



4.

 **Bundesamt für Energie**  
**Office fédéral de l'énergie**  
**Ufficio federale dell'energia**  
**Uffizi federal d'energia**

Programm

## **Rationelle Energienutzung im Verkehr**

### **PALOS**

### **Ein teillastoptimales Antriebssystem für Leichtfahrzeuge**

ausgearbeitet durch

**L. Guzzella**  
**ETH-Zürich, Institut für Energietechnik**  
**Sonneggstr. 3**  
**8092 Zürich**

im Auftrag des

**Bundesamtes für Energie**

Dezember, 1998

Jahresbericht 1998

## 1. Projektziele 1998

Die folgenden Punkte bildeten die Hauptziele dieses Jahres:

1. Fortführen der systematischen Analyse motorseitiger Massnahmen zur Erhöhung des Teillastwirkungsgrades inkl. Berücksichtigung des Antriebsstrangs
2. Definition eines Teilrekuperationssystems (Rekuperation für die Speisung der Nebenaggregate), systematische Analyse und Optimierung des Konzepts
3. Fortführen der Modellierung des gesamten Motorsystems (besonders der Ladevorgänge) für die Simulation, inkl. der experimentellen Überprüfung der Modelle
4. Analyse und Optimierung von CVT-basierten Antriebssträngen, mathematische Modellierung, Formulierung und Lösung der Optimierungsprobleme.

## 2. Geleistete Arbeiten und Ergebnisse

Die konkret geleisteten Arbeiten gliedern sich in 5 Teilbereiche:

- A.1 Untersuchung verschiedener Verbrennungsmotorkonzepte für Leichtfahrzeuge, inkl. Antriebsstrang
- A.2 Konzeption verbrauchsgünstiger neuer Aufladekonzepte für Ottomotoren, Modellierung und experimentelle Überprüfung eines neuen Ansatzes
- A.3 Modellierung und erste Ansätze einer optimalen Regelung eines Antriebsstranges mit stufenlosem Getriebe
- A.4 Studie und Konzept zur Senkung des Kraftstoffverbrauch durch Antrieb der Nebenaggregate mit rekuperierter Energie
- A.5 Aufbau eines Echtzeit-Regelsystems in XOberon.

Zu jedem dieser Punkte ist im Anhang ein separater Bericht zusammengestellt. Als „Highlights“ sind die folgenden Resultate erwähnenswert:

- Erstellen eines Pre-/Postprocessors und Iterationsprogrammes, welches es mit Hilfe einer bestehenden Prozessrechnungssoftware ermöglicht, ganze Motorkennfelder innerhalb nützlicher Frist zu rechnen.
- Erstellen einer Fallstudie zum Vergleich des Treibstoffverbrauches verschiedener Motor- und Getriebevarianten.
- Abschliessen der Analyse „Potential der Rekuperation“, Modellierung von Komponenten für die Teilrekuperation (z. B. Batterie, Generator); Simulation des Systems für die Teilrekuperation;
- Entwicklung eines neues Werkzeug (teilweise im Rahmen des PALOS-Projekts, teilweise im TwinTrack-Projekt, siehe [P3]), welches eine schnelle und genaue rechnerische Bestimmung des Treibstoffverbrauches von Fahrzeugen ermöglicht (neben „normalen“ Systemen sind auch unkonventionelle Fahrzeuge wie Elektro- oder Brennstoffzellenhybride damit beschreibbar).
- Aufbau und Inbetriebnahme eines neuen dynamischen Prüfstands (Finanzierung durch die ETH), der es erlaubt, Teile des Antriebsstrangs durch mathematische Modelle zu ersetzen, die zentralen Komponenten (Motor, Getriebe etc.) aber als reale Objekte einzubinden („Hardware-In-the-Loop simulation“, HIL Simulation). Damit können Erkenntnisse viel schneller und kostengünstiger gewonnen werden und damit die „Trefferquote“ bei der eigentlichen Realisation deutlich erhöht werden.

### **3. Zusammenarbeit mit anderen Institutionen und Firmen**

Die traditionell gute Kooperation mit der Firma WENKO in Burgdorf wurde fortgesetzt. Ein intensiver Gedankenaustausch, die gegenseitige Hilfe und gemeinsame Publikationen [P5] sind unmittelbare Ergebnisse davon. Gleichzeitig konnte das SAVE-Projekt von den PALOS-Ressourcen profitieren. Die für das Gelingen des SAVE-Projekts wichtige Ladedruckregelung wurde erweitert und verbessert. Damit konnten im Frühjahr 1998 bei der EMPA sehr tiefe Verbrauchswerte und EURO III Emissionsgrenzwerte erreicht werden (EURO III wird erst ab dem Modelljahr 2000 eingeführt).

Die Kontakte zur Forschung der Firma Mercedes-Benz konnten vertieft werden. Gemeinsame Arbeiten wurden initiiert und einige konkrete Kooperationen konnten abgeschlossen werden. Wiederrum unterstützte die Firma Mercedes-Benz das Projekt indirekt und ein konkreter grösserer Auftrag wird im Moment diskutiert. Nicht zu vergessen sind auch die dadurch sich ergebenden Möglichkeiten für ETH-Studenten (Semester- und Diplomarbeiten und sogar Stellenangebote).

In Diskussion sind zudem Kooperationen mit den Firmen SIG Neuhausen, GM Warren und AUDI Ingolstadt. All diese Kontakte bauen auf Erkenntnissen und Werkzeugen auf, die im PALOS Projekt entstanden sind.

### **4. Transfer von Ergebnissen**

Die Ergebnisse sind teilweise direkt in Projekte eingeflossen (SAVE-Projekt, ESORO-Hybrid, Automobilindustrie, ...) und teilweise durch Publikationen bekanntgemacht (besonders [P5], siehe auch Abschnitt 6).

### **5. Perspektiven 1999**

Die Perspektiven für das folgende Jahr lassen sich in fünf Hauptrichtungen gliedern:

- Abschluss der theoretischen Arbeiten (Motor, Antriebsstrang, Emissionen) und gezielte Verbesserungsmassnahmen am Motor realisieren (konstruktiv, systemtechnisch, ...)
- Abschliessen der Untersuchungen zur Aufladung, experimentelle Überprüfung der Ansätze
- Teilrekuperationsansätze theoretisch abschliessen und experientell absichern, Aufbau der dazu benötigten Anlagen
- Konzepte für den optimalen Betrieb des CVT-Getriebes abschliessen und durch HIL-Simulationen experimentell überprüfen
- Weiterhin Mithilfe beim SAVE-Projekt, insbesondere bei der industriellen Umsetzung.

Die finanziellen Mittel des Projekts sind aus BEW- und ETH-Quellen für das Jahr 1999 ausreichend, das Team ist gut eingespielt und die externen Kontakte sind aufgebaut.

## 6. Publikationen

### Publizierte Arbeiten

- [P1] M. Henne and F. Weber, "Simulation eines Katalysator mit Lochblende," *FISITA*, 1998.
- [P2] E. Cortona, L. Guzzella and A. Amstutz, "Analysis of Different Concepts for Braking Energy Recuperation," *2nd International Conference on Control and Diagnostics in Automotive Applications*, October 1998, Genova, Italy.
- [P3] L. Guzzella, A. Amstutz and F. Grob, "Optimal Operation Strategies for a Low-Cost Hybrid Engine," *IFAC Workshop Advances in Automotive Control*, February 1998, Loudenville, OH, USA.
- [P4] R. Pfiffner and L. Guzzella, "Feedback Linearization Idle-Speed Control: Design & Experiments," *Kybernetika*, December, 1998.
- [P5] L. Guzzella and R. Martin, "The SAVE Engine Concept," *MTZ-Motortechnische Zeitschrift*, No. 10, October, pp. 644-651, 1998.

### Eingereichte Arbeiten

- [E1] F. Weber, L. Guzzella, "Berechnung des thermodynamischen Zustandes in der Gastasche eines Druckwellenladlers", *IV. Tagung Motorische Verbrennung*, Haus der Technik, Essen, März 1999.

### Interne Berichte, Semester- und Diplomarbeiten

- [I1] F. Weber, "Aufladung PALOS-Motor: Auswertung der Daten der Basismessung Oktober 1997", LMS-Bericht 1998.03.03.0026.
- [I2] F. Weber, "Modellierung des Hochdruckprozesses der Druckwellenmaschine", LMS-Bericht 1998.05.28.0024.
- [I3] F. Weber, "Validierung des Modells 'Modellierung des Hochdruckprozesses der Druckwellenmaschine' mit Messungen vom PALOS-Motor", LMS-Bericht 1998.06.20.0025.
- [I4] F. Weber, "Verbrauchsmessung am PALOS-Motor mit Bypass-Ventil", LMS-Bericht 1998.10.10.0029.
- [I5] F. Weber, "Thermodynamische Auswertung der Messungen am PALOS-Motor mit Bypass-Ventil", LMS-Bericht 1998.10.25.0030.
- [I6] Luca Frediani, "Modellierung eines Druckwellenladlers mit Verdrehen des Gehäuses", Diplomarbeit am LMS, 1998.06.01.0018.
- [I7] F. Weber, "Modell des Hochdruckprozesses und dessen Druckwellenbild des Druckwellenladlers", LMS-Bericht 10/1998.
- [I8] Patrik Soltic, "Dokumentation Messdatenerfassungsprogramm LabView am LMS", LMS-Bericht 1997.12.23.0015, 1997.
- [I9] Patrik Soltic, "CIRCE4-GUI: Program Documentation and User's Guide", LMS-Bericht 1998.05.01.0014, 1998.
- [I10] Patrik Soltic, "Fuel-Consumption Comparison between CVT and Gear Drine Equipped Lightweight Vehicles, Case Study for SI and CI Engine Concepts", LMS-Bericht 1998.07.10.0017, 1998.
- [I11] Urs Keller, "Brennverhalten eines hochaufgeladenen Ottomotors (basierend auf Messungen am PALOS Motor vom Okt.98), Semesterarbeit, am LMS, Sommersemester 1998.
- [I12] Elena Cortona, "Untersuchung des Potentials der Rekuperation kinetischer Energie zur Senkung des Treibstoffverbrauchs", LMS Bericht 1998.02.01.0031, 1998
- [I13] Elena Cortona, "Battery modeling - A Survey", LMS Bericht 1998.11.13.0057, 1998
- [I14] R. Pfiffner, "Overview of Today's Ratio Shift Control Philosophies for Continuously Variable Transmissions," LMS-Bericht Nr. 1998.11.12.0054, 1998.

## A.1 Untersuchung verschiedener Verbrennungsmotorkonzepte für Leichtfahrzeuge – P. Soltic

Die Motorisierung sparsamer Leichtfahrzeuge ist Gegenstand langer Diskussionen. Verschiedenste Konzepte wurden bereits ausgiebig untersucht. Einerseits setzt man auf hybride Strukturen, andererseits verfolgt man optimierte konventionelle<sup>1</sup> Verbrennungsmotorkonzepte. Unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte und industrieller Umsetzbarkeit scheint der Weg der optimierten konventionellen Konzepte, zumindest für die nähere Zukunft, der realistischere zu sein.

Betrachtet man Verbrennungsmotoren (Hubkolbenmaschinen) als Energiewandler, so stellt sich die Frage, welche Art der Verbrennung zukünftige Ziele erreichen soll. Dieselmotorische Verbrennung bietet ein grosses Potential (Direkteinspritzung, Common-Rail Technologie) um hervorragende Verbrauchsleistungen zu realisieren. Der konventionelle stöchiometrisch betriebene Ottomotor hat prinzipbedingt<sup>2</sup> Verbrauchsnachteile. Andererseits ist er durch den Einsatz katalytischer Abgasnachbehandlung dem Dieselmotor in Bezug auf Schadstoffemissionen hoch überlegen. Möchte man ein Antriebskonzept, welches in Gebieten hoher Verkehrsdichte schadstoffemissionsarm betrieben werden kann, so liegt der Vorteil eindeutig beim stöchiometrisch betriebenen Ottomotor mit Dreiwegekatalysator. Der Dieselmotorische Ansatz hingegen ist ein einfacher Weg, ein Fahrzeug mit hervorragenden Treibstoffverbrauchswerten zu realisieren<sup>3</sup>.

Da ein Fahrzeug sehr häufig bei tiefer Motorleistung betrieben wird, ist für den Verbrauch v.a. ein guter Motorwirkungsgrad im Teilleistungsbereich massgebend. Wie bereits erwähnt, hat der Dieselmotor in dieser Hinsicht Vorteile. Um beim Ottomotor den Teillastwirkungsgrad zu verbessern, bieten sich verschiedene Möglichkeiten an. Es geht aber immer darum, die Drosselung der Frischluft und damit die sog. Pumpverluste zu vermeiden. Einerseits kann Drosselung ersetzt werden durch effizientere Ladungsmengensteuermassnahmen wie z.B. variable Ventilsteuerung oder Hubraumverkleinerung und Aufladung (SAVE Ansatz), oder aber ein grosser Bereich der Motorleistung wird volllastnah durch Motorverkleinerung und Ausnutzung der möglichen Kolbengeschwindigkeiten erbracht. Die folgende Abbildung zeigt eine Zusammenstellung der betrachteten Motorkonzepte.

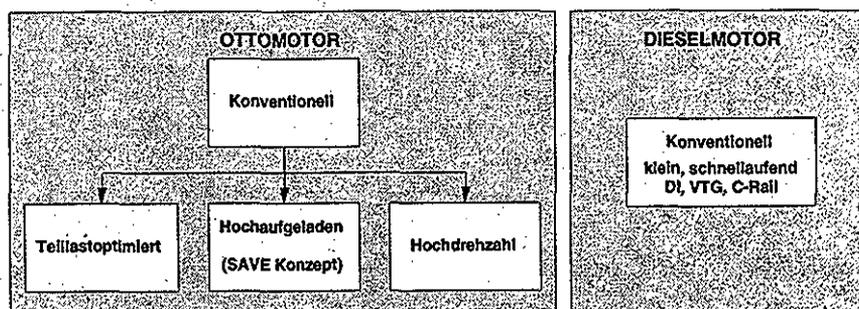


Bild A.1.1, Möglichkeiten für verbrauchsoptimierte Fahrzeuge

<sup>1</sup> Unter konventioneller Antriebsstrangstruktur verstehen wir hier einen Verbrennungsmotor als Energiewandler, welcher über ein Getriebe und andere Koppellemente mit den Rädern verbunden ist.

<sup>2</sup> Laststeuerung mittels Drosselung, Verdichtungsverhältnis muss auf die Klopfgefahr bei Vollast ausgelegt werden und ist darum tief.

<sup>3</sup> Vorsicht bei Vergleich von Verbrauchsangaben in Liter/100 km: Benzin hat eine Dichte von etwa 755 kg/m<sup>3</sup>, Diesel von etwa 835 kg/m<sup>3</sup>. Beide Treibstoffe haben denselben Massenanteil Kohlenstoff und in etwa denselben Heizwert. D.h. 1 Liter Benzin/100 km entspricht rund 0.9 Liter Diesel/100 km in Bezug auf Energieinhalt und CO<sub>2</sub> Ausstoss.

Selbstverständlich sind auch Kombinationen wie z.B. Aufladung plus Teillastoptimierung machbar. Im Rahmen des SAVE Projektes wurde bereits aufgezeigt, dass Brennstoffverbräuche von 3.24 l/100km (Erfüllung EURO II) bzw. 3.50 l/100km (Erfüllung EURO III) im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) mit einem hochaufgeladenen Ottomotor und einem optimierten Leichtfahrzeug erreichbar sind.

Die hier vorgestellte Studie [I10] vergleicht einen konventionellen Ottomotor mit einer Hochdrehzahlvariante und einem schnelllaufenden kleinen Dieselmotor. Die Eckdaten sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Typ	Hubraum [l]	# Zylinder [-]	$c_{m,max}^4$ [m/s]	$P_{max}$ [kW]
Otto, konventionell	0.920	4	11.1	45 bei 5000 min <sup>-1</sup>
Otto, hohe Drehzahl	0.523	4	18.6	45 bei 9280 min <sup>-1</sup>
Diesel	1.085	4	14.2	45 bei 4706 min <sup>-1</sup>

Tabelle A.1.1, Untersuchte Motorvarianten

Die den Simulationen zugrunde liegenden Motorkennfelder entstammen publizierten und nach Modellgesetzen extrapolierten Kennfeldern guter Motoren. Beim betrachteten Fahrzeug wurde eine Masse (fahrfertig, vollgetankt, inkl. 2 Personen) von 900 kg, ein  $c_w \cdot A$  - Wert von 0.5 m<sup>2</sup> und ein Rollwiderstandskoeffizient von 0.009 angenommen.

Da die Art sowie die Auslegung des Getriebes einen wesentlichen Einfluss auf den Treibstoffverbrauch sowie die Dynamik eines Fahrzeuges hat, wurde ein automatisiertes Schaltgetriebe (konventionelles Fünfganggetriebe mit automatisierter Kupplung und Gangschaltung) sowie ein stufenloses Getriebe (CVT: Continuously Variable Transmission) untersucht. Das Schaltgetriebe bietet einen hervorragenden Wirkungsgrad. Mit Hilfe der Automatisierung wird zudem sichergestellt, dass jeder Betriebszustand des Fahrzeuges im richtigen (d.h. verbrauchsminimalen) Gang gefahren wird. Ausserdem erlangt man durch die Automatisierung der Gangschaltung die Freiheit, verbrauchoptimal im NEFZ zu schalten (für manuell geschaltete Getriebe schreibt der Zyklus den Gang in jedem Zeitpunkt vor). Das CVT bietet den Vorteil, dass der Motor über weite Fahrzeugbetriebszustände so effizient wie möglich betrieben werden kann (siehe Anhang A.3). Allerdings ist der Wirkungsgrad eines CVT, vor allem bei der Übertragung kleiner Drehmomente, wesentlich schlechter als bei Schaltgetriebem. Es stellt sich darum die Frage, welche Getriebeart zu bevorzugen ist.

Die Simulationen wurden mit Hilfe der am Labor entwickelten QSS Toolbox durchgeführt. Simuliert wurde die folgende Antriebsstrankstruktur:

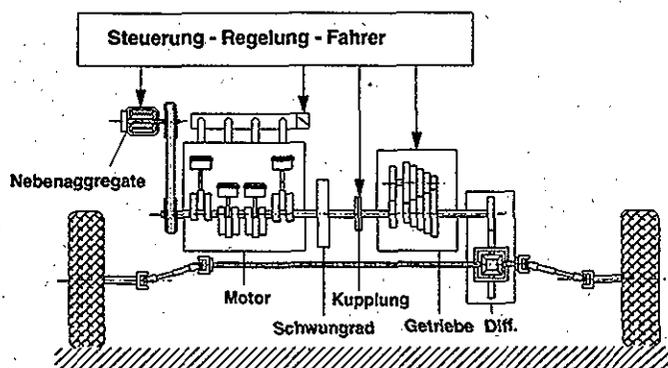


Bild A.1.2, Struktur des Antriebsstranges

<sup>4</sup>  $c_m$  : mittlere Kolbengeschwindigkeit = 2 · Hub [m] · Drehzahl [s<sup>-1</sup>]

Einen wichtigen Einfluss auf den Verbrauch haben die Nebenaggregate (siehe Anhang A.4). Um die Sensitivität des Verbrauches auf die Nebenaggregatlast aufzuzeigen, wurde jeweils verschiedene Lasten simuliert. Zudem stellt sich heraus, dass, besonders im Stadtteil des NEFZ, der Verbrauch im Motorleerlauf nicht zu vernachlässigen ist. Im folgenden werden ein paar Resultate für den Stadtteil des NEFZ (bekannt als ECE Zyklus) vorgestellt.

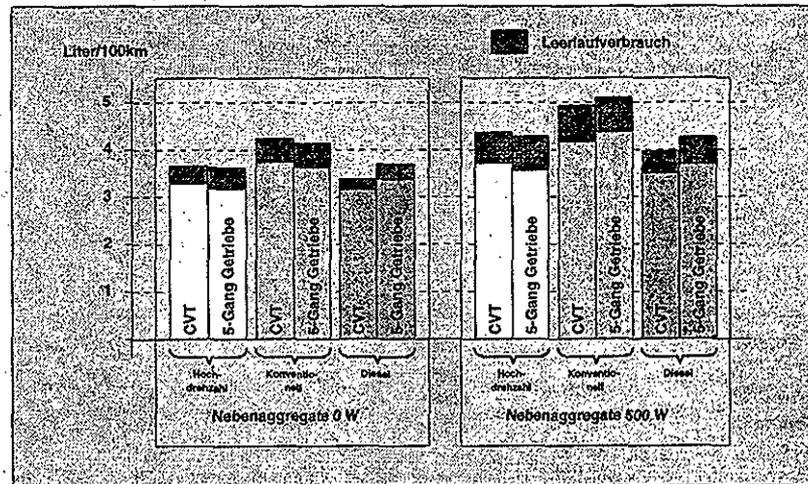


Bild A.1.3, Treibstoffverbräuche im Stadtteil des NEFZ (warme Motoren)

Wie bereits erwähnt, ist der Vergleich verschiedener Treibstoffe in l/100km problematisch. Die folgende Grafik stellt die besser zum Vergleich taugenden CO<sub>2</sub> Emissionen der verschiedenen Konzepte dar.

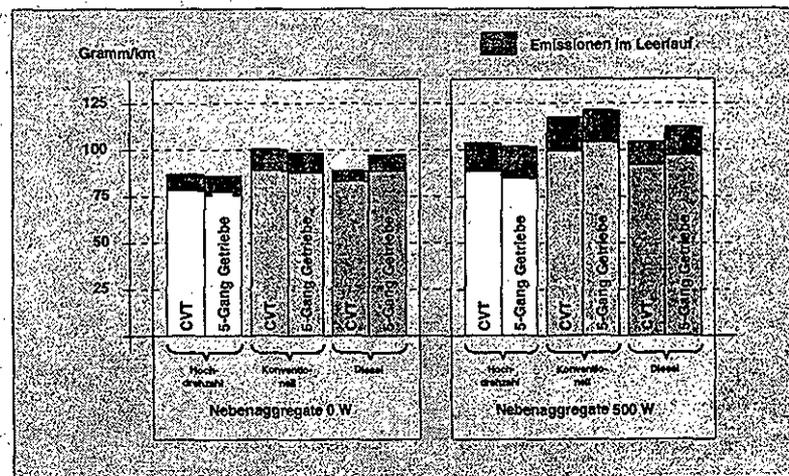


Bild A.1.4, CO<sub>2</sub>-Emissionen im Stadtteil des NEFZ (ab Tank, warme Motoren)

Da alle Simulationen auf Kennfeldern warmer Motoren basieren, lassen sich die Treibstoffverbräuche mit guter Genauigkeit für "warme Zyklen" vorhersagen. Allerdings wird der NEFZ mit kaltem Motor gestartet (momentan 40 Sekunden Motorleerlauf, in Zukunft ohne diese Warmlaufphase). Entscheidend für den Verbrauch im Zyklus ist daher der durch den Kaltstart verursachte Mehrverbrauch. Das folgende Diagramm stellt den durch den Kaltstart (Starttemperatur 20 °C) verursachten Mehrverbrauch in Abhängigkeit des Zylinderhubraumes einiger Serien-Ottomotoren dar.

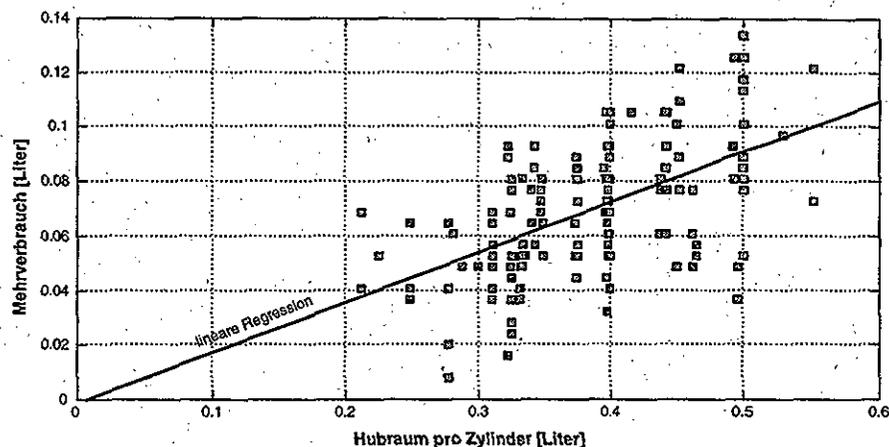


Bild A.1.5, Kaltstartmehrverbrauch im NEFZ in Abhängigkeit vom Zylinderhubraum

Obwohl es, je nach Abstimmung der Motorelektronik, gewaltige Unterschiede innerhalb gleicher Zylinderhubvolumenklassen gibt, ist doch ein klarer Zusammenhang ersichtlich. Motoren mit kleineren Zylinderhubräumen verursachen tiefere Kaltstartmehrverbräuche. Dies ist ein deutlicher Vorteil für hochdrehende oder aufgeladene Motoren. Dieser Effekt lässt sich physikalisch modellieren und begründen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich mit optimierten, klassischen Antriebsstrangstrukturen tiefe CO<sub>2</sub> Emissionen bei vollwertigen Fahrzeugen realisieren lassen. Die CO<sub>2</sub> Emissionen unkonventioneller Ottomotoren (Hochaufladung oder Hochdrehzahl) im urbanen Fahrzeugbetrieb liegen im Bereich von kleinen, schnelllaufenden Dieselmotoren, die Schadstoffemissionen deutlich darunter. Auch die tieferen Kaltstartverbräuche (schnelleres Aufwärmen) spricht für kleinvolumige Motoren. Auf der Getriebeseite spricht für ein CVT der Betrieb ohne Unterbruch der Zugkraft. Automatisierte Schaltgetriebe haben Kostenvorteile, zudem sind sie leichter und wartungsfrei.

In Zukunft sollen verschiedene Konzepte detaillierter untersucht werden. Insbesondere sollen die Aussagen mit Hilfe von Prüfstandsversuchen verifiziert werden. Am Laboratorium für Motorsysteme steht ein hochdynamischer Prüfstand zur Verfügung. Mit der Hardware-in-the-Loop Methode (einzig der Motor ist physikalisch vorhanden, alle anderen Komponenten werden dem Motor vom Prüfstand "vorgetäuscht") kann z.B. mit relativ geringem Aufwand der Einfluss verschiedener Getriebe auf die Fahrleistungen und den Verbrauch eines Fahrzeuges untersucht werden.

## A.2 Verbrauchsoptimale Aufladekonzepte für Ottomotoren – F. Weber

### 1. Gemachte Arbeiten 1998

Das Konzept, mit Hilfe einer Lochblende vor dem Katalysator den Aufwärmvorgang des Wabenkörpers im Kaltstart zu beschleunigen und damit die Kaltstartemissionen (HC, CO) zu senken, ist in [P1] beschrieben.

Das schon bestehende Modell ([I2]) des Druckwellenladers wurde nochmals überdacht und teilweise neu modelliert ([I7]). Für die Berechnung des Gastaschenzustandes wurde ein neues Modell entwickelt, siehe [E1], [I6].

Die Kenntnis des Gastaschenzustandes ist notwendig für:

- die modellbasierte Auslegung des Ladedruckreglers
- die Simulation des verbrauchsoptimalen Betriebes.

Um einen aufgeladenen Motor verbrauchsoptimal zu betreiben, müssen die Drosselverluste minimiert werden. Dies wurde am PALOS-Motor mit dem sogenannten Bypass-Ventil (BPV) erreicht, siehe Abb. 2.1, links. [I4] und [I5] dokumentieren die Messungen (August 1998) mit und ohne BPV (Verbrauchsverbesserung, Drosselverluste, Druck-/Massenstromkennfelder, DWL-Kennzahlen).

### 2. Modell des Druckwellenladers (DWL)

Für die Simulation des PALOS-Motors müssen folgenden Größen berechnet werden: Rauchgasmassenstrom  $m_3$ , Ladelufttemperatur  $T_2$ , Ladeluftmassenstrom  $m_2$ . Das Rechenmodell basiert auf der eindimensionalen, reibungsfreien, adiabaten Gasdynamik. Das Resultat (relativer Fehler des Modells  $< 5\%$ ) zeigt Abb. 2.1. Der relative Fehler ist definiert als absolute Differenz zwischen Rechnung und Messung bezogen auf die Messung.

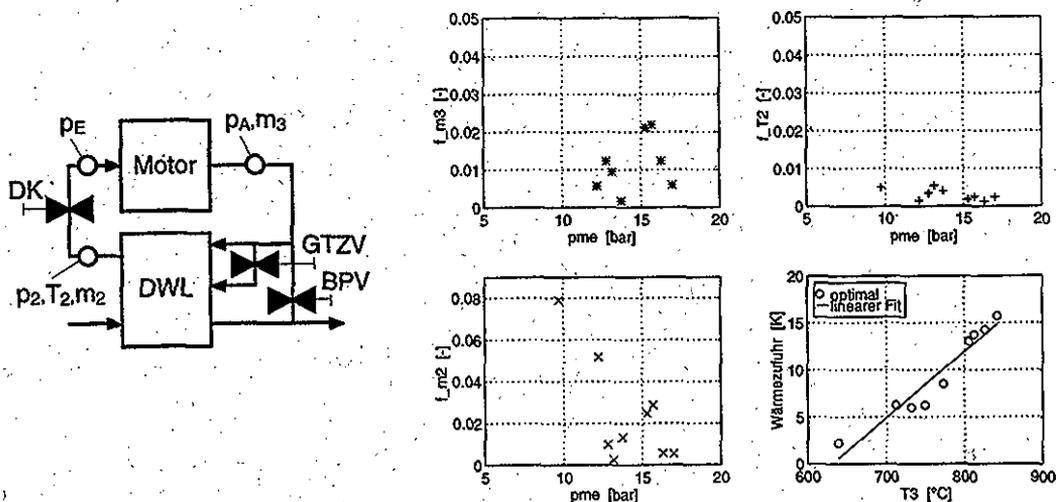


Bild A.2.1, Links: PALOS-Motor mit Messstellen (2, E, A) und Eingangsgrößen für Lastregelung  
Rechts: relativer Fehler ( $f_{xy}$ ) des DWL-Modells

### 3. Entdrosselung des PALOS-Motors

In einer ersten Phase wurde das Drehmoment am PALOS-Motor mittels Drosselklappe (DK) und Gastaschenufluss-Ventil (GTZV) geregelt. In einer zweiten Phase wurde das Bypass-Ventil (BPV, vgl. Abb. 2.1) eingebaut, um die Drosselverluste im nichtaufgeladenen Betrieb ( $\leftrightarrow$  GTZV offen) durch Abblasen der überschüssigen Abgasexergie zu minimieren. Abb. 3.1 zeigt: Mit BPV bleibt der Ladedruck  $p_2$  im nichtaufgeladenen Betrieb auf ca. Umgebungsdruck (Verhalten des Motors wie bei einem herkömmlichen Saugmotor, obwohl die Frischluft durch den DWL fließt!). Im Vergleich zum Betrieb ohne Bypass ( $\leftrightarrow$  BPV immer geschlossen) muss um die schraffierte Fläche weniger gedrosselt werden.

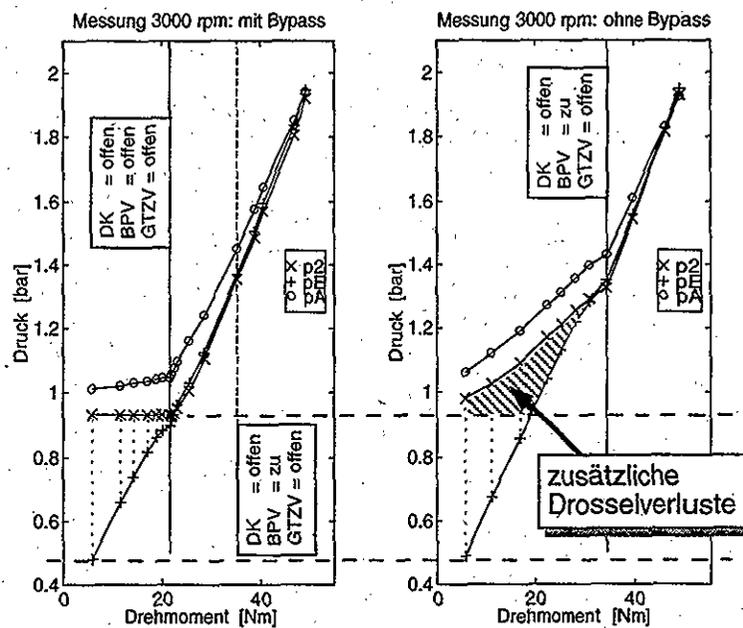


Bild A.2.2, Drosselung mit (links), ohne (rechts) Bypass

### 4. Arbeiten für 1999

Angestrebt wird ein Vergleich zwischen den Aufladevarianten DWL und mechanischer Lader (ML). Hieraus ergeben sich folgende Ziele für das Jahr 1999: 1) Entwicklung und Verifikation (mit Messungen) eines Modells eines ML, 2) mehrere Varianten der Aufladung mit ML aufzeigen, 3) Verbrauchsabschätzung dieser einzelnen Varianten.

### A.3 Optimale Regelung eines Antriebsstranges mit stufenlosem Getriebe – R. Pfiffner

Eine der grossen Herausforderungen der Forschung auf dem Gebiet des Antriebsstranges ist die Verbrauchsminimierung. Ein Ansatz, dieses Ziel zu erreichen, ist der Versuch, den Motor immer im verbrauchsgünstigsten Punkt zu betreiben. Dies wiederum ist aber nur durch eine Entkopplung der Motordrehzahl von der Fahrzeuggeschwindigkeit möglich. Ein Ansatz eine solche Entkopplung zu realisieren, ist die Verwendung eines stufenlosen anstatt eines konventionellen Stufengetriebes, da sich dann Motordrehzahl und Motordrehmoment unabhängig voneinander einstellen lassen.

Ein stufenloses Getriebe erlaubt, den Motor auf der Kurve mit dem spezifisch kleinsten Verbrauch zu betreiben. Diese Kurve  $\Gamma$  ist in der folgenden Abbildung im Verbrauchskennfeld eines typischen Verbrennungsmotors dargestellt.

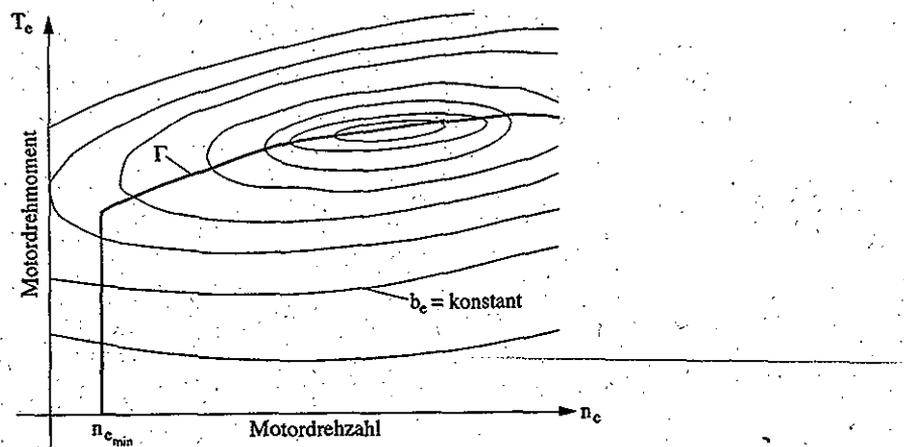


Bild A.3.1, Ein typisches Verbrauchskennfeld mit der resultierenden verbrauchsoptimalen Kurve  $\Gamma$

Diese Überlegungen gelten aber nur für den *stationären* Betrieb. Für den *dynamischen* Betrieb kann man nicht *a priori* annehmen, dass der Betrieb auf  $\Gamma$  zum kleinsten Verbrauch führt. Die heutigen transienten Strategien basieren auf heuristischen Überlegungen und Erfahrungen [114]. Es ist deswegen anzunehmen, dass diese Strategien nicht verbrauchsoptimal sind. Ziel dieser Arbeit ist es nun systematische bzw. mathematische Untersuchungen zu machen, welches die optimale transiente Steuerstrategie ist, wenn z.B. das Fahrzeug von 50 auf 85 km/h beschleunigt werden soll.

Zu diesem Zweck wurde in einem ersten Schritt ein einfaches Modell des ganzen Antriebsstranges mit CVT (Continuously Variable Transmission) und Fahrzeug aufgestellt.

$$\dot{\omega}_e = \frac{1}{J_1 + J_0 r_{CVT}^2} (T_e - r_{CVT} r_w F_R(\omega_e, r_{CVT}) - J_0 \omega_e r_{CVT} \dot{r}_{CVT}) \quad (\text{A.3.1})$$

Dabei ist  $\omega_e$  die Winkelgeschwindigkeit des Motors,  $T_e$  das Motordrehmoment,  $J_i$  stellen verschiedene Trägheitsmomente dar,  $r_{CVT}$  ist das Übersetzungsverhältnis des CVT's,  $r_w$  der Radradius und  $F_R(\omega_e, r_{CVT}) = a + b(r_w \omega_e r_{CVT})^2$  die Fahrwiderstandskraft des Fahrzeugs.

Die Dynamik im Übertragungsverhalten von der Drosselklappe zum Motordrehmoment wurde vorläufig noch vernachlässigt, da sie im Vergleich zur Dynamik von (A.3.1) als viel schneller angenommen werden kann.

Dieser Ansatz führt zu einem nichtlinearen System 2. Ordnung für den Antriebsstrang. Das System hat 2 Eingänge  $u_1 = T_e$  und  $u_2 = \dot{r}_{CVT}$ , wobei die Eingänge und die Systemzustände diversen Beschränkungen unterworfen sind und das stufenlose Getriebe als einfacher Integrator modelliert wurde.

Der Brennstoffverbrauch wurde in einem ersten Schritt mit dem bekannten Ansatz von *Willans* approximiert.

$$m_F = \int \dot{m}_F dt = \int \frac{T_e - \beta}{\alpha} \omega_e dt \quad (\text{A.3.2})$$

$\alpha$  bzw.  $\beta$  werden dabei als konstant angenommen. Das Modell (A.3.1) mit Gütekriterium (A.3.2) und den verschiedenen Beschränkungen kann nun als Optimierungsproblem formuliert und mit den Standardmethoden gelöst werden.

Das Optimierungsproblem wurde numerisch für ein typisches Fahrzeug und für den Fall, dass das Fahrzeug von 50 auf 85 km/h beschleunigen soll, gelöst. Für dieses Beispiel wurden also die zeitlichen Verläufe der beiden Eingänge gefunden, welche (A.3.2) während diesem transienten Vorgang minimieren. Die so erhaltene Fahrzeuggeschwindigkeit ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

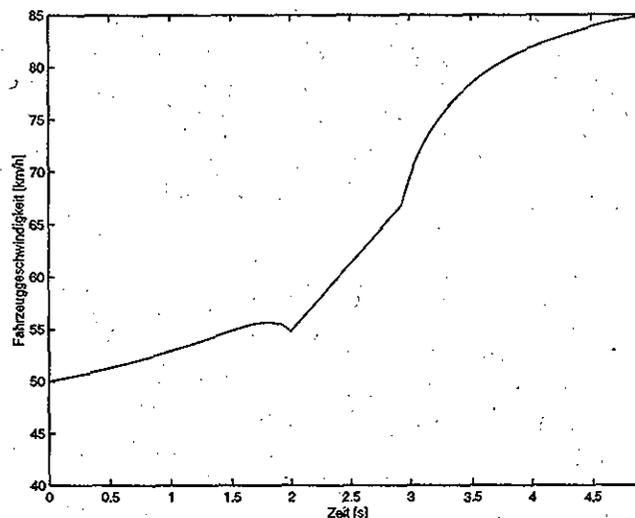


Bild A.3.2, Resultierende Fahrzeuggeschwindigkeit des gelösten Optimierungsproblems

Der Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit weist in zwei Punkten, "Ecken" auf, was sich ungünstig auf den Fahrkomfort auswirkt. Diese Ruckbewegungen müssen in einem nächsten Schritt eliminiert werden.

Der optimale zeitliche Verlauf des Motordrehmoments  $T_e$  ist konstant und immer gleich dem maximal zulässigen Wert  $T_{e_{max}}$ . Der Verlauf des zweiten Eingangs und des Übersetzungsverhältnisses  $r_{CVT}$  zeigt die folgende Abbildung. Falls  $r_{CVT}$  sich im erlaubten Bereich bewegt, ist der Eingang gleich dem erlaubten Extremalwert. Doch sobald das Übersetzungsverhältnis die Grenze des erlaubten Bereichs erreicht, wird der CVT-Eingang auf Null gesetzt.

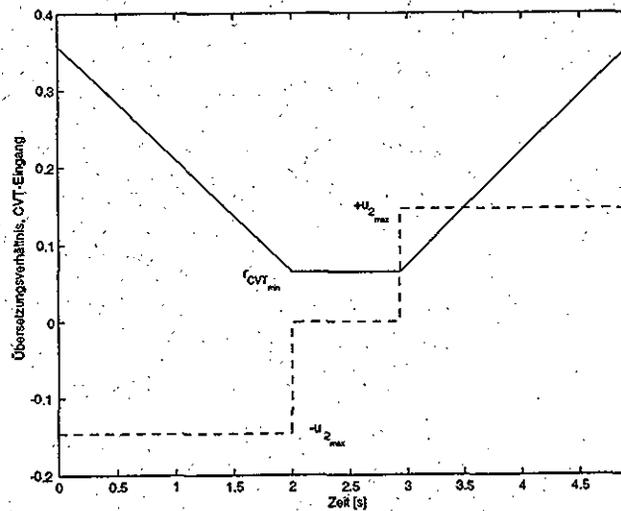


Bild A.3.3, Optimaler Verlauf des CVT-Eingangs und des Übersetzungsverhältnisses

Die beschriebene Methode soll in einem nächsten Schritt weiter ausgebaut und verfeinert werden. So ist es z.B. denkbar, dass man andere Kostenfunktionen als (A.3.2) verwenden könnte, oder dass man anstatt des Ansatzes von Willans eine Polynomapproximation eines gemessenen Kennfeldes benutzt.

**A4 Senkung des Kraftstoffverbrauchs durch Antrieb der Nebenaggregate mit recuperierter Energie – E. Cortona**

In den letzten Jahren sind die Anforderungen an die elektrische Energieversorgung in Fahrzeugen extrem gewachsen. Beispielsweise ist die Generatorleistung in den letzten zwanzig Jahren um das zweieinhalbfache gestiegen und erreicht heutzutage in Oberklassefahrzeugen Spitzenwerte von 3 kW. Verantwortlich für diesen Anstieg sind der stetig wachsende Energiebedarf der Motorelektronik und immer leistungsfähigere Sicherheits- und Komfortsysteme, wie z.B elektrische Fensterheber und ABS. Dazu kommen konventionell mechanisch angetriebene Aggregate, wie z.B die Klimaanlage und die Servolenkung.

Heute wird die elektrische Energie für die Nebenaggregateversorgung mit Hilfe des „Alternators“ durch den Verbrennungsmotor bereitgestellt; der Wirkungsgrad erreicht dabei im optimalen Fall 20% (Kette: Brennstoff-Motor-Alternator-Batterie). Als Alternative wurde die Rekuperation für den Antrieb der Nebenaggregate untersucht mit der Ziel, den Kraftstoffverbrauch zu senken. Nach diesem Prinzip wird die kinetische Energie des Fahrzeugs während den Bremsphasen nicht mehr ausschliesslich in Wärme umgewandelt, sondern in einer Batterie gespeichert und später für die Versorgung der Nebenaggregate wiederverwendet. Das System ist im Bild A.4.1 schematisch dargestellt.

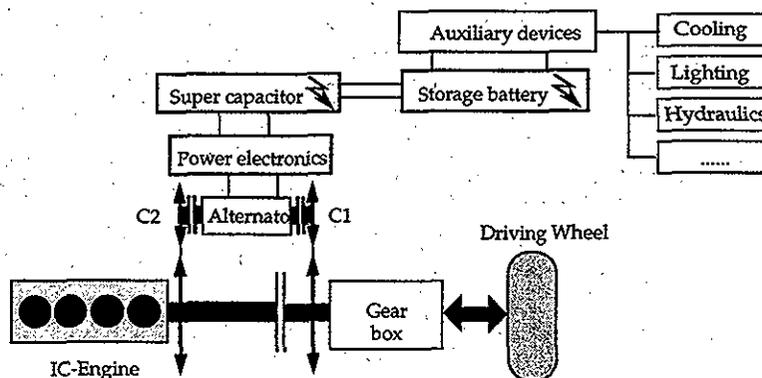


Bild A.4.1, Schematische Darstellung der Rekuperation für den Antrieb der Nebenaggregate

Die Möglichkeit, die recuperierte Energie für die Versorgung der Nebenaggregate anstatt für den Fahrzeugantrieb zu verwenden, hat sich als vorteilhaft gezeigt (siehe [12] und [P2]). Der Vorteil dieser Teilrekuperationsvariante liegt v.a. in der tieferen Systemmasse. Zu berücksichtigen sind ausserdem die hohen Kosten und die Komplexität, welche die Realisierung einer Rekuperationseinrichtung für den Fahrzeugantrieb mit sich bringen würde.

Mit der Rekuperation für das Antrieb der Nebenaggregate ist es möglich, eine deutliche Senkung des Treibstoffverbrauchs zu erzielen (zwischen 5 und 15% im Stadtzyklus, in Abhängigkeit von Anzahl und Leistung der mit recuperierter Energie versorgten Nebenaggregate).

Eine weitere Optimierung des Energiemanagements kann erreicht werden, indem traditionellerweise mechanisch angetriebene Nebenaggregate (z.B. Wasserpumpe oder Klimaanlage) durch elektrisch angetriebene ersetzt werden. Das steigert zwar die erforderliche elektrische Leistung, erlaubt es aber, die Drehzahl der Nebenaggregate von der Motordrehzahl zu entkoppeln und den Wirkungsgrad des Systems zu erhöhen. Als Beispiel dient die Möglichkeit, den thermischen Zustand des Motors während der Start-Phasen zu beeinflussen, indem im Kühlkreis eine elektrisch statt mechanisch angetriebene Wasserpumpe eingesetzt wird. In Bild A.4.2 ist für den PALOS Motor der gemessene Kaltstarttemperaturverlauf von Kühlwasser und Öl im Fall einer traditionellen mechanisch angetriebenen Wasserpumpe dargestellt. Der Betrieb bei niedrigen Temperaturen bringt eine höhere innere Reibung sowie höhere Emissionen mit sich (mit Erhöhung des Benzinverbrauchs). Im Fall einer elektrisch angetriebenen Wasserpumpe könnte der Motor in kürzere Zeit die korrekte Betriebstemperatur erreichen. Diese Möglichkeit wird in der nahen Zukunft am Prüfstand verifiziert werden.

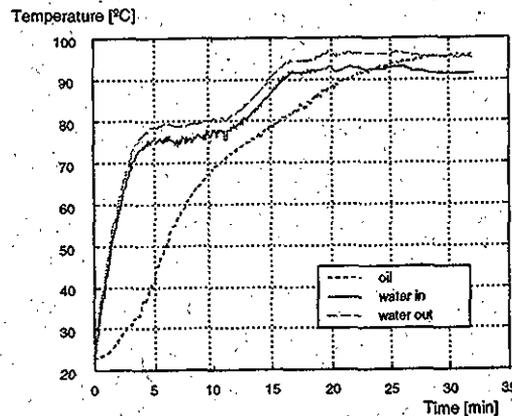


Bild A.4.2, Wasser- und Öltemperatur im PALOS Motor (2500 rpm, 2 bar pme) beim Kaltstart

Für eine erste Simulation des System wurden einfache Modelle der verschiedenen Komponenten erarbeitet. Für die Batterie wurde ein mathematisches Modell entwickelt, welches in [113] beschrieben ist. Der Generator wurde nach dem sog. Willans Ansatz modelliert, was eine allgemein gültige Beschreibung der elektrischen Maschine ermöglicht.

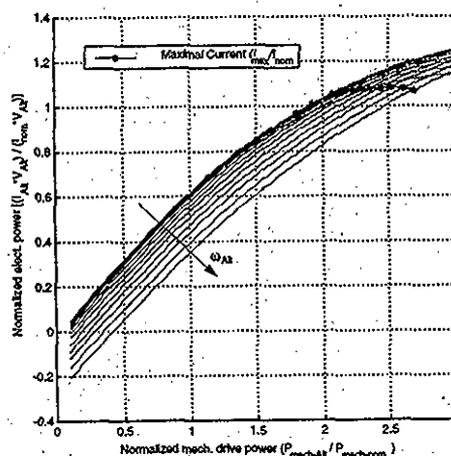


Bild A.4.3, Modellierung des Generators mit Hilfe des Willans Ansatzes

In der Zukunft sollen Strategien realisiert werden, die neben der Rekuperation für die Versorgung der Nebenaggregate auch zu einer Erhöhung des gesamten Systemwirkungsgrades führen. Das System wird teilweise realisiert und getestet werden (Hardware-in-the-Loop Simulation).

#### A.5 Aufbau eines Echtzeit-Regelsystems *XOberon* – R. Pfiffner

Um die im PALOS Projekt entwickelten Regelstrategien und Methoden am Prüfstand verifizieren zu können, wurde ein Echtzeit-Regelsystem entwickelt. Dieses System kann für verschiedene Steuerungen bzw. Regelungen gleichzeitig eingesetzt werden. Die PALOS Gruppe wird damit die Motorsteuerung, wie auch die Regelung des Druckwellenladers oder diverser Nebenaggregate implementieren.

Die bestehende kommerzielle Motorsteuerung muss ersetzt werden, da deren Regelalgorithmen nicht einsehbar bzw. Veränderbar sind. Um die Zündung und Einspritzung optimal ansteuern zu können, sind zudem spezielle Leistungsendstufen nötig. Diese wurden im Labor aufgebaut und bereits, zusammen mit dem *XOberon*-System, am Motor getestet. Die Hardware ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

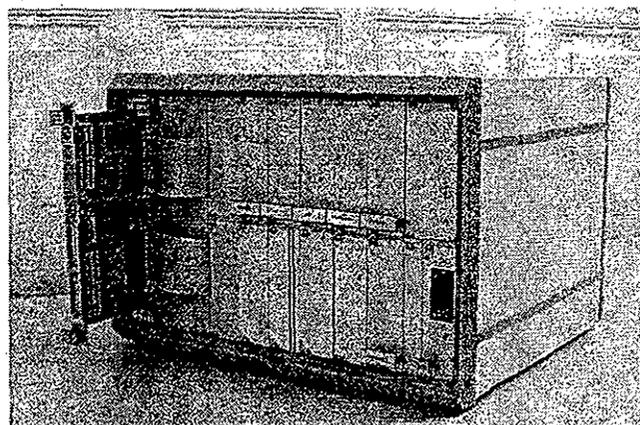


Bild A.5.1, Hardware des Echtzeit-Regelsystems *XOberon*

Es handelt sich hierbei um Motorola 68040 Rechnerkarten, die zusätzlich mit verschiedenen I/O-Modulen ausgerüstet wurden. Diese Hardware ist sehr kostengünstig und könnte auch in ein Fahrzeug eingebaut werden.

Das Echtzeitbetriebssystem *XOberon* wurde am Institut für Robotik der ETH Zürich entwickelt. Dieses Betriebssystem ist explizit im Hinblick auf Implementierungen von Echtzeitregelungen geschrieben worden und erlaubt eine schnelle und einfache Programmierung in der modernen und leistungsfähigen Programmiersprache *Oberon*.