

## **Ansätze einer Methode zur Konzipierung und Optimierung eines Elektromobils im Hinblick auf einen minimierten Energieverbrauch**

Dipl.-Phys. Dr.-Ing. Klaus Brinkmann , Wolfgang Köhler



Lehrgebiet Elektrische Energietechnik

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

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

### **Einleitung:**

Unsere heutige Energieversorgung basiert überwiegend auf fossilen Energieträgern. Diese sind gespeicherte Biomasse, welche vor Jahrmillionen durch die Umwandlung von Sonnenenergie in chemische Energie entstanden sind. Die Vorräte dieser Energieträger sind begrenzt, da es keine natürlichen Vorgänge gibt, die diese auch nur annähernd im zeitlichen Rahmen ihres Verbrauchs wieder erzeugen könnten. Sparmaßnahmen sind deshalb unerlässlich, können aber allein den Zeitpunkt bis zur Erschöpfung lediglich hinauszögern. Aktuelle Schätzungen zeigen, daß die Reichweiten der fossilen Energieressourcen etwa ein bis zwei Menschenleben betragen. Diese Erkenntnis zwingt uns, unsere Energieversorgung und den Umgang mit der Energie nachhaltig umzugestalten.

Einen weiteren nicht minder wichtigen Grund zu handeln liefert der Treibhauseffekt, deren negative Auswirkungen die Einhaltung eines ausbalancierten CO<sub>2</sub>-Kreislaufs einfordern. Diesen Erkenntnissen kann und darf sich die zukünftige Gestaltung unseres Verkehrssystems nicht entziehen. Aus diesem Grund ist es unausweichlich, einen minimierten Energieverbrauch als ein dominierendes Qualitätsmerkmal für die Konzipierung eines Elektromobils zu betrachten.

Aufbauend auf den Beitrag der o.g. Autoren zum letzten Forum mit dem Titel "*Physikalische Analyse der Dimensionierungsgrundlagen zur Entwicklung einer Methode zur Konzipierung und Optimierung eines Elektromobils*" /1/, werden nun wie angekündigt erste Ansätze dazu vorgestellt.

Dabei werden die praktischen Erfahrungen des Lehrgebiets für Elektrische Energietechnik der FernUniversität in Hagen und der Fa. WISOWA, die sowohl auf der Tour de Ruhr als auch beim Eigenbau von Elektromobilen gemachten Erfahrungen mit Hilfe von theoretischen Ansätzen aufgearbeitet.

Es soll ein Weg aufgezeigt werden, der eine Ableitung von Kriterien zur Optimierung und Konzipierung von Elektromobilen erlaubt.

Ziel der präsentierten Ansätze ist es, Auslegungskriterien zu gewinnen die den Bau eines optimierten Elektromobils ermöglichen. Den ausschlaggebenden Optimierungsparameter stellt dabei der Energieverbrauch dar. Dabei sollen sowohl die individuellen Wünsche wie etwa Höchstgeschwindigkeit, Durchschnittsgeschwindigkeit, Beschleunigungsvermögen, Reichweite usw., als auch die mittlere Beschaffenheit der voraussichtlichen Einsatzgebiete Berücksichtigung finden.

### **Streckenklassifizierung:**

Unabhängig von den individuellen Wünschen der Menschen an ein Fahrzeug, stellt die routinemäßig zu bewältigende Strecke eine der Hauptkriterien zur Auslegung dar. Eine sinnvolle Grobklassifizierung der Streckenführung sei die folgende /1/:

i)	Flachland
ii)	Mittelgebirge
iii)	Gebirge

Tabelle 1: Strecken-Grobklassifizierung

Die Berücksichtigung der Streckenführung ist insbesondere aufgrund der in der Regel beschränkten Reichweiten der Elektromobile bedeutend. Dieser Umstand wird im wesentlichen durch die Art der Speicherung der benötigten Antriebsenergie bedingt, wie z.B. bisher meist in Form von Batterien /2/, /3/.

Vereinfachend für einen ersten Ansatz sei die Wegführung als linear (Gerade) anzusetzen, d.h. in Form eines Strecken-Höhen-Profiles. Dadurch werden die Kurveneinflüsse und die damit verbundenen Querkräfte zunächst einmal vernachlässigt. Für die Optimierung werden also nur die Gesetzmäßigkeiten für die *Fahrzeug-Längsdynamik* erforderlich /1/. Die allgemeine korrekte Form der Darstellung der Streckenführung in Abhängigkeit vom Parameter  $s$

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

reduziert sich dadurch auf die *vereinfachte Darstellung zur ersten Näherung*:

$$h = h(s) \equiv \text{Höhe}, \quad s \equiv \text{Strecke} \quad \text{mit} \quad s = s(t), \quad t \equiv \text{Zeit}. \quad (2)$$

Die folgende bildliche Darstellung soll die vorangehende Betrachtung verdeutlichen:

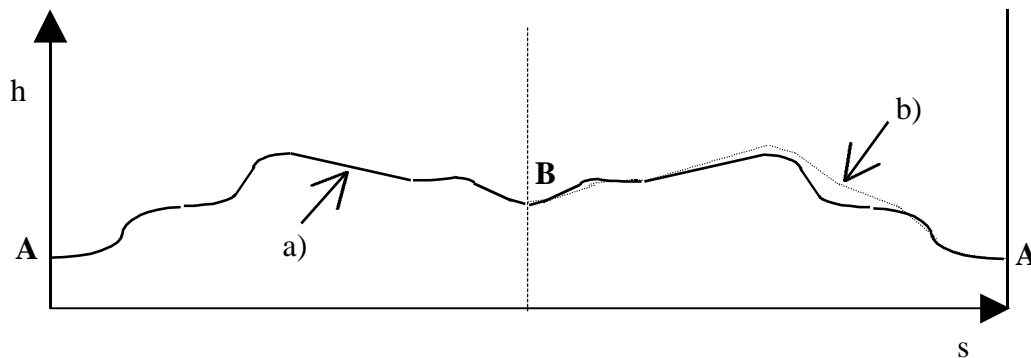


Abb. 1: Wegstreckendarstellung

Hierbei kann es sich zum Beispiel um den täglichen Weg zur Arbeit handeln. Dann entspricht A der Wohnung und B dem Arbeitsplatz. Für den Fall a) ist der Hinweg identisch mit dem Rückweg (d.h. Spiegelsymmetrie zu B), wohingegen das für b) nicht zutrifft. Der Arbeitsweg stellt eine periodisch wiederkehrende Fahrsituation und Streckenführung dar. Aufgrund dieser periodischen Eigenschaft ist es naheliegend eine *Fourierentwicklung* (harmonische Analyse) für die Funktion  $h(s)$  vorzunehmen.

Der Zusammenhang zum physikalischen Steigungswinkel  $\alpha$  lautet bei dieser Darstellungsweise:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} \quad (3)$$

Außer der reinen Streckengeometrie ist das Geschwindigkeitsprofil sowie die Anfahr- und Bremscharakteristik für den Energiebedarf von Bedeutung.

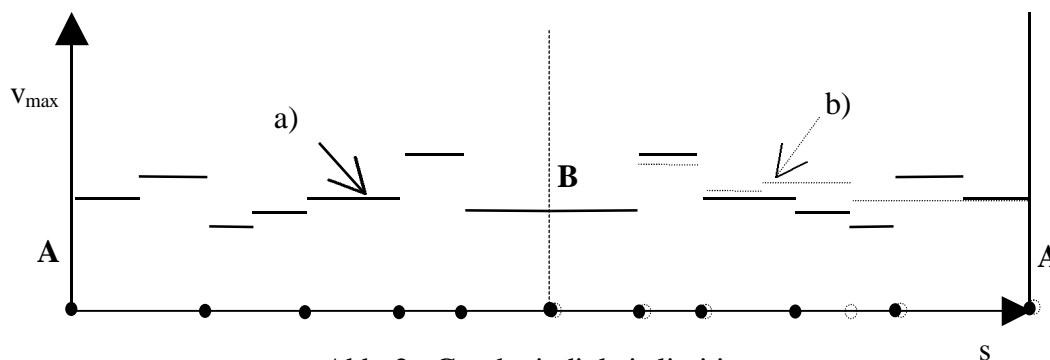


Abb. 2: Geschwindigkeitslimitierungen

Die Linien bzw. Punkte bezeichnen jeweils die maximal mögliche Geschwindigkeit, unabhängig davon ob diese durch eine Reglementierung oder durch physikalische Grenzen gegeben sind.

Für die Optimierung sei davon ausgegangen, daß der Fahrer im Rahmen der technischen Möglichkeiten versucht so rasch wie möglich die jeweiligen Geschwindigkeitsgrenzen zu erreichen. Bei den Anfahr- und Bremsvorgängen ist eine Beschleunigung zu berücksichtigen, die dem menschlichen Wohlbefinden nicht widerspricht. Die Kennzeichnungen in Abb. 2 entsprechen analog denen aus der Abb. 1.

Mit dieser Art der Streckencharakterisierung sollte es möglich sein, typische repräsentative Wegführungen zu der Einteilung nach Tabelle 1 mit Hilfe statistischer Daten herauszuarbeiten. Damit müßte grundsätzlich eine Optimierung mit Hilfe von möglicherweise nur drei stellvertretenden Test-Strecken erfolgen können. Daraus würden sich dann folgerichtig je nach gewünschter Funktionalität der Fahrzeuge (Nutzfahrzeug, Personenfahrzeuge, Bus etc.) jeweils drei optimierte Typen ergeben, die der Grobklassifizierung nach Tabelle 1 genügen.

### **Optimierungsgrundlagen:**

Da die Funktion  $h(s)$  (Abb. 1) sich in endlich viele Teilintervalle aufteilen läßt, und in jedem dieser Intervalle stetig und monoton ist, wird die Dirichletsche Bedingung erfüllt, so daß  $h(s)$  in eine Fourierreihe entwickelbar ist. Die Fourierkoeffizienten können dann eindeutig bestimmt werden. Da aber nicht zu erwarten ist, daß  $h(s)$  in analytischer Form vorliegen wird, müssen die Fourierkoeffizienten näherungsweise berechnet werden nach dem folgenden Schema:

- teile die Gesamtstrecke  $S_{\text{ges}}$  in eine hinreichend große Zahl  $2m$  gleiche Teile
- dabei ergeben sich dann die Stützstellen  $(s_0, h_0), (s_1, h_1), \dots, (s_{2m-1}, h_{2m-1})$
- berechne die Koeffizienten:

$$a_0 = \frac{1}{2m} \sum_{i=0}^{2m-1} h_i, \quad (4)$$

$$a_n = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{2m-1} h_i \cos \frac{n \cdot i}{m} \quad \text{für } n = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

$$b_n = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{2m-1} h_i \sin \frac{n \cdot i}{m} \quad \text{für } n = 1, 2, \dots, (m-1), \quad (6)$$

- damit erhält man als Näherung für die Funktion  $h(s)$  die endliche Reihenentwicklung:

$$\boxed{h(s) \cong a_0 + \sum_{n=1}^{(m-1)} (a_n \cos(n \cdot s) + b_n \sin(n \cdot s)) + a_m \cos(m \cdot s)}. \quad (7)$$

In Korrelation zur Wegstreckendarstellung  $h(s)$  ist dann das in Abb. 2 dargestellte Geschwindigkeits-Profil zu betrachten:

$$v_{\max}(s) = v_i \quad \text{für } s \in [s_i, s_{i+1}] \quad \text{und } i = 0, 1, \dots, k, \quad s_i \leq s_{i+1} \quad (8)$$

mit  $v_i \leq$  technische Höchstgeschwindigkeit des Elektromobils.

Diesen hiermit mathematisch beschreibbaren Streckenklassifizierungen müssen zur Energie-Optimierung die physikalisch-technischen Fahrzeugdaten gegenübergestellt werden /1/. Zur Ermittlung dieser Daten ist von den individuellen Kundenwünschen auszugehen, die sich wiederum grob klassifizieren lassen durch Kenndaten wie maximale Zahl der Insassen, Zuladung, Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungsvermögen u.ä., sowie durch die Einteilung in Klassen wie Personenwagen, Transporter, Bus u.ä..

Aus diesen Angaben läßt sich zunächst als "Startwert" ein geschätztes Elektromobil mit Anfangswerten für die Optimierung ansetzen, wobei die Massen der einzelnen Bestandteile grob abgeschätzt werden müssen.

Dieses angenommene Fahrzeug läßt man nun die vorgegebene Strecke nach Abb. 1 rechnerisch abfahren, wobei das in Abb.2 gegebene Geschwindigkeitsprofil im Rahmen vertretbarer (durchschnittlich üblichen) Beschleunigungen und Bremsvorgängen so gut wie möglich angenähert werden sollte. Dabei muß die aufzuwendende Energie über die Wegstrecke integriert werden.

Mit dem ersten Ergebnis können die vorerst angenommenen Kenndaten des Fahrzeugs korrigiert werden. Mit dieser Variation kann dann die Berechnung wiederholt werden und so fort, womit sich durch weiteres *iteratives Vorgehen* das Fahrzeug Schritt für Schritt verbessern läßt. Dies läßt sich solange fortsetzen, bis sich stationäre Daten ergeben, d.h. keine weitere Verbesserung bei den gegebenen Randbedingungen mehr möglich ist.

Wichtig für die *Energiebilanz* ist die Unterscheidung eines Antriebs mit oder ohne *Rekuperation*. Im Falle einer eingebauten Rekuperationsmöglichkeit ist ein teilweiser Energierückgewinn bei Abbremsvorgängen sowie Talfahrten möglich, der den Energieverbrauch für die Strecke  $S_{\text{ges}}$  reduziert.

Die aufzuwendende Energie berechnet sich nach:

$$E = \sum_{i=1}^k \int_{s_{i-1}}^{s_i} \eta(s) \cdot F_i(s) ds \quad \text{mit } F_i \equiv \text{Antriebskraft} \quad (9)$$

Hierbei sorgt die "Wirkungsgradfunktion"  $\eta(s)$  für die korrekte Berücksichtigung der Beschleunigungssituationen wie Bremsvorgang mit und ohne Rekuperation, also bei negativer Antriebskraft. Dies läßt sich näherungsweise wie folgt darstellen:

$$\eta(s) = \begin{cases} 1 & \text{für } F_i \geq 0 \\ 0 & \text{für } F_i < 0 \text{ ohne Rekuperation (Bremsen)} \\ \eta_{\text{rekup}}(v) & \text{für } F_i < 0 \text{ mit Rekuperation} \end{cases} \quad (10)$$

Die im wesentlichen zu berücksichtigenden Kräfte sind:

$$F_W = F_{Ro} + F_L + F_{St} \quad \text{Fahrwiderstand} \quad (11)$$

$$F_{Ro} = f_R \cdot m \cdot g \quad \text{Rollreibung} \quad (12)$$

$$F_L = 0,5 \cdot r_L \cdot C_w \cdot A \cdot v^2 \quad \text{Luftwiderstand} \quad (13)$$

$$F_{St} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad \text{Steigungskraft} \quad (14)$$

Für die resultierende Beschleunigung gilt:

$$F_{\text{Beschl}} = F_{\text{Antrieb}} - F_W \quad F_{\text{Antrieb}} = F_W \quad \text{Gleichgewicht} \quad (15)$$

Bei Gefälle gilt  $\sin \alpha < 0$ , so daß  $F_{St}$  negativ wird. Dadurch besteht die Möglichkeit, daß  $F_W$  kleiner Null wird. Um also bei Gefälle ein Kräftegleichgewicht (konstante Geschwindigkeit) einzuhalten, muß die Antriebskraft ebenfalls negativ werden, welches sowohl durch betätigen der Bremse als auch durch *Rekuperation* erreicht werden kann. Bei Geschwindigkeitsreduzierungen kann ein negativer Antrieb auf gleiche Weise erzeugt werden. Bei der Berechnung des Geschwindigkeitsprofils mit Rücksicht auf die in Abb. 2 dargestellten Zielsetzungen ist die Abhängigkeit des Luftwiderstands von der momentan erreichten Geschwindigkeit mit einzubeziehen (13). Dies kann durch die Betrachtung folgender Zusammenhänge geschehen:

$$\text{es gilt } v = \frac{ds}{dt} \quad \text{sowie} \quad a = \frac{dv}{dt} \quad \Rightarrow \quad \boxed{ds = a \cdot v \cdot dt} \quad (16)$$

Näherungsweise kann mit einem Satz von konstanten Beschleunigungen gerechnet werden, wobei die Möglichkeit besteht, verfeinernd zwischen reinen Fahrgeschwindigkeitsänderungen und Anfahren aus dem Stillstand sowie Bremsvorgänge bis zum Stillstand zu differenzieren.

Der *Rekuperations-Wirkungsgrad*  $\eta(v)$  ist sicherlich eine Funktion der Momentangeschwindigkeit, was durch Vorgabe einer Kennlinie aus Motor-Generator-Daten berücksichtigt werden kann.

**Optimierungsansatz:**

Das folgende Flußdiagramm soll die Vorgehensweise zur Fahrzeugoptimierung verdeutlichen:

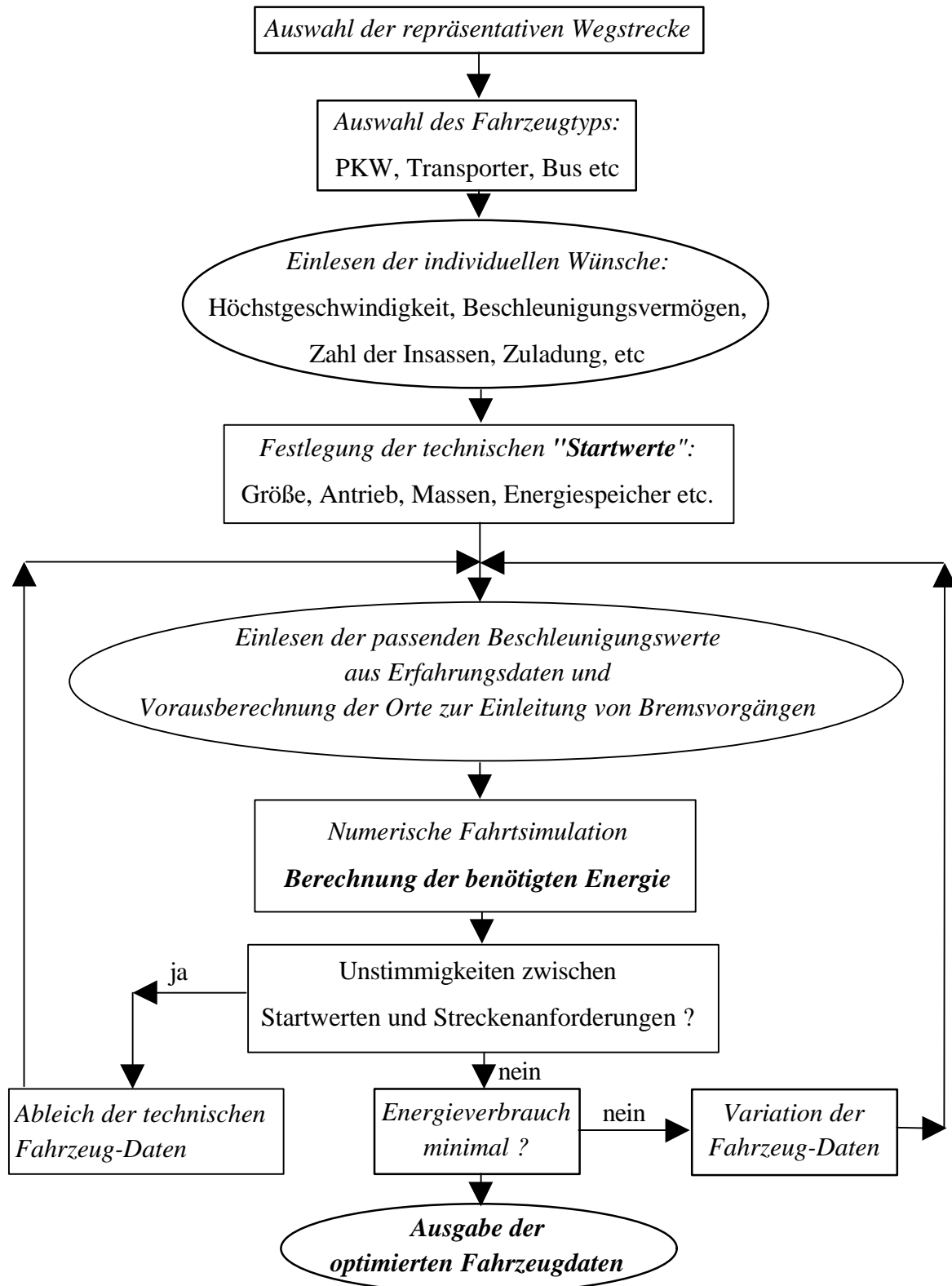


Abb. 3 Flußdiagramm des Optimierungsverfahrens

Wesentlich für eine erfolgreiche Berechnung der erforderlichen Fahrzeugdaten ist ein hinreichend ausführlicher Datensatz zu den Kenndaten der einzelnen Fahrzeug-Komponenten. Soweit wie möglich sollten reale Kennlinien von Systemkomponenten berücksichtigt werden, wie zum Beispiel für den Antrieb, zur Rekuperation, Batterie-Charakteristiken und ähnliches. Auch konstruktive Erfahrungen zum Karosseriebau sind von erheblicher Bedeutung, da die Masse des Chassis an die Massen der Komponenten angepaßt werden muß, wobei Sicherheitskriterien selbstverständlich nicht außer acht gelassen werden dürfen. Aus diesen Abstimmungen ergeben sich als wesentlichste Parameter die Fahrzeug-Gesamtmasse und die Fahrzeugabmessungen, die für die Berechnung der Antriebskräfte zwingend erforderlich sind. Selbstverständlich muß ein derartiges Programm, nach den sich damit bei praktischen Realisierungen ergebenden praktischen Erfahrungen und Meßergebnissen, ständig im Hinblick auf die genutzten Datenbanken angepaßt und verbessert werden.

### **Zusammenfassung und Ausblick:**

Es wird ein Ansatz zu einem Optimierungsverfahren für Elektromobile vorgestellt, welches sowohl die zu erwartenden Streckenbeanspruchungen als auch die individuellen Wünsche an das Fahrzeug berücksichtigt und aufeinander abstimmen kann. Den Optimierungsparameter bildet hierbei der für die repräsentative Strecke benötigte Energieverbrauch.

Auf diese Weise soll den begrenzten fossilen Energieressourcen Rechnung getragen werden, sowie beim Einsatz von regenerativen Energien deren Bereitstellungsaufwand minimiert werden. Ziel ist es, auch im Verkehrswesen einen nachhaltigen Beitrag zum Umweltschutz leisten zu können.

### **Referenzen:**

- /1/ "Physikalische Analyse der Dimensionierungsgrundlagen zur Entwicklung einer Methode zur Konzipierung und Optimierung eines Elektromobils"  
K. Brinkmann, W. Köhler & D. Hackstein  
*Viertes Anwenderforum Elektromobile, 09. und 10. 02. 99 Regensburg*
- /2/ "Dynamik der Kraftfahrzeuge" Band A: Antrieb und Bremsung  
M. Mitschke, Dritte Auflage, Springer Verlag 1995
- /3/ "Electric and Hybrid Vehicles"  
Edited by M.J. Collie, Noyes Data Corporation Park Ridge  
Energy Technology Review No. 44, New Jersey U.S.A. 1979