

Physikalische Analyse der Dimensionierungsgrundlagen zur Entwicklung einer Methode zur Konzipierung und Optimierung eines Elektromobils

Autoren: K. Brinkmann , W. Köhler



Lehrgebiet Elektrische Energietechnik

Feithstraße 140, Philipp-Reis-Gebäude, D-58084 Hagen, fax: +49/2331/987 357,

e-mail: klaus.brinkmann@fernuni-hagen.de

Rückfragen bitte an: Dipl.-Phys. Klaus Brinkmann, Adresse: siehe oben

Kurzfassung:

In nunmehr fast acht Jahren hat das Lehrgebiet *Elektrische Energietechnik* der FernUniversität Hagen in Kooperation mit der Fa. *WISOWA* eine Vielzahl von praktischen Erfahrungen mit dem Bau von Solarmobilen sammeln können. Etliche Erfolge bei Wettkämpfen wie z.B. der *Tour de Ruhr*, gekrönt durch den Sieg bei der Internationalen Deutschen Solarmobilmeisterschaft 1996 Prototypen, kennzeichnen diese Phase.

Somit sind vielfältige umfassende Erfahrungen sowohl bei der mechanischen Konstruktion als auch bei der Antriebstechnik und dem Energiemanagement gesammelt worden. Um die praktischen Realisierungen auch bewerten zu können, ist ein Meßwerterfassungs- und Auswerteprogramm für ein Laptop entwickelt worden, das während der Fahrt über eine A/D-Wandler-Schnittstelle mit Informationen versorgt werden kann.

Ziel dieser Arbeit ist es nun, die gesammelten Erfahrungen, Fakten und Ergebnisse nutzend, eine physikalische Analyse bezüglich der Dimensionierungsparameter für ein Elektro/Solar-Mobil vorzunehmen, um damit eine Methode zu entwickeln, die eine *gezielte Auslegung und Optimierung* eines solchen Fahrzeugs ermöglicht.

Dies schließt sowohl eine Strecken-Klassifizierung als auch die Fahrzeug-Daten, ebenso wie dessen Verknüpfung ein.

Einleitung:

Um ein Elektro- bzw. Solarmobil zu konstruieren, sind etliche Anforderungen und individuelle Wünsche zu berücksichtigen, die zum Teil gegenläufige Auswirkungen zeigen.

Grundlegend ist zunächst der vorgesehene Einsatzort und die damit verbundene Streckenbeschaffenheit, die in der Regel grob einer der drei Kategorien Flachland, Hügellandschaft und Gebirge zugeordnet werden kann. Eng damit verbunden ist die gewünschte Reichweite. Weiterhin ist die Brems- und Anfahrhäufigkeit, sowie die Kurvenverteilung von Bedeutung.

Zu diesen vorwiegend geländeabhängigen Faktoren sind gewünschte Fahrzeugdaten zu berücksichtigen wie etwa die Höchstgeschwindigkeit, Durchschnittsgeschwindigkeit, Beschleunigungsvermögen, Reichweite, maximale Anzahl der Insassen und maximale Zuladung.

Diese Zusammenstellung stellt einen Satz von Rand- und Nebenbedingungen dar, die bei der mathematischen Formulierung der allgemeinen physikalischen Gesetzmäßigkeiten eine spezielle optimierende Auswahl der Auslegungsparameter mittels numerischer Methoden erlauben sollen.

Dimensionierungskonzept:

Im folgenden werden die wichtigsten physikalischen Gesetzmäßigkeiten aufgezeigt und der mathematische Weg zur Herleitung konkreter Auslegungskriterien für ein Elektro- bzw. Solarmobils *skizziert*.

Betrachten wir zunächst eine beliebige repräsentativ gewählte Streckenführung entsprechend der o.g. Kategorien als Testfunktion der Form

$$\underline{r} = f(x, y, h) \quad \text{mit} \quad x = x(t) \quad , \quad y = y(t) \quad , \quad h = h(t) \equiv \text{Höhe} \quad , \quad t \equiv \text{Zeit} \quad (1)$$

oder / bzw

$$\underline{r} = \bigcup_i f_i(x_i, y_i, h_i) \quad \text{als Kombination von Teilstrecken.}$$

Im Hinblick auf einen Zugang im Einklang mit den praktikablen Meßgrößen ist es jedoch vorteilhafter statt der kartesischen Darstellung eine Parametrisierung über die gefahrene Strecke s vorzunehmen.

$$\underline{r} = f(x, y, h) \quad \text{mit} \quad x = x(s) \quad , \quad y = y(s) \quad , \quad h = h(s) \equiv \text{Höhe} \quad ,$$

$$s \equiv \text{Strecke} \quad \text{mit} \quad s = s(t) \tag{2}$$

Weiterhin soll eine Koordinatentransformation auf ein begleitendes Dreibein, wie sie uns die Differentialgeometrie zur Verfügung stellt, vorgenommen werden. Damit erhalten wir die Fresnet'schen Formeln:

$$\frac{d}{ds} \begin{pmatrix} \underline{e}_t \\ \underline{e}_n \\ \underline{e}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{k} & 0 \\ -\mathbf{k} & 0 & \mathbf{t} \\ 0 & -\mathbf{t} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{e}_t \\ \underline{e}_n \\ \underline{e}_b \end{pmatrix}, \quad \boxed{\begin{matrix} \underline{v} = v \cdot \underline{e}_t \\ \underline{b} = \dot{\underline{v}} = \dot{v} \cdot \underline{e}_t + \frac{v^2}{\mathbf{r}} \cdot \underline{e}_n \end{matrix}}, \quad v = \frac{ds}{dt} = \dot{s} \tag{3}$$

Dies bewirkt eine Zerlegung in Tangential- und Normalkomponenten $(\underline{e}_t, \underline{e}_n)$, d.h. längs und quer zur Fahrbahn, mit Hilfe rein geometrischer Parameter wie der Krümmung $\mathbf{k} = 1/\mathbf{r}$ und der Torsion \mathbf{t} .

Die Tangentialbeschleunigung $\dot{v} \cdot \underline{e}_t$ stellt die von dem Fahrzeugantrieb aufzubringende Beschleunigung dar, während die Normalbeschleunigung $\mathbf{k} \cdot v^2 \cdot \underline{e}_n$ die Zentripetalbeschleunigung liefert und somit für die Zentrifugalkraft verantwortlich ist. Mit Rücksicht auf die Haftreibung des Fahrzeugs ergibt sich damit für jede Kurve eine maximal mögliche Geschwindigkeit. Ein Vergleich mit der gewünschten Reisegeschwindigkeit liefert dann wiederum Aussagen für die Anfahr- und Bremsstatistik.

Die sich aus der Streckenführung ergebenden Anforderungen sind nun mit den Fahrzeugdaten und Gesetzmäßigkeiten in Einklang zu bringen. Aufgrund der Fülle an Fakten und deren Verknüpfungskomplexität seien hier zunächst nur die wesentlichen Faktoren aufgeführt.

Individuelle "Wunschliste"
- Reichweite [km]
- Höchstgeschwindigkeit [km/h]
- mittlere Reisegeschwindigkeit [km/h]
- maximale Zahl der Insassen
- maximale Zuladungsmasse [kg]

Die Komplexität der Zusammenhänge bezüglich der Auslegungsparameter läßt sich besonders deutlich bei der Frage nach der erforderlichen Fahrzeugmasse m zeigen. Dies kann man der folgenden Zusammenstellung entnehmen.

Bild 1 : Individuelle Eckdaten

Es gilt im wesentlichen:

$$m = m_{Karosserie} + m_{Antrieb} + m_{Batterie}$$

$$m_{Karosserie} = f(m, \text{max. Zuladung})$$

$$m_{Antrieb} = f(m, \text{max. Zuladung}, F_{Beschl}, v_{mittel}, v_{max})$$

$$m_{Batterie} = f(m, \text{max. Zuladung}, \text{Reichweite}, \text{Leistung})$$

Bild 2 : Fahrzeugmasse

Die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge können der folgenden Übersicht entnommen werden:

$M = F \cdot R_{dyn}$	Drehmoment	R_{dyn} dynamischer Radradius
$F_W = F_{Ro} + F_L + F_{St}$	Fahrwiderstand	$F_{Antrieb} = F_{Mot} \cdot h \cdot \ddot{u} = \frac{M_{Mot} \cdot \ddot{u} \cdot h}{R_{dyn}}$
$F_{Ro} = f_R \cdot m \cdot g$	Rollreibung	$F_{Beschl} = F_{Antrieb} - F_W = (m + m_{zus}) \cdot \dot{v}$
$F_L = 0,5 \cdot r_L \cdot C_W \cdot A \cdot v^2$	Luftwiderstand	$m_{zus} = (\Theta_{Kup} + \Theta_{Mot}) \cdot \frac{\ddot{u}^2}{R_{dyn}^2} + \Theta_{Rad} \cdot \frac{1}{R_{dyn}^2}$
$F_{St} = m \cdot g \cdot \sin a$	Steigungskraft	$F_{Antrieb} = F_W$ Gleichgewicht
<i>Anfahrt:</i>		
$F_{Ant, Anf} = \frac{M_{Mot, Anf} \cdot \ddot{u} \cdot h}{R_{dyn}} = (m + m_{zus}) \cdot \dot{v} + F_{Ro} + F_{St}$		
<i>Beschleunigung auf Steigung:</i>		
$F_{Antrieb} = \frac{M_{Mot} \cdot \ddot{u} \cdot h}{R_{dyn}} = (m + m_{zus}) \cdot \dot{v} + F_{Ro} + F_L + F_{St}$		
\ddot{u}	Übersetzung	h Wirkungsgrad, Θ Trägheitsmoment

Bild 3 : Fahrzeug-Längsdynamik

Für die momentane Fahrtleistung gilt: $P = F_{Antrieb} \cdot v$ (4)

Integriert man die Leistung über die gesamte Reichweite entsprechend der repräsentativen Streckenführung auf, so erhält man die erforderliche *Energiemenge* sowie Aufschluß über die benötigte *Batteriekapazität*.

Zur Dimensionierung des Antriebs ist eine numerische Darstellung der Drehzahl-Drehmoment-Kurve des Elektromotors mit einzubeziehen.

Sämtliche Einflußgrößen sind über deren spezifische Kenngrößen (z.B. kWh/kg u.ä.) numerisch zu approximieren. Somit ergibt sich ein zusammen mit den Rand- und Nebenbedingungen aus den individuellen Wünschen und Streckenparametern ein Satz von Bestimmungsgleichungen. Diese ermöglichen eine Optimierung mit Hilfe numerischer Algorithmen wie z.B. dem Simplex-Verfahren.

Ausblick:

Im Folge der weitergehenden Systematisierung der Auslegungspparameter-Einflußgrößen soll ein möglichst effizientes Entwicklungs-PC-Programm erstellt werden, das die Auslegung eines Elektromobils erleichtert und die getroffenen Entscheidungen auf eine Optimierungsbasis stellt, die letztlich zu einer Energieminimierung im Rahmen der Mobilitätswünsche bzw. Erfordernisse führt. Natürlich sollten die damit gewonnen Erkenntnisse in einem 'Bordcomputer' nutzbar gemacht werden, um die gewonnene Optimierung nicht durch eine unvernünftige Fahrweise wieder zunichte zu machen. Die in diesem Zusammenhang erwünschte Nutzung solarer Energie ist bei der FernUniversität Hagen durch die Errichtung einer Solartankstelle realisiert worden, welche mit der hauseigenen 4,8 kWp-Photovoltaikanlage verknüpft ist. Desweiteren wird das Verfahren anhand der selbst gebauten Solarmobile verdeutlicht und im praktischen Vergleich diskutiert.

Zusammenfassung:

Es wird ein Konzept zur physikalisch-mathematischen Analyse der Dimensionierungsgrundlagen zur Auslegung eines Elektromobils vorgestellt. Dabei werden sowohl die zu erwartenden Streckenparameter als auch die Längsdynamik eines Fahrzeugs und deren Verknüpfungsaspekte berücksichtigt. Hierbei werden weitestgehend die an der FernUniversität gesammelten praktischen Erfahrungen bei der Eigenkonstruktion von Solarmobilen genutzt.