicht durchgeführt.

Da mit den üblichen Meßgeräten in Elektromobilen die verbrauchte Energiemenge in Ah abgelesen wird, werden in Solarsoft die berechneten Wh über die Nennspannung in Ah umge-rechnet. Da die Nennspannung nicht der tatsächlichen Spannung entspricht, entsteht hier ein kleiner Fehler.

Die Nennspannung beträgt bei meinem Mini-EI 36 V. Die Kapazität beträgt bei fünfstündiger Entladung $36V \cdot 90Ah = 3,24kWh$. Da die typischen Fahrströme zwischen 30 bis 50 A liegen, d. h. die Batterie mit C1 bis C2 belastet wird, d. h. ein bis zweistündige Entladung, reduziert sich die entnehmbare Energiemenge, so daß höchstens von einer tatsächlich entnehmbaren Energie von ca. $36V \cdot 50Ah = 1,8 kWh$ ausgegangen werden kann.

Für die Berechnung des Energiebedarfes ab Akku und ab Netz werden die Wirkungsgrade der Komponenten Mechanik, Motor, Antriebelektronik, Batterie und Ladegerät benötigt. Die genauen Werte des jeweiligen Wirkungsgrades sind uns nicht genau bekannt, zumal ja die Wirkungsgrade in der Realität während der Fahrt schwanken. Die Werte für die Wirkungsgrade stellen somit eine Mischung aus selbst abgeschätzten und von Mini-EI Händlern angenommenen Werten dar.



Da die Fahrzeugwerte Masse, Rollwiderstandszahl, Luftwiderstandszahl und Querspanntfläche im Vergleich zu den Wirkungsgraden relativ genau ermittelt wurden, ist zu erwarten, daß die Berechnungen für die Arbeit am Rad wesentlich genauer sind als die Berechnungen für den Energiebedarf ab Akku oder ab Netz.

3.2.2 Konstante Geschwindigkeit

Die Meßfahrten mit dem Mini-EI City bei konstanter Geschwindigkeit wurden, da kein Testgelände oder keine ideale Versuchsstrecke zur Verfügung stand, auf nur nahezu ebener und trockener Strecke (B 470) durchgeführt. Daher ergeben sich für Strecke A bis B und B bis A unterschiedliche Meßwerte:

konst. Geschwindigkeit in km/h	20	30	40	50
berechnete Ah/km	0,67	0,79	0,96	1,17
gemessene Ah/km, A-B ²⁷	0,97	0,99	1,00	1,21
gemessene Ah/km, B-A ²⁸	0,70	0,75	0,86	0,92

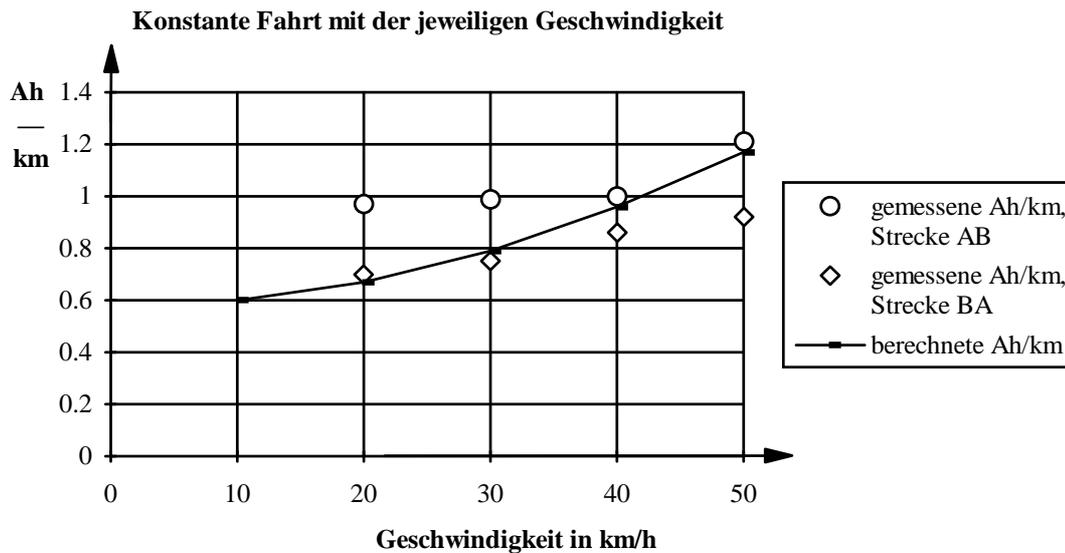
Für den Mini-EI berechneter und gemessener Ah/km Bedarf ab Akku.²⁹

Anmerkung: Um bei der im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen (auf der Bundesstraße) niedrigen Geschwindigkeit von 20 km/h keine Behinderungen hervorzurufen, wurden diese Messungen früh am Morgen nach Silvester durchgeführt, als die Straßen wie leergefegt waren.

²⁷ Strecke von Reifenberg nach Rüssenbach

²⁸ Strecke von Rüssenbach nach Reifenberg

²⁹ Weitere Meßergebnisse siehe Anhang



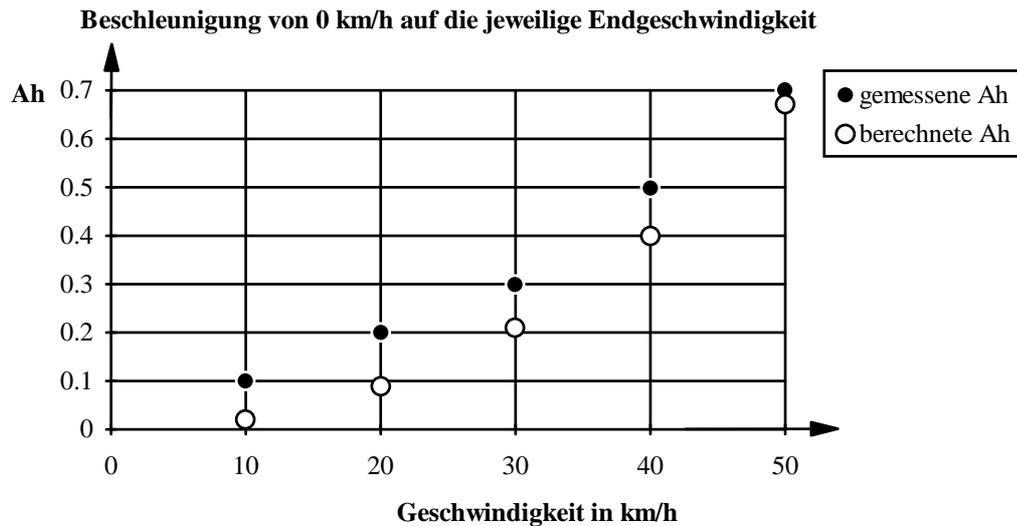
Graphischer Vergleich von Messung und Berechnung

3.2.3 Konstante Beschleunigung

Mit dem Mini-El wurde von 0 aus auf verschiedene Geschwindigkeiten beschleunigt. Obwohl die Meßfahrten mit durchgedrücktem "Strompedal" durchgeführt wurden, und somit keine konstante Beschleunigung erzielt wurde, wird die Beschleunigung vereinfacht als konstant angenommen. Die Messungen wurden auf überwiegend ebener und trockener Strecke durchgeführt.

Endgeschwindigkeit in km/h	10	20	30	40	50
Zeit in Sekunden	3,9	6,0	8,4	16,6	25,0
gemessene Ah	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
berechnete Ah	0,02	0,09	0,21	0,40	0,67

Berechnete und gemessene Ah bei Beschleunigung



Graphischer Vergleich Messung-Berechnung

Bei den Meßwerten zur Beschleunigung trat im Vergleich zu den Werten bei konstanter Fahrt eine wesentlich geringere Streuung auf. Eine Erklärung dafür ist, daß die kurze Strecke, auf der die Beschleunigungen durchgeführt wurden, weniger Unregelmäßigkeiten aufweist als die Strecke, auf der die Messungen bei konstanter Fahrt durchgeführt wurden.

Hinweis: Beim Anfahren und Beschleunigen auf kleine Geschwindigkeiten arbeitet der Antrieb in einem ungünstigen Bereich, so daß der Wirkungsgrad erheblich unter dem maximalen Wirkungsgrad liegt.

3.2.4 Strecke Reifenberg-Ebermannstadt und zurück

Um eine Energieberechnung für die Strecke Reifenberg Ebermannstadt/Gymnasium und zurück durchführen zu können, wurden die einzelnen Fahrzustände wie bei einem genormten Zyklus betrachtet. Dabei wird der Energieverbrauch ab Akku mit Solarsoft für die wesentlichen Phasen berechnet:

Reifenberg \Rightarrow Ebermannstadt, oberer Parkplatz GFS:

Reifenberg runter	rechnerisch kein Verbrauch
B 470: Beschleunigung von 0 auf 50 km/h (174 m)	0,67 Ah
bis Ebermannstadt konstante 50 km/h (3,5 km)	4,09 Ah
in der Stadt von 50 auf 0 km/h	rechnerisch kein Verbrauch
Hügel hoch von 0 auf 30 km/h (ca. 4%, 10s lang)	0,30 Ah
Hügel weiter hoch mit konstanten 30 km/h (0,7 km)	2,02 Ah
Gesamter Verbrauch ab Akku	7,08 Ah
Verbrauch pro km ab Akku bei 5,2 km Länge	1,36 Ah/km

Ebermannstadt Gymnasium \Rightarrow Reifenberg:

Ebermannstadt Hügel runter	rechnerisch kein Verbrauch
Ebermannstadt und B 470 von 0 auf 50 km/h	0,67 Ah
B 470 mit konstanten 50 km/h (3,5 km)	4,09 Ah
Abbremsen auf 20 km/h	rechnerisch kein Verbrauch
Reifenberg hoch mit 20 km/h(ca. 12%, 0,8 km)	7,96 Ah
Gesamter Verbrauch ab Akku	12,72 Ah
Verbrauch pro km ab Akku bei 5,2 km Länge	2,45 Ah/km

Multipliziert man die Werte 1,36 und 2,45 Ah/km mit der Nennspannung der Batterie (36 V), so erhält man einen Energieverbrauch ab Akku von 49 und 88 Wh/km. Daß die tatsächliche Batteriespannung unter Belastung schwankt und nicht exakt die Nennspannung darstellt, wird hierbei vernachlässigt.

Minimal gemessener Verbrauch

Strecke AB: 6,3 Ah \Rightarrow 4,4 kWh/km

Strecke BA: 10,3 Ah \Rightarrow 7,1 kWh/km

Maximal gemessener Verbrauch

Strecke AB: 7,3 Ah \Rightarrow 5,1 kWh/km

Strecke BA: 13,8 Ah \Rightarrow 9,5 kWh/km

Ergebnis:

Strecke:	AB ³⁰	BA ³¹
gemessen	4,4 - 5,1 kWh/100 km	7,1 - 9,5 kWh/100 km
berechnet	4,9 kWh/100 km	8,8 kWh/100 km

Gemessener und berechneter Verbrauch ab Akku

Um den Zyklenverbrauch ab Netz für einen bestimmten Zyklus zu messen, muß nach der Fahrt so viel Energie zugeführt werden, daß der Akku nach dem Ladevorgang genauso viel Energie gespeichert hat wie zuvor. "Obwohl Bleiakumulatoren bereits über 120 Jahre eingesetzt werden, ist es bis heute nicht gelungen, ein Meßgerät zu entwickeln, das Auskunft über die momentan im Bleiakkumulator gespeicherte Energie oder Ladung gibt. Der Grund dafür liegt darin, daß die zu einem bestimmten Zeitpunkt verfügbare Ladung bzw. Energie in einem Akkumulator von sehr vielen Parametern abhängt. Dabei sind besonders der Strom, die Temperatur des Elektrolyten und das Alter der Batterie zu nennen. Vielfach werden auch die

³⁰ Strecke Reifenberg Ebermannstadt

³¹ Strecke Ebermannstadt Reifenberg

Standzeiten nach der letzten Ladung, die letzte Ladung und vor allem die letzte Entladung als wichtige Einflußgrößen genannt"³².

Für den Zyklenverbrauch ab Netz für den Zyklus Reifenberg-Ebermannstadt-Reifenberg wurden abhängig von der Ladezeit Werte ab 1,2 kWh gemessen. Das ergibt für die teilweise recht bergige Strecke einen gemessenen Verbrauch ab Netz von 11,5 kWh/100 km. Addiert man die mit Hilfe von Solarsoft berechneten Werte für die Strecken AB und BA (Verbrauch in kWh/100 km) und teilt sie dann durch zwei und durch den entsprechenden Wirkungsgrad, so kommt man ebenfalls auf einen Wert von 11,5 kWh/100 km.

4. Energiesparwettfahrten

Immer stärkerer Beliebtheit erfreuen sich sogenannte Energiesparwettfahrten, Touren und Wettbewerbe aller Art für Elektroautos und Solarmobile.

4.1 Der Wertungsfaktor

Bei Energiesparwettfahrten nach dem Reglement des Bundesverbandes Solarmobil wurde 1993 der sogenannte Wertungsfaktor bei der Bewertung des Energieverbrauchs von Elektromobilen verwendet.

$$\text{Wertungsfaktor} = 0,8 + 0,2 \cdot \left(\frac{\text{Zuladung}}{75} \right) + 0,2 \cdot \left(\frac{\text{nicht genutzte Nutzlast}}{150} \right)$$

$$\text{Zuladung (kg)} = \text{Startgewicht (kg)} - \text{Leergewicht (kg)}$$

$$\text{Nicht genutzte Nutzlast} = \text{zulässiges Gesamtgewicht} - \text{Startgewicht}$$

Der gewertete Energieverbrauch, den der Veranstalter mit einem weiteren Faktor in Punkte umrechnen sollte, könnte nach folgender Formel berechnet werden:

$$\text{gewerteter Energieverbrauch} = \frac{(\text{Batteriekapazität} + \text{Netzenergieverbrauch}) \cdot 100}{\text{gefahrte km} \cdot \text{Wertungsfaktor}}$$

⇒ Je größer der Wertungsfaktor desto niedriger der gewertete Energieverbrauch bei sonst gleichen Bedingungen.

⇒ Je niedriger der tatsächliche Netzenergieverbrauch desto niedriger der gewertete Energieverbrauch bei sonst gleichen Bedingungen.

Anmerkung:

Eine Änderung der Batteriekapazität beeinflusst den Netzenergieverbrauch, so daß hier kein "Tricksen" sinnvoll wäre, außer die Fahrzeugmasse wird z.B. durch leichtere oder weniger Batterien erheblich kleiner.

³² Wille, S. 57

Hinweis: Bei einer Optimierung des Fahrzeugs hinsichtlich des Energieverbrauchs, sollten die gewünschten Fahrleistungen nicht vergessen werden.

Der Wertungsfaktor kann auch in anderer Form geschrieben werden.³³

$$\text{Wertungsfaktor} = \frac{1}{750} \cdot (\text{Max. Zuladung} + \text{Zuladung} + 600)$$

$$\text{Max. Zuladung} = \text{Zulässiges Gesamtgewicht} - \text{Leergewicht}$$

Die maximale Zuladung ist durch die Fahrzeugkonstruktion bedingt. Bei Transportern z.B. ist sie besonders groß, so daß auch der Wertungsfaktor groß wird.

⇒ Der Mehrverbrauch von Transportern und ähnlich großen und schweren Fahrzeugen wird durch den Wertungsfaktor etwas ausgeglichen.

Durch einen oder mehrere Beifahrer wird der Netzenergieverbrauch erhöht (höheres Startgewicht). Dadurch wird der gewertete Energieverbrauch erhöht. Da jedoch auch die Zuladung steigt, wird der Wertungsfaktor größer, was sich wiederum günstig auf den gewerteten Energieverbrauch auswirkt.

Ob und wieviele Beifahrer den gewerteten Energieverbrauch verkleinern, hängt also einerseits vom höheren Verbrauch und andererseits vom Wertungsfaktor ab. In Solarsoft kann man bequem das Startgewicht eines Fahrzeugs verändern, und die Auswirkungen auf den Energieverbrauch abschätzen.

4.2 Einfluß der Fahrweise

Auf Veranstaltungen, bei denen besonders auf einen niedrigen Energiebedarf geachtet wird, aber auch im Alltagsbetrieb, kann man die Erfahrung machen, daß eine vorsichtige Fahrweise, insbesondere das Bestreben, konstant eine bestimmte Geschwindigkeit einzuhalten, erfolgversprechend ist.

Rechnerisches Beispiel:

Man gehe von den für den Mini-El ermittelten Meßwerten aus, und untersuche hypothetisch den Energiebedarf ab Akku für eine bestimmte Strecke einmal bei konstanter Geschwindigkeit und einmal für ständiges Beschleunigen und Abbremsen auf dieselbe Geschwindigkeit.

Mit konstanter Geschwindigkeit von 50 km/h wird mit dem Mini-El eine Strecke von 905 Meter zurückgelegt. Ausgehend von den Messungen BA³⁴ beträgt der Verbrauch ab Akku:

$$0,92 \frac{\text{Ah}}{\text{km}} \cdot 0,905 \text{ km} = 0,86 \text{ Ah}$$

³³ siehe Anhang

³⁴ Rüssenbach Reifenberg

Jetzt wird mit dem Mini-El dieselbe Strecke von 905 Meter unter ständigem Beschleunigen von 0 auf 50 km/h und anschließendem Abbremsen auf 0 zurückgelegt:

Für die als konstant angenommene Beschleunigung von 0 auf 50 km/h werden 0,7 Ah und 25 Sekunden zugrunde gelegt. Daraus läßt sich folgende Beschleunigung errechnen:

$$a_1 = \frac{v_1 - v_0}{t_1 - t_0} = \frac{50 \text{ km/h} - 0 \text{ km/h}}{25 \text{ s} - 0 \text{ s}} = \frac{13,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{25 \text{ s}} = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Der bei der Beschleunigung von 0 auf 50 km/h zurückgelegte Weg beträgt:

$$s_1 = \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot t_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot (25\text{s})^2 = 173,61 \text{ m}$$

Das Abbremsen von 50 km/h auf 0 erfolgt in 6 Sekunden, und sei ebenfalls konstant:

$$-a_2 = \frac{v_1 - v_0}{t_2} = \frac{50 \text{ km/h} - 0 \text{ km/h}}{6 \text{ s}} = \frac{13,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{6 \text{ s}} = 2,315 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Beim Abbremsen wird folgender Weg zurückgelegt:

$$s_2 = \frac{1}{2} \cdot a_2 \cdot t_2^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,315 \cdot (6 \text{ s})^2 = 6,94 \text{ m}$$

Geht man von 174 Meter für die Beschleunigung und 7 Meter für das Abbremsen aus, so erhält man für einmal Beschleunigen und Abbremsen 181 Meter und für fünf mal Beschleunigen und Abbremsen 905 Meter. Dabei können wir einen Verbrauch ab Akku von fünf mal 0,7 Ah, also 3,5 Ah feststellen.

$$\frac{3,5 \text{ Ah}}{0,86 \text{ Ah}} = 4,01$$

Der Quotient aus Energiebedarf ab Akku bei obiger Beschleunigung und bei konstanter Fahrt beträgt ungefähr vier. D.h. bei konstanter Fahrt mit 50 km/h kann mit dem Mini-El die vierfache Strecke zurückgelegt werden als bei einer Fahrt mit ständigem Beschleunigen und Abbremsen von 0 auf 50 km/h.

Die Abschätzung zeigt den Einfluß der Fahrweise auf den Energieverbrauch sowohl für andere Beschleunigungen als auch für andere Elektrofahrzeuge bei ähnlicher Fahrweise.

Um Auswirkungen der eigenen Fahrweise auf den Verbrauch feststellen zu können, sollten daher sehr genaue Meßinstrumente standardmäßig in alle Fahrzeuge eingebaut werden.

4.3 Steigungen und ihre Auswirkungen

Der Steigungsverlauf einer Strecke hat einen großen Einfluß auf den Energieverbrauch. So konnte am 12.9.1992 auf dem Solarmobil Cup Kassel-Berlin mit dem Mini-El, der normalerweise eine Reichweite von 30-50 km hat, unter Ausnutzung eines leichten Gefälles und mit

vorsichtiger Fahrweise (und somit langer Entladezeit bei niedrigen Strömen) eine Etappenlänge von 79,2 km absolviert werden (von Magdeburg nach Brandenburg).

Erfahrungsgemäß erhöht sich der Energieverbrauch pro Kilometer an starken Steigungen (über 10%) um das 5-10 fache (ca. 6-8 Ah/km für Mini-El am Reifenberg).

5. Primärenergiebedarf

Letztendlich entscheidend für die Frage, ob ein umweltfreundliches Fahrzeug mit niedrigem Energieverbrauch vorliegt, ist die Miteinbeziehung des Primärenergiebedarfs.

5.1 Allgemeines zum Wirkungsgefüge

Eine Hochrechnung oder ein noch so detailliertes, und meist einseitiges Modell kann keine sichere Prognose darüber abgeben, ob Elektromobile oder Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor im allgemeinen einen niedrigeren Primärenergieverbrauch aufweisen. Ein grobes, aber möglichst viele Aspekte berücksichtigendes Modell, kann bei einem derart komplexen System den Blick für die Art der Zusammenhänge öffnen und entsprechende Entscheidungen erleichtern.³⁵

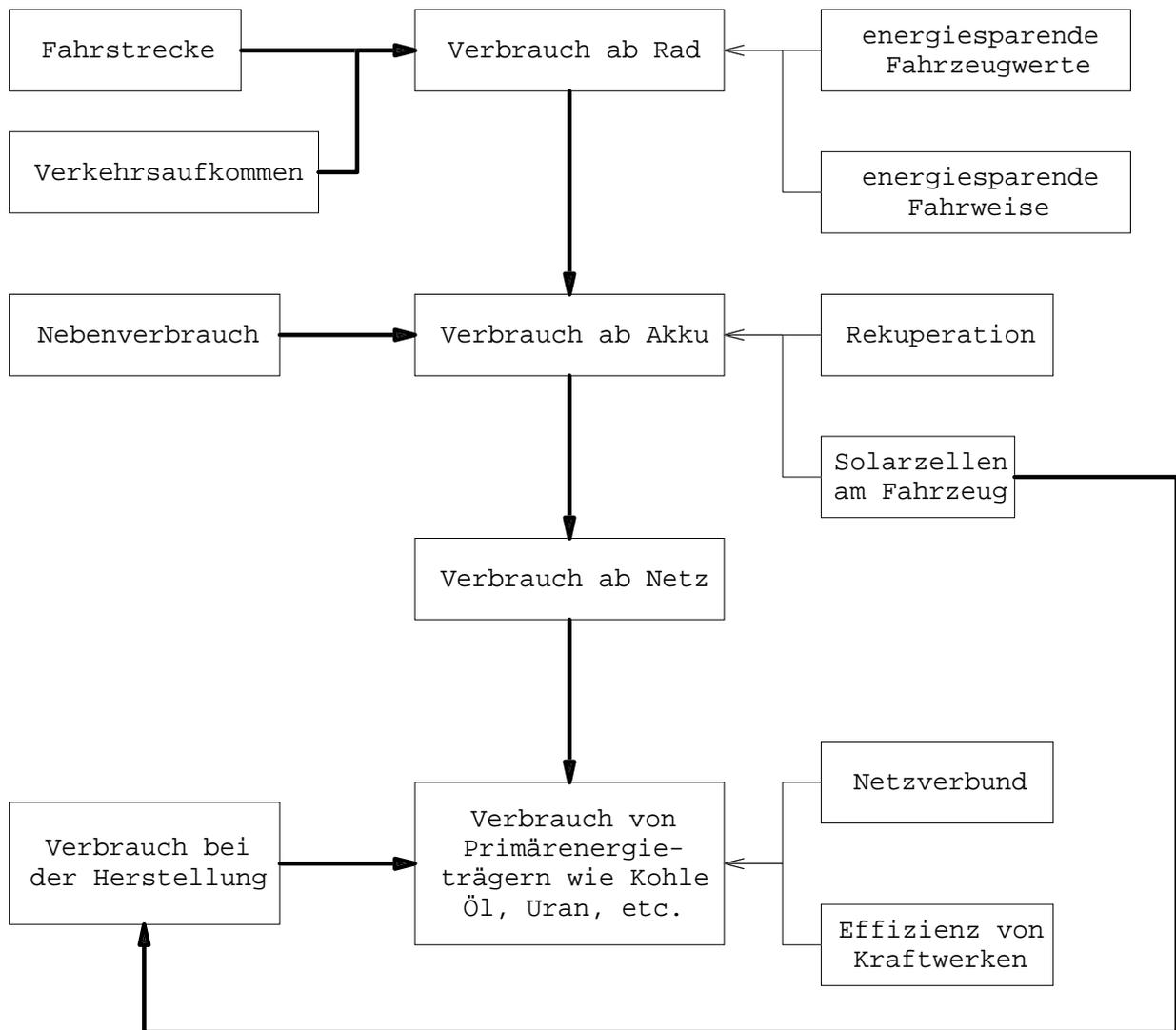
5.2 Wirkungsgefüge zum Energiebedarf von Elektromobilen

Wenn vom Primärenergieverbrauch und seiner Auswirkung auf die Umwelt gesprochen wird, kann folgende Unterscheidung der Energieträger vorgenommen werden:

Beim Primärenergieverbrauch soll für die Energieträger Kohle, Öl, Uran, etc. von einer Reduzierung der Reserven und Verschmutzung der Umwelt gesprochen werden, wogegen bei den Energieträger Sonnenlicht, Windkraft und Wasserkraft davon gesprochen wird, daß diese einer Nutzung unterliegen.

Der Verbrauch der Energieträger Kohle, Öl und Uran speziell für ein Elektromobil und seine Vernetzung wird im folgenden Wirkungsgefüge dargestellt:

³⁵ vgl. Vester, S.21 ff.



gleichgerichtet, d.h. je mehr, desto mehr



entgegengerichtet, d.h. je mehr, desto weniger

Wirkungsgefüge zum Energiebedarf von Elektromobilen

Ein umweltbewußter Mensch, der ein Elektromobil benutzt, hat zahlreiche Einflußmöglichkeiten auf den Verbrauch von Primärenergie, insbesondere auf den Verbrauch der Primärenergieträger Kohle, Öl, etc.

Den Energieverbrauch am Rad für eine bestimmte Strecke kann er reduzieren, indem er bei seiner Kaufentscheidung auf ein Fahrzeug mit energiesparenden Werten, d.h. mit niedriger Masse, niedriger Rollwiderstandszahl, niedriger Luftwiderstandszahl, kleiner Querspanfläche und auf hohe Wirkungsgrade der Komponenten achtet. Er kann, seine Fahrweise bezüglich der Geschwindigkeit und der Beschleunigung ändern und überlegen, welche Fahrstrecken überflüssig sind. Indem er verstärkt öffentliche Verkehrsmittel nutzt, senkt er das

Verkehrsaufkommen auf den Straßen. Zur Reduzierung des Energiebedarfs ab Akku tragen Nutzbremmung und Solarzellen auf dem Dach des Fahrzeugs bei.

Eine wichtige Möglichkeit, den Verbrauch von Kohle, Öl und Uran erheblich zu verringern, ist die Netzeinspeisung von solar oder anderweitig regenerativ erzeugtem Strom. Beim sogenannten Netzverbund von Solarmobilen wird zusätzlich darauf geachtet, daß mindestens die im Jahresmittel vom Fahrzeug bezogene Strommenge solar erzeugt wurde.

Grundsätzliche Vorteile des Elektromobils gegenüber dem Auto mit Verbrennungsmotor beim Primärenergiebedarf sind die größere Unabhängigkeit von Primärenergieträgern, da Strom aus zahlreichen Energieträgern gewonnen werden kann, die Rekuperationsmöglichkeit, die Möglichkeit von Solarzellen am Fahrzeug, und insbesondere der Netzverbund.

Daher ist folgendes vertretbar:

Wenn Elektromobile all ihre Möglichkeiten zur Reduzierung des Verbrauches nutzen, verbrauchen sie grundsätzlich weniger umweltbelastende Primärenergieträger als Autos, die mit Diesel oder Benzinkraftstoff angetrieben werden. Werden ausschließlich Primärenergieträger wie Sonne, Wind oder Wasser genutzt, so ist das Elektromobil besonders umweltfreundlich.

Anhang

1. Glossar

Die **Arbeit am Rad** ist die Arbeit, die am Rad benötigt wird, um den Gesamtwiderstand zu überwinden. Ein direkter Zusammenhang zu den Fahrwiderständen und ihren Einflußgrößen (Fahrzeugmasse, cw-Wert, Querspanntfläche, Rollwiderstand etc.) besteht. Üblicherweise wird dieser Wert rechnerisch ermittelt.

Batterieüberwachungs-System DCC 4000 (der Firma Magnetronic): Die Bezeichnung steht für ein Meßgerät zur Überwachung der Batterie. Gemessen werden kann die an der Batterie anliegende Spannung, der aus und in die Batterie fließende Strom und die Amperestunden. Schaltbild siehe nächste Seite.

Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge können sein: Elektromobile, Solarmobile, Elektroleichtfahrzeuge, elektrisch betriebene Leichtmofas/ Mofas; kurz alle Fahrzeuge, die durch einen Elektromotor angetrieben werden und sich überwiegend auf Straßen fortbewegen.

Der **Energiebedarf ab Akku** ist die Energie, die ab Batterie benötigt wird, um die gewünschten Fahrleistungen zu erzielen. Üblicherweise wird dieser Wert gemessen. Mit Geräten kann man direkt die Amperestunden (Ah), die vom Akkumulator abgegeben werden, messen.

Der **Energiebedarf ab Netz** ist die Energie, die vom Stromnetz zugeführt wird, um die gewünschten Fahrleistungen zu erzielen. Dieser Wert wird mit handelsüblichen und preisgünstigen Zwischenzählern gemessen.

Energieverbrauch im Stand: Während der Standzeit eines Elektrofahrzeugs entladen sich die Batterien und bei bestimmten Fahrzeugen kann ein zusätzlicher Stromverbrauch für die Elektronik etc. anfallen. Beim Mini El wurden z.B. 0,15-0,18 A bzw. bei umgedrehten Zündschlüssel 0,46-0,47 A gemessen.

Die Rückgewinnung von kinetischer Energie in speicherbare Energie durch generatorisches Bremsen wird **Rekuperation**, Nutzbremmung oder Rückspeisung genannt. Die Rekuperation ist bei den meisten Elektromotoren möglich, da sie auch als Generatoren wirken können, aber in der Praxis nicht immer verwirklicht.

Primärenergie ist die Energie, die in den von der Natur in ursprünglicher Form angebotenen Energieträgern wie Steinkohle, Rohöl, Erdgas, Uran, Erdwärme, Sonnenkraft und Wasserkraft steckt.

Ein **Solarmobil** ist ein Elektromobil, dessen gesamte verbrauchte Energiemenge im Jahresmittel durch Solarzellen produziert wird.

2. Mathematische Herleitungen

$$\begin{aligned}
 W_{rad} &= \int_{s_1}^{s_2} \overset{p}{F}_{ges}(s) \circ ds = \int_{s_1}^{s_2} (k_R \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \sin \alpha + c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot v^2 + m \cdot a) \cdot ds = \\
 &= \int_{s_1}^{s_2} k_R \cdot m \cdot g \cdot ds + \int_{s_1}^{s_2} m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot ds + \int_{s_1}^{s_2} c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot v^2 \cdot ds + \int_{s_1}^{s_2} m \cdot a \cdot ds = \\
 &= k_R \cdot m \cdot g \cdot \int_{s_1}^{s_2} ds + m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \int_{s_1}^{s_2} ds + c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot \int_{s_1}^{s_2} v^2 \cdot ds + m \cdot a \cdot \int_{s_1}^{s_2} ds = \\
 &= k_R \cdot m \cdot g \cdot [s]_{s_1}^{s_2} + m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot [s]_{s_1}^{s_2} + c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot \int_{s_1}^{s_2} (2 \cdot a \cdot s + v_1^2) \cdot ds + m \cdot a \cdot [s]_{s_1}^{s_2} = \\
 &= k_R \cdot m \cdot g \cdot (s_2 - s_1) + m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot (s_2 - s_1) + c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot \left(\int_{s_1}^{s_2} 2 \cdot a \cdot s \cdot ds + \int_{s_1}^{s_2} v_1^2 \cdot ds \right) + m \cdot a \cdot (s_2 - s_1) = \\
 &= k_R \cdot m \cdot g \cdot (s_2 - s_1) + m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot (s_2 - s_1) + c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot \left(2 \cdot a \cdot \left[\frac{s^2}{2} \right]_{s_1}^{s_2} + v_1^2 \cdot [s]_{s_1}^{s_2} \right) + m \cdot a \cdot (s_2 - s_1) = \\
 &= k_R \cdot m \cdot g \cdot (s_2 - s_1) + m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot (s_2 - s_1) + c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot (a \cdot (s_2^2 - s_1^2) + v_1^2 \cdot (s_2 - s_1)) + m \cdot a \cdot (s_2 - s_1) \\
 &= (k_R \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \sin \alpha + c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot (a \cdot (s_2 + s_1) + v_1^2) + m \cdot a) \cdot (s_2 - s_1) = \\
 &= (F_R + F_{St} + F_{L_{v_1}} + F_{L_a} + F_a) \cdot (s_2 - s_1) \tag{Gl. 24}
 \end{aligned}$$

$$F_{L_{v_1}} = c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot v_1^2 \tag{Gl. 25}$$

$$F_{L_a} = c_w \cdot A \cdot \frac{\zeta}{2} \cdot a \cdot (s_2 + s_1) \tag{Gl. 26}$$

Für $a=0$ entspricht die Gleichung für konstante Beschleunigung erwartungsgemäß der Gleichung für konstante Geschwindigkeit.

$$\begin{aligned}
 \text{Wertungsfaktor} &= 0,8 + 0,2 \cdot \left(\frac{\text{Zuladung}}{75} \right) + 0,2 \cdot \left(\frac{\text{nicht genutzte Nutzlast}}{150} \right) \\
 &= \frac{8}{10} + \frac{0,2 \cdot Z}{75} + \frac{0,1 \cdot \text{ngN}}{75} = \frac{600}{750} + \frac{2 \cdot Z}{750} + \frac{\text{ngN}}{750} = \frac{1}{750} \cdot (2 \cdot Z + \text{ngZ} + 600) \\
 &= \frac{1}{750} \cdot (2Z + zGG - SG + 600) = \frac{1}{750} (2Z + zGG - Z - LG - +600) \\
 &= \frac{1}{750} (Z + Z_{\max} + 600)
 \end{aligned}$$

3. Meßergebnisse

Reifenberg-Rüssenbach (B 470)

Fahrgeschwindigkeit in km/h	20	30	40	50
gemessene Ah	1,6	1,7	1,4	1,6
gemessene Zeit in min/s	4 min 56s	3 min 18s	2 min 10s	1 min 34
gefahrene Strecke in km	1,644	1,650	1,444	1,306
Ah/km	0,97	1,03	0,97	1,23

Fahrgeschwindigkeit in km/h	20	30	40	50
gemessene Ah	1,7	1,6	1,5	1,6
gemessene Zeit in min/s	5 min 11s	3 min 10s	2 min 15s	1 min 35
gefahrene Strecke in km	1,728	1,583	1,500	1,347
Ah/km	0,98	0,99	1,00	1,21

Rüssenbach-Reifenberg (B 470)

Fahrgeschwindigkeit in km/h	20	30	40	50
gemessene Ah	1,2	1,1	1,2	1,1
gemessene Zeit in min/s	5 min 9s	3 min 6s	2 min 6s	1 min 37s
gefahrene Strecke in km	1,717	1,550	1,400	1,347
Ah/km	0,70	0,71	0,86	0,82

Fahrgeschwindigkeit in km/h	20	30	40	50
gemessene Ah	1,1	1,2	1,0	1,2
gemessene Zeit in min/s	5 min 12s	3 min 12s	1 min 57s	1 min 34s
gefahrene Strecke in km	1,733	1,600	1,300	1,306
Ah/km	0,63	0,75	0,77	0,92

Beschleunigung von 0 km/h auf ...

Endgeschwindigkeit in km/h	10	20	30	40	50
gemessene Ah	0,1	0,2	0,2	0,4	0,7
gemessene Zeit in Sekunden	3,9	6,0	8,6	14,4	27,4

Endgeschwindigkeit in km/h	10	20	30	40	50
gemessene Ah	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
gemessene Zeit in Sekunden	3,9	6,0	8,4	16,6	25,0

Endgeschwindigkeit in km/h	10	20	30	40	50
gemessene Ah	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6
gemessene Zeit in Sekunden	3,9	6,0	8,4	14,2	25,8

Endgeschwindigkeit in km/h	10	20	30	40	50
gemessene Ah	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
gemessene Zeit in Sekunden	3,6	5,8	9,0	17,0	26,0

Endgeschwindigkeit in km/h	10	20	30	40	50
gemessene Ah	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6
gemessene Zeit in Sekunden	3,6	6,0	8,8	16,2	23,4

Endgeschwindigkeit in km/h	10	20	30	40	50
gemessene Ah	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
gemessene Zeit in Sekunden	3,4	5,4	8,8	17,0	25,0

Endgeschwindigkeit in km/h	10	20	30	40	50
gemessene Ah	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6
gemessene Zeit in Sekunden	3,6	5,8	8,8	15,0	27,2

Verbrauch Reifenberg/Garage – Ebermannstadt/Parkplatz GFS und umgekehrt

Datum	Fahrt von nach	gefahren km	gemessener Ah Verbrauch	Ah pro km
4.11	Reif-Ebs	5,2	6,5	1,25
	Ebs-Reif	5,2	11,2	2,15
5.11	Reif-Ebs-Reif	10,4	17,5	1,68
6.11	Reif-Ebs	5,2	6,3	1,21
9.11	Reif-Ebs	5,2	6,7	1,28
	Ebs-Reif	5,2	10,3	1,98
10.11	Reif-Ebs	5,2	6,3	1,21
	Ebs-Reif	5,2	10,8	2,08
12.11	Reif-Ebs	5,2	6,7	1,28
	Ebs-Reif	5,2	10,3	1,98
13.11	Reif-Ebs	5,2	6,4	1,23
16.11	Reif-Ebs	5,2	6,6	1,27
	Ebs-Reif	5,2	10,5	2,02
17.11	Reif-Ebs	5,2	6,6	1,27
	Ebs-Reif	5,2	10,8	2,08
19.11	Reif-Ebs	5,2	7,0	1,35
	Ebs-Reif	5,2	10,8	2,08
20.11	Reif-Ebs	5,2	6,3	1,21
23.11	Reif-Ebs	5,2	6,7	1,29
	Ebs-Reif	5,2	10,8	2,08
26.11	Reif-Ebs	5,2	6,5	1,25
	Ebs-Reif	5,2	10,4	2,00
27.11	Reif-Ebs	5,2	6,9	1,33
	Ebs-Reif	5,2	10,9	2,10
30.11	Reif-Ebs	5,2	6,7	1,29
	Ebs-Reif	5,2	10,0	1,92
1.12	Reif-Ebs	5,2	7,2	1,38
	Ebs-Reif	5,2	10,9	2,10
2.12	Reif-Ebs	5,2	6,8	1,31
	Ebs-Reif	5,2	10,8	2,08
3.12	Reif-Ebs	5,2	6,5	1,25
	Ebs-Reif	5,2	10,6	2,04
4.12	Reif-Ebs	5,2	6,7	1,29
8.12	Reif-Ebs	5,2	7,3	1,40
	Ebs-Reif	5,2	9,3	1,79
9.12	Reif-Ebs	5,2	6,7	1,29
	Ebs-Reif	5,2	11,2	2,15
10.12	Reif-Ebs	5,2	6,8	1,31
	Ebs-Reif	5,2	12,0	2,31
11.12	Reif-Ebs	5,2	7,1	1,37
	Ebs-Reif	5,2	11	2,12
14.12	Reif-Ebs	5,2	6,5	1,25
	Ebs-Reif	5,2	10,9	2,10
16.12	Reif-Ebs	5,2	6,5	1,25
	Ebs-Reif	5,2	10,7	2,06
17.12	Reif-Ebs	5,2	6,6	1,27
	Ebs-Reif	5,2	13,8	2,65

