

# Kompakte Bordstromversorgung mit schnellaufendem Synchrongenerator

M. Krüger

**Übersicht:** Wegen zunehmender Umweltbelastungen gibt es wieder verstärkte Entwicklungsanstrengungen zugunsten elektrisch angetriebener Fahrzeuge. Der wesentliche Nachteil autonomer elektrisch angetriebener Fahrzeuge besteht nach wie vor in deren Abhängigkeit von einer kontinuierlichen elektrischen Energiequelle, die in den meisten Fällen durch eine elektrochemische Speicherbatterie bereitgestellt wird. Aufgrund physikalischer Beschränkungen bleibt deren Leistungsdichte und Kapazität jedoch weit hinter der von flüssigen Kraftstoffen zurück.

Eine mögliche Alternative besteht in der Verwendung einer Bordstromversorgung, mit einem Generator der durch eine thermische Kraftmaschine angetrieben wird. In diesem Fall dient die Batterie nur als Kurzzeitspeicher, was deren Kosten, Gewicht und Preis wesentlich reduziert. Der Mittelwert der elektrischen Leistung kann direkt vom Generator zum elektrischen Fahrentrieb geführt werden. Um Gewicht und Volumen der Bordstromversorgung zu reduzieren, wird im folgenden die Verwendung eines schnellaufenden Generators, der direkt an eine Gasturbine gekoppelt werden könnte, vorgeschlagen. Der Aufsatz befaßt sich ausschließlich mit dem elektromechanischen Teil der Bordstromversorgung. Experimentelle Ergebnisse mit einem Generatorsystem im Leistungsbereich von 10 kW bei  $36000 \text{ min}^{-1}$  werden vorgestellt.

## Compact power supply with high-speed synchronous generator

**Contents:** Growing concern with environmental pollution encourages renewed investigations in the field of electrically driven vehicles. The most significant drawback of electrical drive systems as applied to autonomous vehicles is their need for a continuous electrical power supply, mostly provided by electrochemical storage batteries. However, due to physical limitations their power and energy capacity is poor compared to liquid fuel.

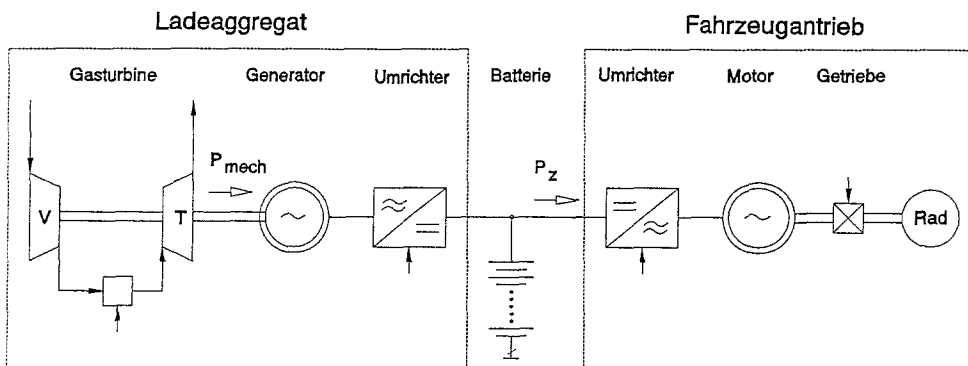
An alternative can be seen in the use of an on-board power supply, with a generator driven by a thermal prime mover. In this

case the battery serves only as short-time energy buffer with reduced capacity, weight and cost, whereas the mean electrical power is directly fed from the generator to the electrical drive of the vehicle. In this investigation the use of a high-speed generator, that might be directly coupled to a gas turbine, is proposed to reduce volume and weight of the on-board power supply. This paper deals only with the electromechanical part of the power supply. Experimental results from a generator system rated 10 kW at 36000 rpm are discussed.

## 1 Einleitung

Hatten Elektrofahrzeuge zu Anfang dieses Jahrhunderts noch eine führende Marktposition, so wurden sie wenig später durch die rasche Entwicklung der Verbrennungsmotoren fast völlig verdrängt. Die wesentliche Schwierigkeit beim Betrieb autonomer elektrisch angetriebener Fahrzeuge besteht in der Abhängigkeit von einer kontinuierlichen elektrischen Energiequelle, die in den meisten Fällen durch eine elektrochemische Speicherbatterie bereitgestellt wird. Ungeachtet der Fortschritte bei der Entwicklung neuer Batterien bleibt deren Leistungsfähigkeit jedoch gegenüber konventionellen Lösungen mit flüssigen Kraftstoffen weit zurück.

Ein anderes in vielen Fällen bewährtes Prinzip besteht darin, die benötigte elektrische Energie an Bord des Fahrzeugs durch ein Ladeaggregat, bestehend aus Verbrennungsmotor und Generator, zu erzeugen. Wie Bild 1 zeigt, wird die Antriebsleistung wie beim Elektrostraßenfahrzeug immer über den elektrischen Fahrmotor auf die Räder übertragen. Die bei einem reinen Elektroantrieb benötigte Speicherbatterie kann durch eine hinsichtlich



**Bild 1.** Elektrofahrzeug mit Serienhybridantrieb

Größe und Gewicht deutlich verkleinerte Pufferbatterie ersetzt werden. Gegenüber anderen thermisch-elektrischen Antriebslösungen lassen sich mit dieser Anordnung folgende Vorteile erwarten:

- Das Ladeaggregat ist von den antriebsseitigen Drehzahl- und Leistungsschwankungen entkoppelt. Es braucht daher nicht für die zu erwartende Spitzenleistung, wie sie vor allem bei Beschleunigungsvorgängen auftritt, ausgelegt zu werden, sondern nur auf die mittlere Dauerleistung.
- Wegen der Entkopplung von der Antriebsseite kann die Verbrennungsmaschine über weite Strecken in einem günstigen Arbeitsbereich betrieben werden, was zu einer Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen führt.
- Eine Reichweitenbeschränkung gibt es nicht, da das mit einem solchen Antrieb ausgerüstete Fahrzeug auf herkömmliche Weise betankt wird. Eine besondere Infrastruktur für den Betrieb dieser Fahrzeuge ist nicht erforderlich.
- Für die vom Generator direkt zum Fahrmotor gespeiste Energie entfallen die Lade- und Entladeverluste der Batterie.
- Mit der vorhandenen Pufferbatterie wird bei abgeschalteter Verbrennungsmaschine auch kurzzeitig ein völlig abgasfreier Betrieb des Fahrzeugs ermöglicht. Dies ist vor allem in innerstädtischen Bereichen von Nutzen, wo derzeit 25% des Kraftstoffs in stehenden Fahrzeugen verbraucht werden.
- Der Generator kann auch zum Starten des Verbrennungsmotors verwendet werden.
- Neben der Batterie kann die Schwungmasse von Generator und Verbrennungsmotor als zusätzlicher Kurzzeitspeicher verwendet werden; dies ermöglicht die Rückspeisung von Bremsenergie auf hohem Leistungsniveau.
- Die Abwärme des Verbrennungsmotors ist für die Heizung des Fahrzeuginnenraumes nutzbar.

Als Nachteil erscheint auf den ersten Blick die Kettenschaltung der zahlreichen verlustbehafteten Energieumwandlungen. Bei genauer Betrachtung besteht diese jedoch auch beim Elektrofahrzeug mit Speicherbatterie, wenn man den Weg der elektrischen Energieerzeugung im Kraftwerk, die Energieübertragung zum Netzanschluß, die Verluste im Ladegerät, die Selbstentladung der Batterie sowie deren Lade- und Entladewirkungsgrade mit einschließt.

Um ein akzeptables Gesamtgewicht zu erreichen, ist die Verwendung hochtouriger Maschinen von besonderem Interesse. Wegen der vorgegebenen Raddurchmesser und Fahrgeschwindigkeiten ist dies beim Fahrmotor jedoch nur im begrenzten Umfang nutzbar. Dagegen kann die Drehzahl des Generators wesentlich gesteigert werden; insbesondere wenn gleichzeitig eine hochtourige Verbrennungsmaschine Verwendung findet, die direkt mit dem Generator gekoppelt wird. Für sehr hohe Drehzahlen kommen dabei vor allem Gasturbinen in Betracht.

Im Rahmen eines von der DFG geförderten Vorhabens wurden die Möglichkeiten zur Ausführung eines geeigneten hochtourigen Generatorsystems untersucht

und experimentelle Laborversuche im Leistungsbereich von 10 kW bei Drehzahlen oberhalb von  $30000 \text{ min}^{-1}$  durchgeführt. Die Verwirklichung einer geeigneten hochtourigen Verbrennungsmaschine war zunächst nicht Gegenstand der Untersuchungen.

## 2 Ausführung des schnellaufenden Generators

Um bei der angestrebten stationären Betriebsweise einen guten Wirkungsgrad zu erzielen, ist die Maschine als permanenterregte, elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine ausgeführt. Wie Bild 2 zeigt, verfügt die Maschine zudem über einen Rotor in Außenläuferbauweise, um die an den Permanentmagneten angreifenden Fliehkräfte aufzunehmen. Bei der vorgesehenen Anwendung ist außerdem das resultierende hohe Trägheitsmoment als zusätzlicher Kurzzeitspeicher erwünscht.

Die wesentlichen mechanischen Daten des Generators lauten:

Statoraußendurchmesser	$r_{sa} = 45 \text{ mm}$
Magnethöhe	$h_m = 4 \text{ mm}$
mittlere Luftspaltinduktion	$B_{L,mi} = 0,7 \text{ T}$
Magnet- bzw. Statorlänge	$l_m = l_s = 30 \text{ mm}$
Gewicht des einbaufertigen Rotors	$m_r = 7 \text{ kg}$
Trägheitsmoment	$\Theta_r = 0,0172 \text{ kgm}^2$
mechanische Drehfrequenz	$f_{mech,n} = 600 \text{ s}^{-1}$
Umfangsgeschwindigkeit am Luftspalt	$v_{us} = 170 \text{ m/s}$

Eine Besonderheit stellt bei der Maschine die siebensträngige Ausführung da. Dies Prinzip wurde bereits früher [10] zur Steigerung der Maschinenausnutzung vorgeschlagen. Beim Betrieb der Maschine an einem Gleichspannungszwischenkreis ergibt sich damit die in Bild 3 gezeigte prinzipielle Anordnung. Beim Betrieb mit rechteckförmigen Strangströmen leiten jeweils drei Stränge einen positiven und drei Stränge einen betragsmäßig gleich großen jedoch negativen Strangstrom, während ein Strang stromlos bleibt.

Für die in einem Strang der Maschine induzierte Spannung gilt

$$u_i = 2p_0 l_s w v_{us} B_{L,mi} < \frac{u_{z,min}}{2}, \quad (1)$$

wobei die Umfangsgeschwindigkeit an der Ständeroberfläche

$$v_{us} = 2\pi r_{sa} f_{mech} \quad (2)$$

beträgt.

Ferner berechnet sich der Nennstrom der Maschine zu:

$$i_{s,n} = \frac{m_n \tau_p}{2\pi r_{sa}^2 l_s B_{L,mi} (m_s - 1) w}. \quad (3)$$

Mit den für die Versuchsmaschine gewählten Entwurfsgrößen

Nennzwischenkreisspannung	$u_{z,n} = 72 \text{ V}$
Windungszahl je Pol und Strang	$w = 2$
Polpaarzahl	$p_0 = 2$
Strangzahl	$m_s = 7$

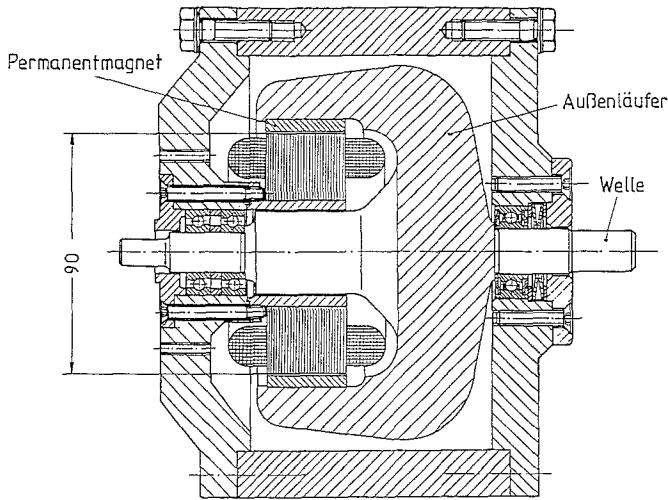


Bild 2. Zusammenbauzeichnung der Maschine

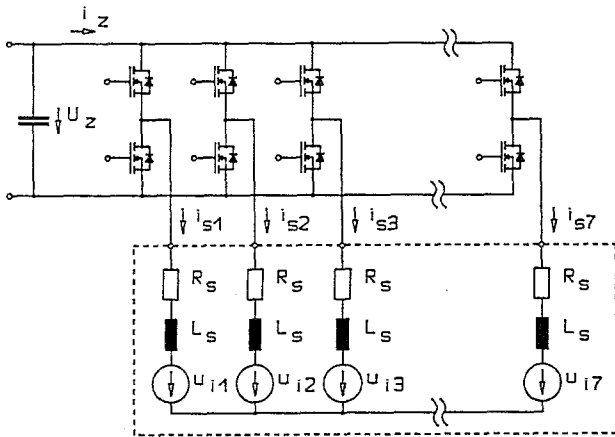


Bild 3. Prinzipielle Anordnung von Maschine und Umrichter

ergeben sich zusammenfassend:

induzierte Spannung je Strang	$u_i = 28,6 \text{ V}$ , bei Nenndrehzahl
Nennmoment	$m_n = 2,95 \text{ Nm}$
Strangennennstrom	$i_{s,n} = 64,4 \text{ A}$
Nutzzahl	$N = 28$
Polteilung	$\tau_p = 70,7 \text{ mm}$

Die Berechnung der Strangströme erfolgt über die Differentialgleichung:

$$\mathbf{M} \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} = \mathbf{u}_s - R_s \mathbf{i}_s - \mathbf{u}_i - u_{st}. \quad (4)$$

Die induzierte Spannung  $\mathbf{u}_i$  ist dabei eine Funktion der Drehzahl  $\omega$  und der Winkelstellung  $\gamma$  des Rotors, während die Strangspannung  $\mathbf{u}_s$  durch den Zustand der Umrichterhalbbrücken bestimmt wird.

Die in Gl. (4) verwendeten Größen in vektorieller Schreibweise lauten:

$$\mathbf{i}_s^T = [i_{s1}, i_{s2}, \dots, i_{s7}]$$

$$\frac{d\mathbf{i}_s^T}{dt} = \left[ \frac{di_{s1}}{dt}, \frac{di_{s2}}{dt}, \dots, \frac{di_{s7}}{dt} \right] \quad (5)$$

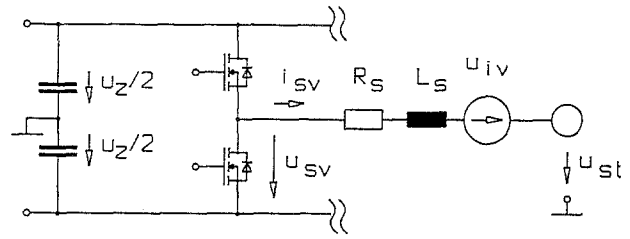


Bild 4. Elektrische Größen eines Stranges

$$\mathbf{u}_i^T = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{i7}]$$

$$\mathbf{u}_s^T = [u_{s1}, u_{s2}, \dots, u_{s7}]$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} L_s & M_1 & M_2 & M_3 & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & L_s & M_1 & M_2 & M_3 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & L_s & M_1 & M_2 & M_3 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 & L_s & M_1 & M_2 & M_3 \\ M_3 & M_3 & M_2 & M_1 & L_s & M_1 & M_2 \\ M_2 & M_3 & M_3 & M_2 & M_1 & L_s & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & M_3 & M_2 & M_1 & L_s \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Die Differentialgleichung für den  $v$ -ten Strangstrom lautet damit:

$$L_s \frac{di_{sv}}{dt} = u_{sv} - R_s i_{sv} - u_{iv}(\omega, \gamma) - u_{st} - \sum_{\mu=1, \mu \neq v}^7 M_{\mu, v} \frac{di_{s\mu}}{dt}. \quad (6)$$

Bild 4 zeigt die verwendeten Stranggrößen. Die Sternpunktspannung  $u_{st}$  stellt sich abhängig vom Umrichterzustand und Betriebspunkt der Maschine frei ein. Sie berechnet sich durch Addition der sieben Strangstrom-Differentialgleichungen und mit

$$\sum_{v=1}^7 i_{sv} = 0 \quad \text{und} \quad \sum_{v=1}^7 \frac{di_{sv}}{dt} = 0 \quad (7)$$

zu

$$u_{st} = \frac{1}{7} \sum_{v=1}^7 (u_{sv} - u_{iv}(\omega, \gamma)). \quad (8)$$

Aus Symmetriegründen treten für die Kopplungsinduktivitäten  $M_{\mu, v}$  bei der 7-strängigen Versuchsmaschine nur folgende drei Werte auf:

$$\begin{aligned} M_1 &= -5/7 L_h \\ M_2 &= 3/7 L_h \\ M_3 &= -1/7 L_h \end{aligned}$$

### 3 Strangstromregelung

Aufgrund der kleinen Windungszahl hat die Maschine eine außerordentlich geringe Stranginduktivität. Daraus ergeben sich besondere Anforderungen an den Umrichter und die Stromregelung hinsichtlich hoher Schaltfrequenzen und kleiner Schaltzeiten. Die damit verbundene Problematik wird verdeutlicht, wenn man bedenkt, daß bei der ausgeführten Maschine mit einem Strangennennstrom von 65 A die maximale Stromänderungsgeschwindigkeit

bis zu  $10 \text{ A}/\mu\text{s}$  betragen kann. Es ist offensichtlich, daß eine zeitdiskret arbeitende Strangstromregelung nur mit unvertretbar hohem Aufwand zu verwirklichen wäre. Eine analoge Strangstromregelung mit Zweipunktregler erscheint daher als beste Lösung. Bild 5 zeigt als Ergebnis einer digitalen Simulation den Verlauf der sieben Strangströme mit dieser Regelung.

Dieses Konzept des Generatorsystems bietet folgende Vorzüge:

- Hohe Nutzung des Erregerfeldes für die Drehmomenterzeugung
- Geringe Zusatzverluste durch niedrige Welligkeit des rotorbezogenen Statorflusses
- Gute Schalterausnutzung und kleiner Strangstromeffektivwert durch hohe Stromflußdauer
- Verfügbarkeit des Wechselrichters auch bei teilweisem Komponentenausfall

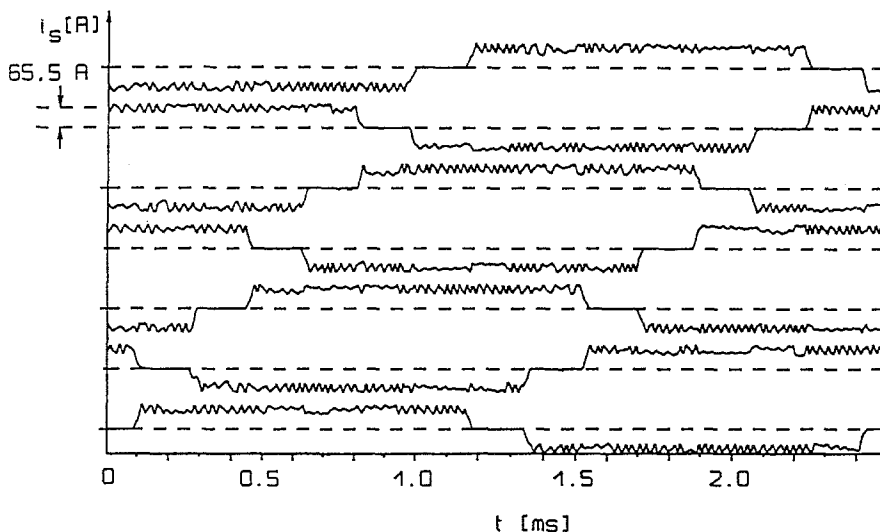
#### 4 Experimentelle Untersuchung des Generatorsystems

Da weder eine geeignete hochtourige Antriebs- noch Belastungseinrichtung zur Verfügung stand, wurde zur experimentellen Untersuchung des Antriebssystems der

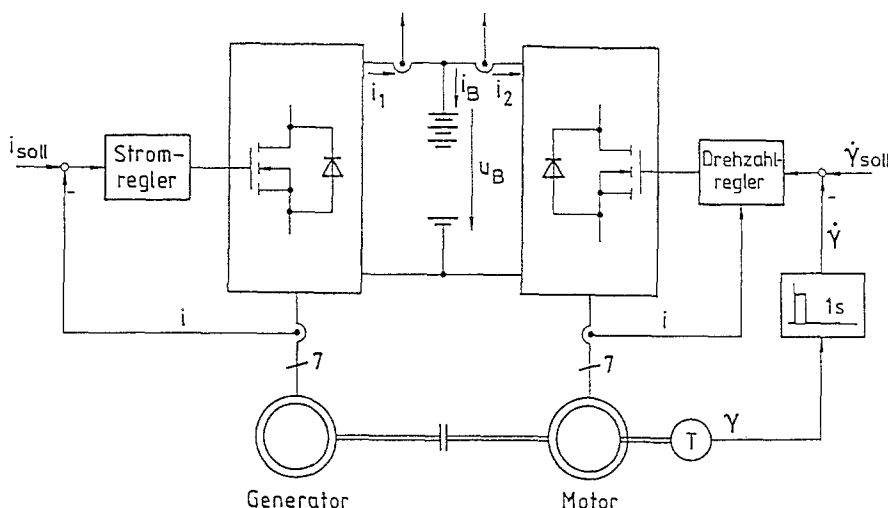
im Bild 6 gezeigte Laboraufbau verwendet. Dabei sind zwei identische Maschinen mechanisch über eine Welle und elektrisch über einen gemeinsamen Gleichspannungszwischenkreis gekoppelt. Da im Rahmen dieser Arbeit nur ein Rotorstahl mit eingeschränkter Festigkeit zur Verfügung stand, wurden mit dem Laboraufbau vorerst nur Versuche bis zu  $30000 \text{ min}^{-1}$  durchgeführt. Schleuderversuche mit  $40000 \text{ min}^{-1}$  überstand der Rotor ohne feststellbare Verformungen.

Bild 7 zeigt die gemessene induzierte Strangspannung bei halber Nenndrehzahl und zum Vergleich die Stromflußdauer eines Strangstromes. Das Bild verdeutlicht die gute Drehmomentausnutzung durch die näherungsweise rechteckförmigen Strom- und Spannungsverläufe, zeigt aber auch, daß durch eine weitere Erhöhung der Strangzahl kein nennenswerter Gewinn mehr zu erzielen wäre.

Die Leerlaufverluste der Maschine wurden durch Auslaufversuche ermittelt, wobei Bild 8 die quadratische Extrapolation einzelner Meßpunkte bis zur Nenndrehzahl zeigt. Von besonderem Interesse sind wegen der schwierigen Kühlung des innenliegenden Stators die Eisenverluste. Wie die untere Kurve in Bild 8 zeigt, haben die Eisenverluste, die auch die Oberflächenverluste in den Magneten enthalten, nur einen geringen Anteil an den



**Bild 5.** Simulation der Strangstromregelung bei 12000 U/min



**Bild 6.** Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung des Antriebssystems

gesamten Leerlaufverlusten. Weitere Analysen haben ergeben, daß vor allem die Luftreibungsverluste rund 50% der Gesamtleerlaufverluste ausmachen, so daß hier der wesentliche Angriffspunkt für zukünftige Verbesserungen zu sehen ist.

Die Darstellung der Wirkungsgrade des Generatorsystems erfolgt am besten getrennt nach Umrichter und Generator. Bild 9 stellt ein Schema des Leistungsflusses für den generatorischen Betrieb dar. Bild 10 zeigt die entsprechenden Teilwirkungsgrade, die mit dem Ver-

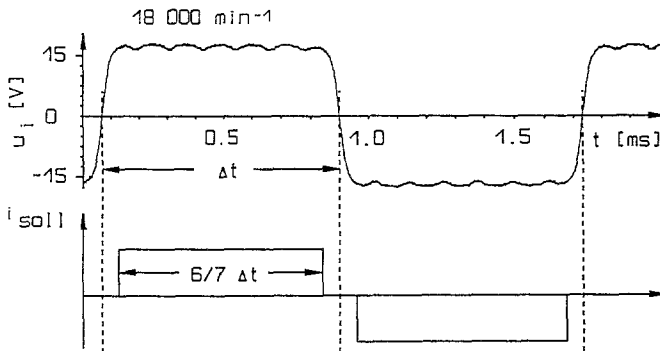


Bild 7. Induzierte Strangspannung und Stromflußdauer

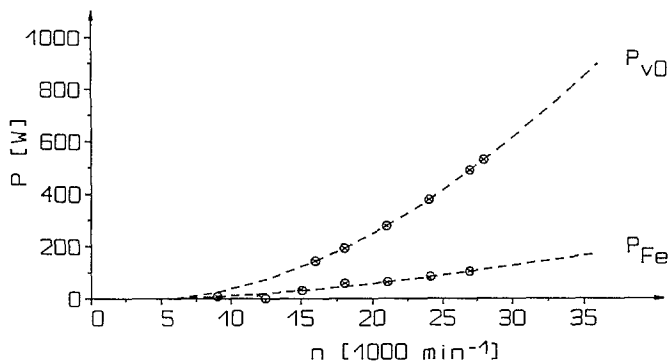


Bild 8. Gesamt-leerlauf- und Eisenverluste

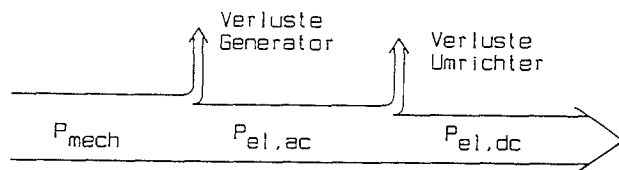


Bild 9. Leistungsfluß des Generatorsystems

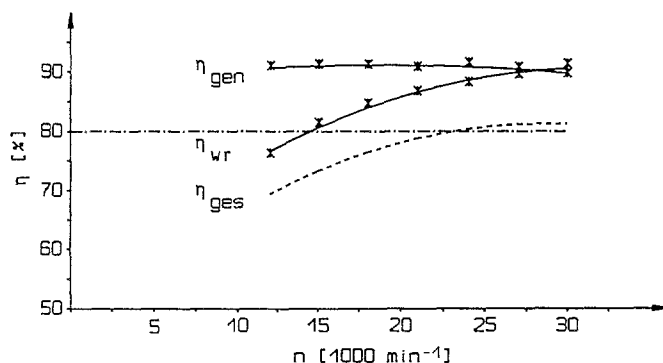


Bild 10. Wirkungsgrad des Generatorsystems bei 60 A Strangstrom

suchsaufbau unter Last ermittelt wurden und den Gesamtwirkungsgrad, der sich durch Multiplikation beider Größen ergibt. Der Generator wurde dabei mit einem konstanten Strangstrom von 60 A betrieben, womit die in den Zwischenkreis (vgl. Bild 6) eingespeiste elektrische Leistung bei  $30\,000\text{ min}^{-1}$  9,3 kW erreicht.

## 5 Einsatzmöglichkeiten der Bordstromversorgung

Im Vergleich zu den Verbrennungsmaschinen heutiger PKW erscheint die Leistung des untersuchten Generatorsystems von 10 kW recht gering. Bild 11 zeigt hierzu das Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennfeld eines typischen Kleinwagen-PKW für unterschiedliche Fahrbahnsteigungen. Die Zugkraft  $F_z$  berechnet sich bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und mit der Fahrbahnsteigung  $p_s$  zu:

$$F_z = mgf_R + mgp_s + \frac{1}{2} \rho c_w A v^2. \quad (9)$$

Die Daten des angenommenen PKW lauten:

Fahrzeugmasse	$m = 900\text{ kg}$
Querschnittsfläche	$A = 1,6\text{ m}^2$
Luftwiderstandsbeiwert	$c_w = 0,3$
Rollwiderstandsbeiwert	$f_R = 0,01$

Zusätzlich sind in dem Diagramm Linien gleicher Radantriebsleistung eingetragen. Wird kurzzeitig erhöhter Leistungsbedarf an Steigungen oder bei Beschleunigungsvorgängen aus der Pufferbatterie gedeckt, so reicht der gewählte Leistungsbereich des Generatorsystems also schon zur Erzielung einer brauchbaren Dauergeschwindigkeit aus. Selbst wenn man die Umwandlungsverluste des Serienhybridantriebs berücksichtigt und Dauerhöchstgeschwindigkeiten von 120 km/h fordert, so wäre die Leistung des Generatorsystems nur wenig höher, etwa im Bereich von 20 kW, zu wählen. Der gewählte Leistungsbereich für die Laborversuche gestattet damit auf jeden Fall eine gute Übertragbarkeit auf diese Anwendungen.

Um die Möglichkeiten für den Einsatz der Bordstromversorgung in einem elektrisch angetriebenen PKW aufzuzeigen, wurde der vollständige Serienhybridantrieb ent-

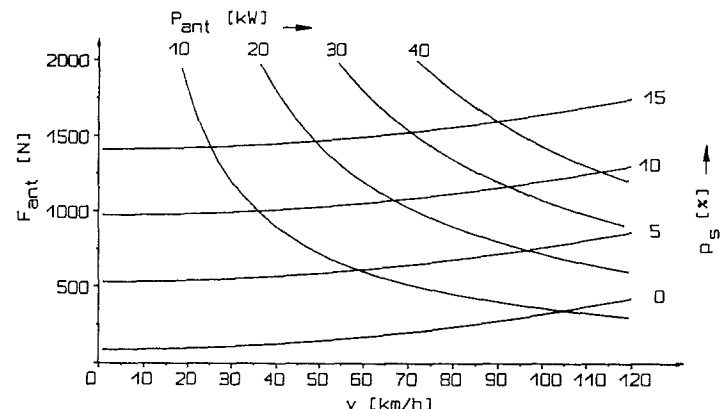
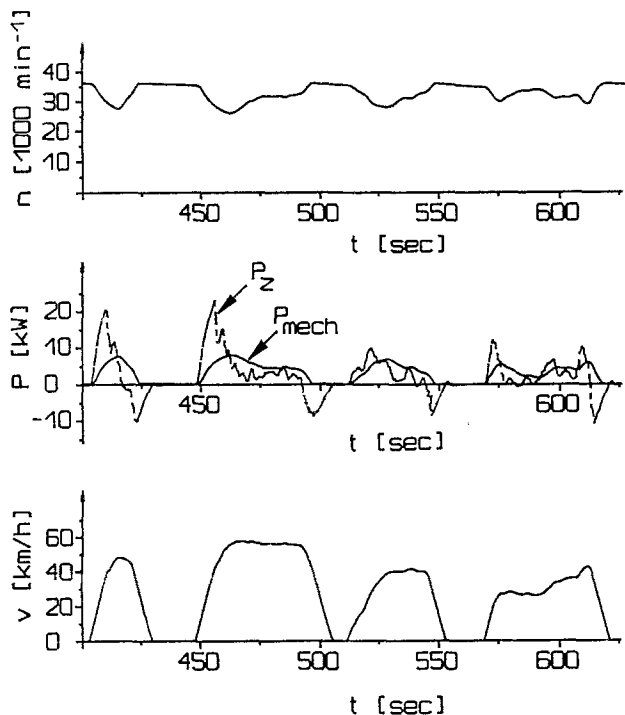


Bild 11. Antriebskraft-Geschwindigkeits-Diagramm für einen Kleinwagen

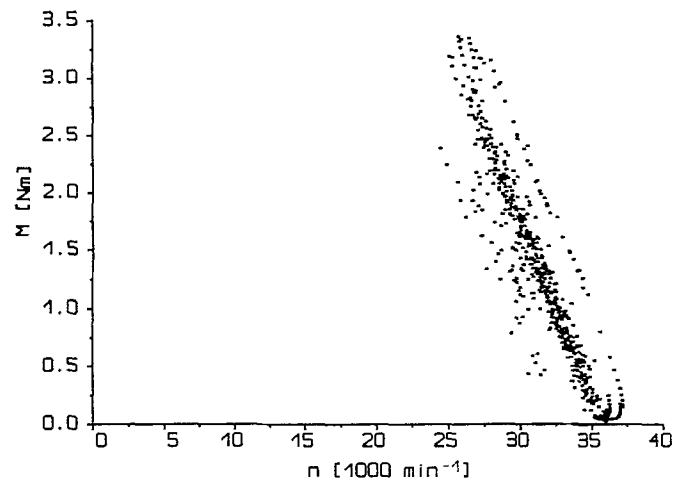


**Bild 12.** Entkopplung der Leistung von Verbrennungsmaschine und Fahrtrieb

sprechend Bild 1 beim Einsatz in einem Kleinwagen-PKW mit den oben angegebenen Daten simuliert. Bild 12 zeigt als Beispiel hierfür einen Ausschnitt aus einem Stadt-Fahrzyklus. Dargestellt sind in dem Bild zu unterst die Fahrzeuggeschwindigkeit und in dem obersten Diagramm die Generatorordrehzahl. Ebenso wie erstere zeigen auch die Verläufe der elektrischen Antriebsleistung  $P_z$  und der mechanischen Leistung der Verbrennungsmaschine  $P_{mech}$  (vgl. Bild 1) die Wirksamkeit der Entkopplung von Antriebsstrang und Ladeaggregat. In diesem Beispiel dient als Puffer praktisch nur der rotatorische Speicher des Generatorsystems, denn durch die verwendete Regelung wird der Batteriestrom innerhalb der Leistungsgrenzen des Ladeaggregats auf Null geregelt.

Aufgrund der Pufferwirkung der Rotorträgheit sind die Leistungsanforderungen an den Verbrennungsmotor hinsichtlich Dynamik und Spitzenwert deutlich kleiner als beim elektrischen Fahrtrieb bzw. einem thermischen Direktantrieb. Die Pufferwirkung reicht zur Überbrückung kurzzeitiger Belastungsschwankungen, vor allem beim Beschleunigen, völlig aus, da mit der vorliegenden Dimensionierung die Drehenergie des Generators bei Nenndrehzahl ebenso groß ist wie die kinetische Fahrzeugenergie bei 60 km/h. Die langsameren Lastwechsel aufgrund der Luft- und Rollreibungsverluste des Fahrzeugs wirken sich aber weiterhin auf den Verbrennungsantrieb aus, sofern nicht die Pufferbatterie an der Leistungslieferung beteiligt wird.

Bild 13 zeigt die Arbeitspunkte der Verbrennungsmaschine für den US-City-Fahrzyklus im M-n-Diagramm. Aufgrund der mechanischen Entkopplung von Fahrtrieb und Verbrennungsmaschine bleibt deren Drehzahl in einem schmalen Bereich. Schwankungen des Lastmomentes sind jedoch nicht vermeidbar, so daß sich



**Bild 13.** Arbeitspunkte der Verbrennungsmaschine

ein Betrieb entlang einer Linie im Kennfeld des thermischen Antriebs einstellt. Mit Beteiligung der Pufferbatterie kann der Arbeitsbereich der Verbrennungsmaschine natürlich reduziert werden, jedoch bedarf es einer detaillierten Untersuchung, um sicherzustellen, daß die resultierende Wirkungsgradsteigerung bei der Verbrennungsmaschine nicht durch die Lade- und Entladeverluste der Batterie aufgezehrt wird. Im gezeigten Einsatzfall beläuft sich die von der Verbrennungsmaschine erzeugte Energie auf 11 kWh/100 km, was bei einem spezifischen Treibstoffverbrauch von 260 g/kWh etwa 4,1 l/100 km entspricht.

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wurden Möglichkeiten zur Verwirklichung eines hochtourigen Generatorsystems für den Einsatz als Bordstromversorgung in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen untersucht. Für eine Leistung von 10 kW bei Drehzahlen über  $30\,000\text{ min}^{-1}$  wurde eine Maschine entwickelt und experimentell untersucht. Es zeigte sich, daß die klassischen elektromagnetischen Kupfer- und Eisenverluste trotz der hohen Ständerfrequenz in einem akzeptablen Bereich bleiben, so daß mit dem Versuchsgenerator bereits Wirkungsgrade von über 90% erreicht wurden. Dabei haben die mechanischen Verluste und zwar insbesondere die Luftreibungsverluste einen sehr großen Anteil an den Gesamtverlusten. Da die Minimierung der mechanischen Verluste nicht Gegenstand der Untersuchungen war, ergeben sich hier die aussichtsreichsten Ansätze für wesentliche Wirkungsgradsteigerungen.

Solange das Batterieproblem hinsichtlich Gewicht, Größe, Preis und Lebensdauer nicht im gewünschten Maße gelöst ist, wofür es trotz vielerlei Bemühungen wenig Anzeichen gibt, kann der Einsatz einer elektrischen Bordstromversorgung eine vorteilhafte Lösung darstellen. Sie bietet sich insbesondere für die Einführung elektrisch angetriebener Kraftfahrzeuge an, da die Handhabung des Fahrzeugs in den wesentlichen Punkten unverändert bleibt und sich hinsichtlich der Reichweite keinerlei Einschränkungen ergeben.

Auf diese Weise könnten elektrisch angetriebene Fahrzeuge unabhängig von der Batterieentwicklung eingeführt werden und zur Verringerung der Umweltbelastungen in Ballungszentren beitragen. Insbesondere besteht beim Serienhybridantrieb der Vorteil, daß die Entwicklung des elektrischen Fährantriebs unabhängig von der Stromversorgung fortgeführt werden kann. Sobald besser geeignete Hochleistungsbatterien oder Brennstoffzellen zur Verfügung stehen, kann auf die Bordstromversorgung mit thermischen Antrieb verzichtet werden.

## Literatur

1. R. Canders: Zur Berechnung von Schwungradspeichern aus Faserverbundwerkstoffen mit elektrischem Energiewandler. Dissertation an der TU Braunschweig, 1982
2. W. Demel: Baugröße und Verluste von permanenterregten Synchronmaschinen bei unterschiedlichem Verlauf des Stromes. Dissertation an der RWTH Aachen, 1987
3. T. Fukao: Principles and Output Characteristics of Super High Speed Reluctance Generator System. IEEE Transactions on industry applications, Vol. 1A-22, No. 4, July/August 1986
4. H.-J. Gutt: Permanenterregte und Massivläufer-Kleinmaschinen für hohe Drehzahlen. Elektronik und Informationstechnik, Heft 10, 1990
5. A. Kalberlah: Elektrostraßenfahrzeuge — PKW und Transporter ETG-Fachtagung „Hochleistungsbatterien in Verkehr und Energieversorgung“. VDE-Verlag, 1987
6. M. Krüger: Bordstromversorgung mit schnelllaufendem Synchrongenerator. Dissertation an der TU Braunschweig, 1992
7. H.-Ch. Skudelny: Untersuchungen an Drehstromantrieben für Elektrostraßenfahrzeuge. Wissenschaftliche Veröffentlichungen des Instituts für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe Band 1—2, RWTH Aachen, Dezember 1983
8. P. Walzer, R. Miersch: Electronically controlled Diesel/Electric Hybrid International workshop on control systems in new energie applications proceedings, Madrid, September 1987
9. H. Weh: Hochausgenutzte elektrische Maschinen mit Permanentenerregung. etzArchiv 4 (1982) 219—224
10. H. Weh, U. Schroeder: Static inverter concepts for multiphase machines with square-wave current — field distributions. EPE, Brüssel, 1985

*Eingegangen 8. September 1993*

M. Krüger  
Institut für angewandte Mikroelektronik GmbH  
Richard-Wagner-Straße 1  
D-38106 Braunschweig  
Deutschland