

# Das SAVE-Motorkonzept



Von Lino Guzella und Roger Martin

Dieser Aufsatz stellt ein Motor- und Fahrzeugkonzept vor, das von der Wenko AG, Burgdorf, im Verlauf der letzten zehn Jahre entwickelt wurde. Erfahrungen im Rennsport zeigten, daß neben den beabsichtigten Leistungssteigerungen hochaufgeladene Ottomotoren auch niedrige Verbrauchswerte erzielen können. Davon ausgehend wurde eine konsequente Entwicklung in Richtung Hubraumreduktion und Hochaufladung durchgeführt. Das Ziel bestand darin, bei gleicher Nennleistung das Teillastverhalten des Antriebssystems spürbar zu verbessern. Eingebaut im SmILE-Fahrzeug wurden mit dem SAVE-Antriebssystem im Neuen Europäischen Fahrzyklus unter Einhaltung der EURO-III Emissionsnormen Verbrauchswerte von 3,5 l/100km gemessen, was einem mittleren Motorwirkungsgrad von 22 % entspricht.

## 1 Einleitung

Mobilität ist ein Grundbedürfnis aller Menschen, das im Einklang mit den natürlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen möglichst umweltschonend erfüllt werden muß. Bei der Bewertung vorgeschlagener neuer Möglichkeiten müssen dabei immer mindestens vier Problemkreise beachtet werden:

1. Kosten des Gesamtsystems
2. Fahrleistungen und Transportkapazität
3. Schadstoffemissionen

4. Treibstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß der gesamten Energiekette.

Ein neues Fahrzeugkonzept kann nur dann einen spürbaren ökologischen Nutzen haben, wenn es in allen vier Punkten überzeugende Lösungen anbietet. Das hier vorgestellte SAVE-Antriebssystem hat diesbezüglich ein großes Potential und ist zudem auf alle Fahrzeugklassen anwendbar. **Bild 1** zeigt qualitativ die Positionierung des SAVE-Konzepts relativ zu anderen heute diskutierten Alternativen. Obwohl es in einzelnen Kriterien vergleichbare Alternativen

gibt, stellt das SAVE-System gesamthaft betrachtet für die nächsten Jahre einer der interessantesten Ansätze dar. [1].

## 2 Das SmILE-Fahrzeug

Die Beurteilung eines neuen Antriebskonzepts erfolgt am eindrücklichsten durch Fahrversuche in einem Automobil. Zu diesem Zweck wurde in diesem Projekt – aufbauend auf einem Serienautomobil – in Kooperation mit den beiden Schweizer Firmen BRM-Design und Esoro das SmILE Fahrzeug

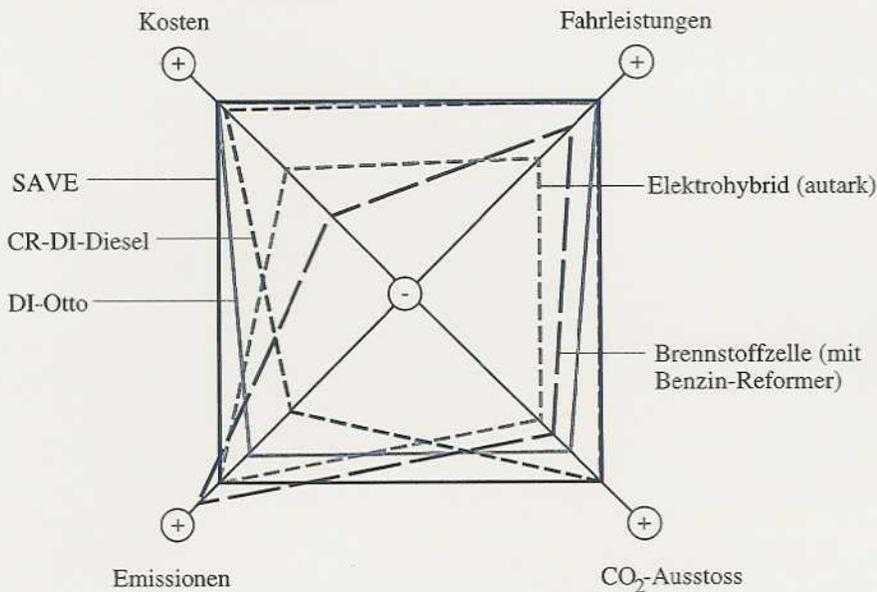


Bild 1: Qualitative Positionierung des SAVE-Konzepts, + = Vorteile, - = Nachteile  
 Fig. 1: Qualitative comparison of the SAVE approach, + = advantages, - = drawbacks

Parameter	Basisfahrzeug	SmILE
Masse $m_f$ <sup>2</sup>	950 kg	765 kg
Luftwiderstand $c_w A_f$	0,63 m <sup>2</sup>	0,48 m <sup>2</sup>
Rollreibung $c_r$	0,012	0,008
Energiebedarf <sup>3</sup>	34 MJ/100km	24 MJ/100km

<sup>2</sup> Leergewicht fahrbereit plus 100 kg Zuladung  
<sup>3</sup> Pro 100 km NEFZ, gemäß Abschätzung (1)

Tabelle 1: Fahrzeugparameter, Vergleich Basisfahrzeug und SmILE

Table 1: Vehicle parameters, comparison basic vehicle and SmILE

realisiert. Ohne Änderungen an den sicherheitsrelevanten Teilen wurden am Basisfahrzeug die in **Tabelle 1** gezeigten Verbesserungen vorgenommen, wobei keine „exotischen“ konstruktiven Änderungen oder Werkstoffe eingesetzt wurden. So wurde die Gewichtsreduktion etwa zur Hälfte durch den leichteren SAVE Motor erzielt.

Der Verbrauch eines Fahrzeugs hängt von seinem Bedarf an mechanischer Energie für die Bewältigung eines bestimmten Fahrprofils ab. Der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) ist heute üblich und wird auch hier verwendet. Da der NEFZ als Funktion der Geschwindigkeit über der Zeit relativ „eckig“ aufgebaut ist, lässt sich eine Abschätzung dieses Energiebedarfs für gegebene Fahrzeugschwerpunkte herleiten.

Aus (1) erkennt man, daß der SmILE knapp 30 % weniger mechanische Energie benötigt, um den NEFZ zu durchfahren. Man beachte, daß daraus keinesfalls die Schlußfolgerung gezogen werden kann, daß der Treibstoffverbrauch ohne Änderungen am Antriebssystem ebenfalls um 30 % abnimmt! Nur

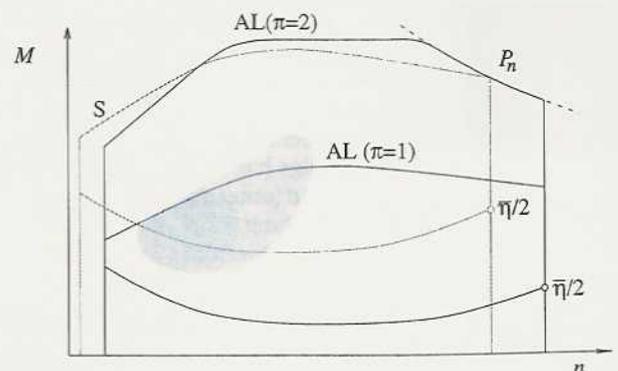
durch eine optimale Abstimmung zwischen Antrieb (Teillastoptimierung) und Fahrzeug wird dieses Potential ausgeschöpft.

### 3 Die Grundidee

Im Pkw-Bereich sind stöchiometrisch betriebene Ottomotoren weltweit vorherrschend. Diese Motoren weisen dank den geregelten Drei-Wege-Katalysatoren tiefe Schadstoffemissionen auf, sind kostengün-

Bild 2: Schematische Motorkennfelder, grau = Sauger (S), schwarz = aufgeladen (AL),  $\pi$  = Ladedruckverhältnis ( $\pi = 1$  Drosselklappe voll offen, siehe Abschnitt 6),  $\bar{\eta}$  = Spitzenwirkungsgrad

Fig. 2: Schematic engine map, gray = naturally aspirated (S), black = supercharged (AL),  $\pi$  = pressure ratio ( $\pi = 1$  WOT, cf. Section 6),  $\bar{\eta}$  = best efficiency



stig herstellbar und befriedigen die Kundenwünsche bezüglich Beschleunigungsvermögen. Ein Nachteil heutiger Ottomotoren ist ihr starker Wirkungsgradabfall, sobald sie deutlich unter ihrer Volllast betrieben werden. **Bild 2** zeigt schematisch ein Motorkennfeld, in dem als Funktion der Drehzahl  $n$  und des Drehmoments  $M$  die  $\bar{\eta}/2$  Wirkungsgradlinien eingetragen sind (halber Bestwirkungsgrad). In Testzyklen und auch im realen Betrieb werden heutige Ottomotoren oft im grauen Bereich betrieben, also bei deutlich schlechterem Wirkungsgrad als im Bestpunkt. Zwei Gründe sind für den Wirkungsgradabfall ausschlaggebend:

- Jeder Motor benötigt eine bestimmte Leistung, um seine Reibungsverluste zu kompensieren; das Verhältnis zwischen Nutz- und Reibungsarbeit ist bei kleiner Last schlechter als bei großer Last.
- Die Last wird bei stöchiometrisch betriebenen Ottomotoren durch eine Drosselung der Ansaugluft eingestellt; dieser Prozeß bewirkt große Drosselverluste.

Die erste Problematik läßt sich auch durch konstruktive Maßnahmen entschärfen (reibungsarme Ventiltriebe, Heißkühlung, Öl). Dieser Weg wird bei allen Motorweiterentwicklungen verfolgt, im Abschnitt 6 werden genauere Angaben zu den SAVE-spezifischen Ansätzen gemacht. Spürbar reduzieren sich die inneren Reibungsverluste zudem mit abnehmendem Hubraum, besonders bei kleinerer Zylinderzahl. Die bei quantitätsgesteuerten Viertaktmotoren entstehenden „Drosselverluste“  $P_D$  lassen sich wie in Gl. (2) gezeigt abschätzen. Diese Verluste können bei Konstantfahrt mit mäßigen Geschwindigkeiten die gleiche Größenordnung haben wie die zum Antrieb benötigten Leistungen. Mögliche Ansätze zur „Entdrosselung“ sind (Liste nicht abschließend):

- Abmagerung des Gemisches
- Beimischen von Abgas bei stöchiometrischem Frischgas
- Ventile mit vollvariablem Hub

- D) Hubraumverkleinerung und Drehzahl-erhöhung
- E) Hubraumverkleinerung und Aufladung (SAVE-Ansatz).

Mit diesen Verfahren wird pro Arbeitstakt weniger Brennstoff in den Zylinder eingebracht (und damit weniger Drehmoment erzeugt), ohne dabei den Saugrohrdruck abzusenken. Variante A) wird seit kurzem in direkt eingespritzten Ottomotoren und seit mehr als 100 Jahren erfolgreich in Dieselmotoren realisiert.

Wenn die Schadstoff-emissionen außer Acht gelassen werden können, sind solche qualitätsgesteuerte Verbrennungsmotoren (mit einem Vorteil zugunsten des Dieselmotors), vom thermischen Wirkungsgradstandpunkt aus betrachtet, eine gute Wahl. Variante B) wird bereits breit angewendet (vor allem zur Schadstoffreduktion), kann aber die Last nicht in ihrer vollen Bandbreite steuern. Variante C) wird seit längerem untersucht; daß der Durchbruch noch nicht gelungen ist, liegt wohl vor allem an technischen Problemen im Ventiltrieb. Variante D) benötigt automatische Getriebe mit großer Spreizung (am besten kontinuierlich variierbare) und mit sehr schnellen Verstellgeschwindigkeiten; trotzdem wird die Motordynamik kaum das Niveau heutiger Motoren erreichen.

Variante E) (schwarze Kurven in Bild 2) ist gemäß Gl. (2) interessant, da sie im ersten Term in Gleichung (2) keine Verschlechterung bewirkt (im Gegensatz zur Variante D) und gleichzeitig die anderen beiden Faktoren verkleinert.

Dank des kleineren Hubraums wird der Antrieb die meiste Zeit bei seiner „Saugvollast“ betrieben (schwarze Vollastlinie AL in Bild 2 und damit bei bereits guten Wirkungsgraden.

Natürlich erfüllt solch ein Motor ohne Zusatzmaßnahmen nicht die Kundenwünsche bezüglich Fahrdynamik; diese Drehmomentspitzen werden im SAVE-Ansatz durch Erhöhung des Saugrohrdrucks abgedeckt.

Um die angestrebten Verbrauchseinsparungen zu erzielen, muß der Hubraum stark reduziert werden, was entsprechend hohe Ladedruckverhältnisse zur Folge hat. Dies wirft natürlich einige Fragen auf (unter anderem Ansprechverhalten, Regelung, Klopfen usw.), die im weiteren diskutiert werden sollen.

### 4 Das SAVE-System

**Bild 3** zeigt das SAVE-Motorsystem beispielhaft an einem Dreizylindermotor. Man erkennt drei Steuergrößen. Die Benzineinspritzung ist an die Luftmenge gekoppelt und wird deswegen nicht weiter betrachtet, ebenso der Brenner/Lüfter, der nur beim Kaltstart eingesetzt wird:

1. „Normale“ Drosselklappe DK1, übernimmt die Laststeuerung für tiefe Drehmomente (Leerlauf bis ca. etwa 50 %, in Bild 2 zwischen 0 und  $\pi = 1$ ).
2. Variable Gastaschenezuführung (VGTZ), steuert die hohen Lasten (in Bild 3, zwischen  $\pi = 1$  und  $\pi = 2$ ).
3. Zusatzdrosselklappe DK3, steuert die Spülluftmenge.

Die Steuerung der Aufladung eines Druckwellenladers (DWL) erfolgt ähnlich wie bei einem Abgasturbolader mit Waste-gate, indem ein Teil des Abgases am Druckprozeß vorbeigeführt wird. Um den Spülvorgang trotzdem sicherzustellen, wird eine „Variable Gastaschenezuführung“ eingesetzt, die das Abgas zwar am Hochdruckprozeß vorbeileitet, nicht aber am Spülprozeß. Die Abgasreinigung hängt beim SAVE-Konzept eng mit der Aufladung zusammen. Da ein DWL dem Abgas im Spülprozeß Frischluft beimischt, ergibt sich daraus ein neuer Ansatz, wie die Abgasreinigung noch effizienter gestaltet werden kann. Der erste Katalysator arbeitet im unteren und mittleren Lastbereich bis etwa 20 bar Mitteldruck als Drei-Wege-Katalysator, also mit einem stöchi-

metrischen Gemisch. Dank seinem motor-nahen Einbau erreicht er sehr schnell seine „light-off“-Temperatur. Bei hohen Lasten wird zur inneren Kühlung das Gemisch angefettet. Die  $\text{NO}_x$ -Reduktionsstufe im ersten Katalysator arbeitet dann sehr effizient, allerdings bleiben HC und CO im Rauchgas unoxidiert. Dank der DWL-Überspülung werden diese Schadstoffe aber im zweiten Katalysator oxidiert, wobei die Regelung mit Hilfe der Drosselklappe DK3 für optimale Temperaturbedingungen sorgt. Das SAVE-System ermöglicht demzufolge eine effiziente Konversion der Abgasschadstoffe vom Motorstart bis zur Nennleistung auch ohne Abgarrückführung.

Bei den Katalysatoren handelt es sich um zwei kommerziell erhältliche Metallkatalysatoren, die beide mit einer Trimetallbeschichtung (Pt:Pd:Rh = 0:14:1) mit 100 g/ft<sup>3</sup> versehen sind. Die im Kapitel 7 aufgeführten Resultate zeigen, daß mit optimierten Beschichtungen und verbesserter Motorelektronik die mutmaßlichen EURO-IV oder die ULEV Normen problemlos eingehalten werden können.

### 5 Aufladung

Ungewohnt am SAVE-Konzept erscheint auf den ersten Blick die Verwendung eines Druckwellenladers (DWL). DWL wurden, mit Ausnahme einer Rennsportvariante, bisher nur an Dieselmotoren eingesetzt. Mazda produzierte zirka 150.000 Personenwagen mit Dieselmotoren und DWL [3]. Die beim

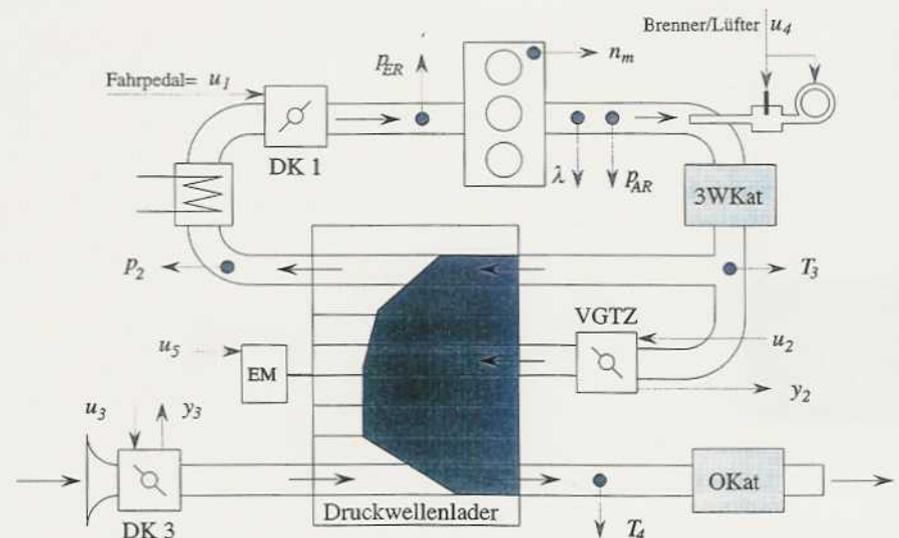


Bild 3: Darstellung des SAVE-Antriebsystems, VGTZ = Variable Gastaschenezuführung, 3WKat = Drei-Wege-Katalysator, OKat = Oxidations-Katalysator, EM = Elektromotor

Fig. 3: Schematic of the SAVE power system, with VGTZ being the variable gas pocket intake, 3W Kat being the three-way catalytic converter, OKat the oxidation catalyst, and EM the electric motor

SAVE-Antrieb eingesetzten DWL unterscheiden sich jedoch stark von den damaligen Systemen, insbesondere in Bezug auf das Verhalten bei kleinen Motordrehzahlen.

Die Wahl eines DWL erfolgte nach sechs Jahren erfolgloser Versuche Abgasturbolader (ATL) oder mechanische Lader (ML) einzusetzen. Weder ATL noch ML können bei kleinen Hubräumen (unter einem Liter) und den entsprechend hohen Ladedrücken (mehr als 2 bar) befriedigend eingesetzt werden:

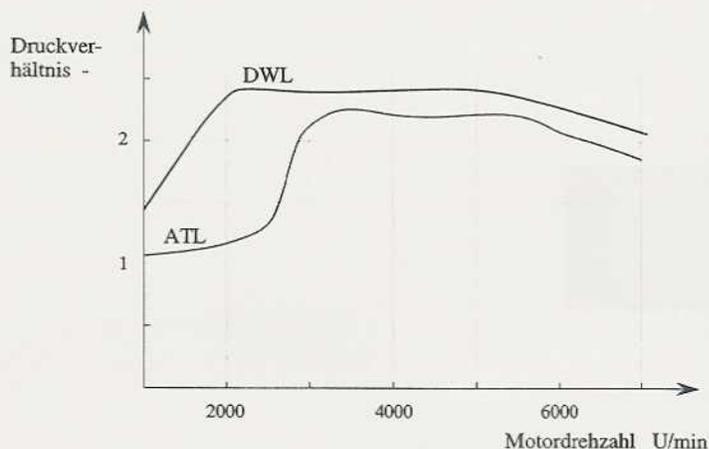
- Bei mechanischen Ladern steigt die Lärmentwicklung bei hohen Ladedrücken übermäßig an und die Antriebsleistung ist so hoch, daß Probleme beim Zuschalten des Laders entstehen und der Verbrauchsvorteil des reduzierten Hubraums wieder zum großen Teil zunichte gemacht wird.
- Bei Abgasturboladern ist sowohl das dynamische Verhalten wie auch das statisch maximal mögliche Druckverhältnis für kleinvolumige hochaufgeladene Motoren unbefriedigend; zudem verschlechtert sich aufgrund der erhöhten Strömungs- und Spaltverluste der Wirkungsgrad des ATL drastisch. Probleme ergeben sich auch wegen den extrem hohen Laderdrehzahlen und Temperaturen.

**Bild 4** zeigt das statische Verhalten eines speziell für Kleinmotoren entwickelten, sehr kleinen Turboladers und eines entsprechenden DWL. Man erkennt, daß unter 3000U/min beim ATL praktisch kein Ladedruck erzeugt wird, während beim DWL schon knapp über 2000U/min der volle Ladedruck zur Verfügung steht. Würde man das transiente Verhalten betrachten oder wäre der ATL etwas größer dimensioniert (Lebensdauer- und Höhenreserve), so wäre der Unterschied noch augenfälliger. Mit dem DWL hingegen können überzeugende Ergebnisse sowohl in Bezug auf Fahrleistungen als auch in den Emissionswerten erzielt werden (die physikalischen Grundprinzipien von DWL können zum Beispiel in [2] nachgelesen werden). Der mechanische Aufbau eines DWL ist einfach; die Lagerung des Rotors ist lebensdauer geschmiert und die maximale Drehzahl liegt, je nach Auslegung, bei rund 20.000U/min. Da die Rotation des DWL nur zur Synchronisation der gasdynamischen Vorgänge dient, ist die Antriebsleistung deutlich unter 100 W, so daß ein elektrischer Antrieb möglich ist, was Vorteile beim Motoranbau und bei der Abstimmung ergibt. Die Vorteile des DWL sind bekannt:

- extrem schnelles Ansprechverhalten (einige 10 ms Verzögerungszeiten)
- hohe Ladedrücke bereits bei kleinen Mo-

**Bild 4:** Vergleich des statischen Vollastkurven zwischen einem kleinen Abgasturbolader und einem Druckwellenlader (elektronisch begrenzt) am SAVE-Motor

*Fig. 4: Static full load curves of a small TC engine and the SAVE engine with an electronically limited PWSC*

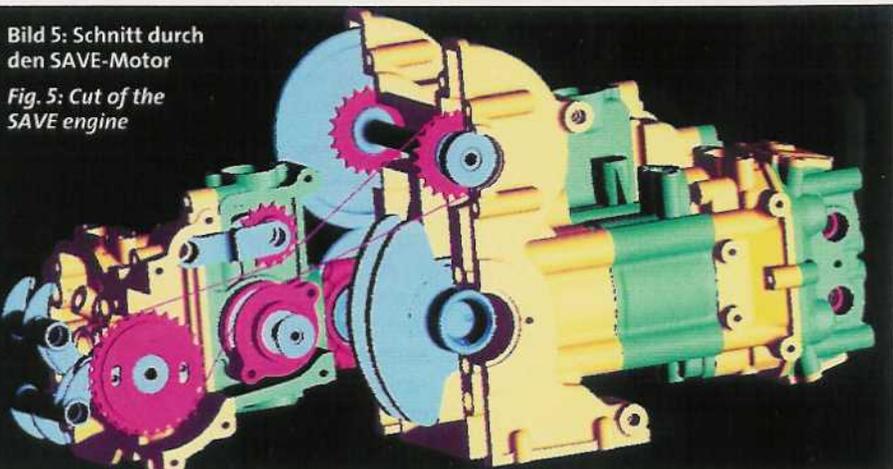


- tordrehzahlen oder Abgasmassenströmen (2 bar bei 1700U/min werden heute mit einem 360 ccm Motor erreicht)
- positive Druckdifferenzen über dem Motor in den meisten Betriebszuständen
- große Höhenreserven und keine Überdrehzahlprobleme
- keine problematische mechanische und thermische Belastung bei hohen Drücken
- starke Dämpfung des Motorgeräusches durch den drehenden Multizellenrotor. Im SmILE konnten deswegen allein mit einem Absorptionsschalldämpfer die Schweizer Vorschriften unterschritten werden (69,5 dB (A)).

Die bei Dieselmotoren problematische Rezirkulation des Blow-by sowie die Reinigung des Aktivkohlekanisters sind bei Ottomotoren heute problemlos auf der Frischluft-Niederdruckseite möglich. Auch die Eigengeräusche sind durch neue asymmetrische Zellengeometrien vernachlässigbar. Probleme beim Kaltstart mit (ungewollter) Ab-

- gasrezirkulation konnten durch den Einsatz neuer Steuerorgane und präziser Regelungen entschärft werden. Die eigenen DWL Weiterentwicklungen der letzten drei Jahre haben, ausgehend vom Stand 1995, die folgenden Verbesserungen erbracht:
- Steigerung des Druckverhältnisses bei tiefen Drehzahlen um den Faktor 2 (von  $\pi = 1,2$  auf 2,4 bei 2000/min).
- Absenkung des bereits tiefen Geräuschniveaus im gesamten Kennfeld zwischen 8 und 15 dB (A)
- Verbesserung des Kompressionswirkungsgrades bei mittleren und höheren Drehzahlen.

Dem gegenüber wurde in einem vorgängigen zweijährigen Entwicklungsprojekt eines speziell kleinen Turboladers in Zusammenarbeit mit einem führenden Turboladerhersteller praktisch keine Verbesserung erzielt. Das maximale Druckverhältnis bei Motordrehzahlen um 2000/min konnte nicht über 1,25 gesteigert werden (ausgehend von einem Wert von 1,1).



**Bild 5:** Schnitt durch den SAVE-Motor

*Fig. 5: Cut of the SAVE engine*

### 6 Konstruktiver Aufbau

Beim SAVE-Motor, **Bild 5**, handelt es sich um ein Zweizylinder Boxeraggregat, das mit Reihen- oder V-Motoren mit Ausgleichswellen bei gleicher Zylinderzahl sowohl im Reibungsverhalten als auch in den Kosten durchaus vergleichbar ist. Die Laufruhe ist natürlich allen anderen Zweizylinderkonzepten überlegen. Die Kurbelwelle treibt über ein Zahnrad eine Zwischenwelle an, die ihrerseits über Zahnräder und Ketten die beiden oberliegenden Nockenwellen antreibt. Die Ventile werden reibungsarm über rollengelagerte Kipphebel betätigt. Der Motor ist so aufgebaut, daß die Gußteile für die rechte oder die linke Seite einfach angepaßt werden können. Weitere Motordaten sind in **Tabelle 2** zusammengefaßt. Der Motor wurde von Anfang an auf geringe Reibungsverluste ausgelegt. So ist einzig die Kurbelwelle gleitgelagert und druckgeschmiert. Alle anderen rotierenden Teile sind rollen- oder nadelgelagert und spritzölgeschmiert. Nur für den Abtrieb der Kurbelwelle und für die Wasserpumpe mußte eine Öffnung in das Kurbelgehäuse (und somit eine Abdichtung mit Radialwellendichtringen) vorgesehen werden. Aus Emissionsgründen und wegen den hohen Mitteldrücken entsprechen die Kolben sowohl in der Anzahl der Kolbenringe als auch in der Länge den heute bei Turbomotoren üblichen Ausführungen.

Der Motor wurde aufgrund der bestehenden langjährigen Erfahrung mit hochaufgeladenen Motoren an die erhöhten Belastungen angepaßt. Die auftretenden Kolbengeschwindigkeiten und -beschleunigungen sowie die Belastungen des Kurbeltriebs stellen keine besonderen Festigkeitsprobleme und sind nicht höher als bei heute seriemäßig eingesetzten aufgeladenen Motoren. Durch die hohen Literleistungen hingegen treten ungewohnte thermische Belastungen auf, die eine speziell dimensionierte Kühlung des Zylinderkopfes erfordern. Damit konnten zudem das Reibungsverhalten und auch die Vollast-beziehungsweise die Klopfestigkeit verbessert werden. Aus Kostengründen konnten bisher noch keine Vollastdauerläufe durchgeführt werden, doch sind nach bisher rund 50.000 km im Fahrzeug und mehreren hundert Prüfstandsstunden noch keine mechanischen Schäden am Motor aufgetreten. Bei den Kosten für ein solches Konzept ist es wichtig, das ganze System und nicht die Einzelkomponenten zu betrachten. Leichtere und kleinere Aggregate benötigen weniger aufwendige Verankerungen, geringere und da-

Tabelle 2: Motorparameter des SAVE-Motors, Stand 1998

Table 2: Engine parameters of the SAVE engine (as of 1998)

Ottomotor, Zylinderhubraum 179 cm <sup>3</sup> , B/H = 65/54 mm
2 Zylinder in Boxeranordnung, je 2 Ein- und Auslaßventile
Motorgehäuse und Zylinderkopf aus Aluminium gegossen
Baugleiche Teile für rechten und linken Zylinder
Obenliegende Nockenwelle, Viertaktverfahren, Saugrohreinjection
Ventiltrieb über Rollenkette und Rollenkippebel
Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 9$
Maximal erreichbares Ladedruckverhältnis <sup>4</sup> $\pi > 3$
Nennleistung 40 kW (bei 5500/min)
Nenn Drehmoment 75 Nm (bei 3000/min) <sup>5</sup> (26 bar Mitteldruck)
Trockengewicht mit allen Anbauaggregaten inkl. Lader 38 kg

<sup>4</sup>Elektronisch begrenzt auf  $f_p = 2,4 \dots 2,5$   
<sup>5</sup>Korrigiert nach ECE-Normen

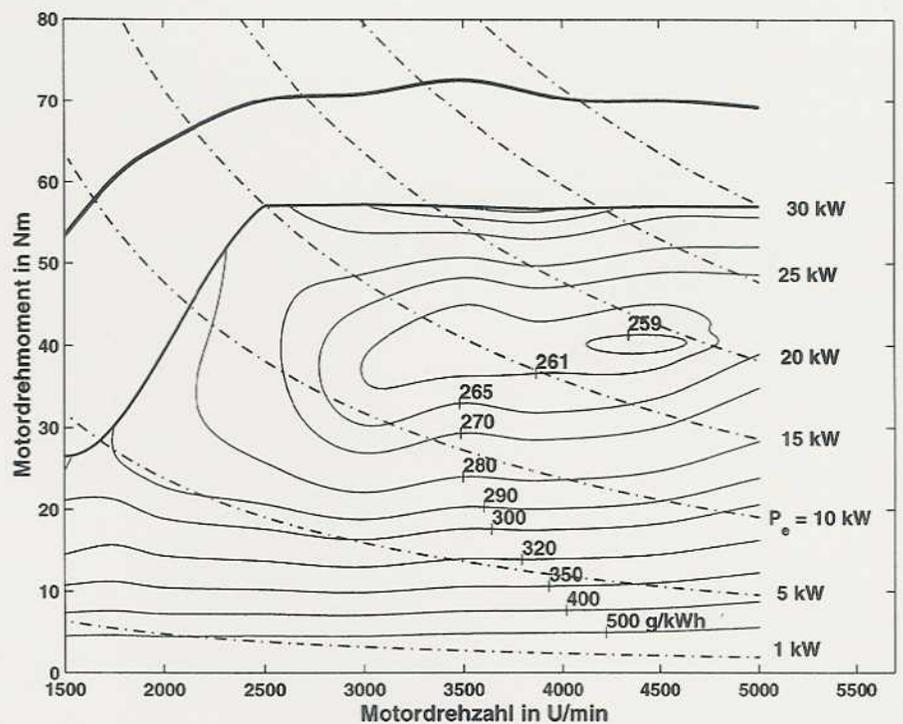


Bild 6: Motorkennfeld des SAVE-Motors, Verbrauchsangaben Stand 1996 (Messungen ETH), Vollastkurve Stand 1998 (Verbrauchswerte 5 bis 7 % verbessert)

Fig. 6: Engine map, consumption contour as of 1996 (measurements at ETH), max. torque as of 1998 (consumption 5-7 % improved)

mit kostengünstigere Maßnahmen zur Lärmdämpfung (mit DWL) und haben eine Vielzahl von positiven „Sekundäreffekten“ zur Folge (kleinere Tanks, Anlasser, Batterien etc.). Im Gegensatz zu anderen Konzepten wie TDI, GDI oder gar Hybrid- oder Brennstoffzellen-Fahrzeuge dürften somit beim SAVE-System keine oder nur geringe Mehrkosten gegenüber heutigen Lösungen entstehen.

### 7 Resultate

**Bild 6** zeigt das Kennfeld eines SAVE-Motors. Die Verbrauchsangaben entsprechen dem technischen Stand 1996, wie er an der ETH 1997 ausgemessen wurde. Die Vollast wurde dabei künstlich begrenzt. Diese Messungen wurden auf einem Standardprüfstand gemäß den geltenden Normen durchgeführt. Das Gemisch wurde manuell eingestellt ( $0,88 \leq \lambda \leq 1$ ) und der Zündzeitpunkt

auf MBT bzw. Klopfgrenze. Die Klopfkennung erfolgte mittels Zylinderdrucksensoren. Als Kraftstoff wurde bleifreies Benzin (ROZ nominal 95) verwendet; Dichte bei 20 °C 747,4 kg/m<sup>3</sup>, Massenanteile C = 85,62 %, H = 13,77 %, bzw. O<sub>2</sub> = 0,7 %.

Die erzielten Fortschritte beruhen auf Verbesserungen beim Druckwellenlader, in den Steuerzeiten, beim Einlaßreceiver etc. Die Verbände konnten dadurch ebenfalls reduziert werden (5–7 % in verbrauchsrelevanten Betriebspunkten).

Bild 6 zeigt den Unterschied zu „klassischen“ Ottomotoren: statt den Bestverbrauch bei hohen Lasten anzustreben, wird im SAVE-Motor eine breite „Minimal-Verbrauchsinsel“ bei den im Alltag und im NEFZ relevanten Betriebspunkten erreicht. Bei höheren Lasten nimmt der Wirkungsgrad wieder leicht ab. Gründe hierfür sind unter anderem Gemischanfettung und „später“ Zündwinkel wegen Klopfgefahr. Da diese Betriebszustände für den durchschnittlichen Einsatz nicht bestimmend sind, ergeben sich aber gesamthaft betrachtet deutliche Verbrauchseinsparungen.

Mit der neusten Motorvariante wurden im April 1998 bei der EMPA Dübendorf (analog zum deutschen TÜV) Messungen mit dem EURO-III-Zyklus durchgeführt. Die Resultate sind in der Tabelle 3 aufgeführt. Die deutlichen Reserven lassen ein Potential für schärfere Emissionsnormen erkennen: sowohl die D3- als auch die EURO-IV-Norm sind problemlos erfüllbar, **Bilder 7 und 8**. Der gemessene CO<sub>2</sub>-Ausstoß schließlich erfüllt klar die Anforderungen an ein „Drei-Liter-Auto“.

Neben dem Verbrauch und den Emissionen, ist natürlich auch die Fahrbarkeit ausschlaggebend für die Kundenakzeptanz. Das dynamische Verhalten des Motors auf einen rampenförmig ansteigenden Drehmomentwunsch zeigt **Bild 9**. Man erkennt, daß zwischen dem Sollmoment (aus der Stellung des Gaspedals abgeleitet) und dem aktuellen Ladedruck bei höheren Drehzahlen eine vernachlässigbare Zeitverzögerung von etwa 0,1 s auftritt. Ähnlich gute Antworten werden mit der aktuellen SAVE-Variante in allen relevanten Betriebszuständen und Motortemperaturen erreicht.

### 8 Schlußbemerkungen

Das in diesem Aufsatz vorgestellte SAVE-Konzept ermöglicht es, den Kraftstoffverbrauch von Automobilen bis hin zur oberen

Tabelle 3: Testresultate EMPA-Dübendorf, Stand Mai 1998

Table 3: Test result as of May 1998 at EMPA

Emission	Messwert	DF <sup>1</sup>	Endergb.	Grenzwert	% vom Grenzwert
CO (g/km)	0,2628	1,2	0,32	2,3	14 %
HC (g/km)	0,0694	1,2	0,08	0,2	40 %
NO <sub>x</sub> (g/km)	0,0915	1,2	0,11	0,15	74 %
CO <sub>2</sub> (g/km)	81,800	–	–	90 <sup>8</sup>	91 %

<sup>1</sup> 2-Rollenprüfstand, Schwungmasse 740 kg, Einstellung 74 N (Fa 50), EURO-III-Zyklus, d.h. ohne 40 s Leerlauf vor dem Test  
<sup>7</sup> Berücksichtigung Alterungseffekte  
<sup>8</sup> 90 g/km gelten als inoffizieller Grenzwert für ein „3-Liter-Auto“

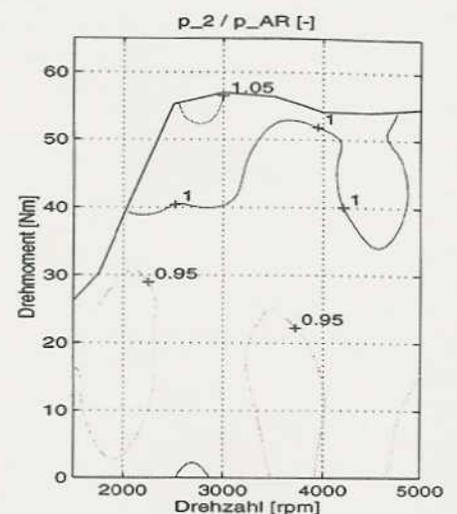
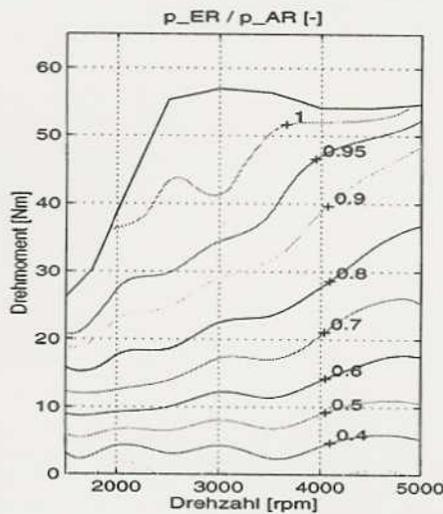


Bild 7: Druckverhältnisse (Stand 1996), Definitionen siehe Bild 4

Fig. 7: Pressure ratios (as of 1996), definitions see Fig. 4

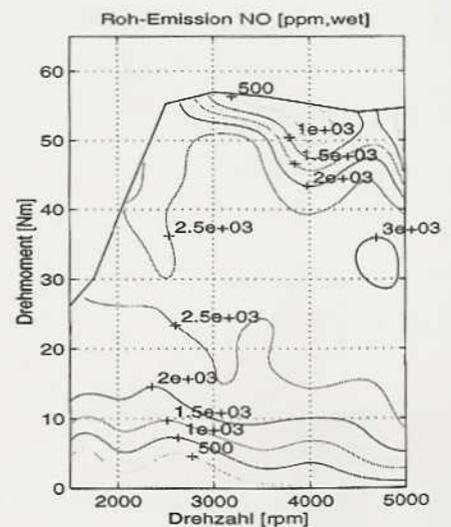
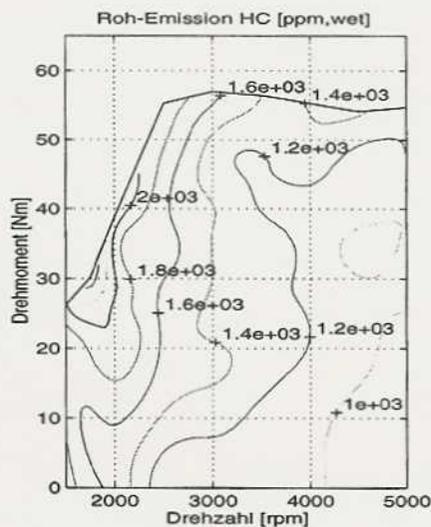


Bild 8: Rohemissionen des SAVE-Motors (Stand 1996)

Fig. 8: Engine out pollutant emission (as of 1996)

Mittelklasse spürbar zu reduzieren, ohne Verschlechterungen bei Fahrleistungen, Komfort oder Emissionen hinnehmen zu müssen. Der Ersatz heutiger Otto-Saugmotoren durch hochaufgeladene Motoren mit

reduziertem Hubraum macht die Fahrzeuge nicht nur sparsamer, sondern wegen der besseren Gewichtsverteilung auch fahraktiver. Zudem entstehen wegen dem geringeren Platzbedarf des Antriebs für das De-

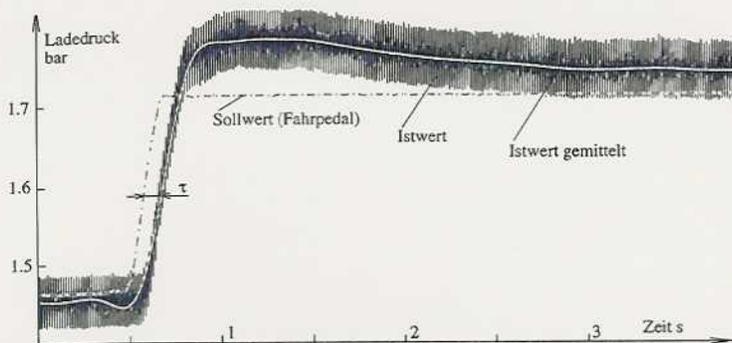


Bild 9: Antwortverhalten des SAVE-Motors auf eine Vollastbeschleunigung bei 4000/min  
Fig. 9: SAVE system torque response at 4000 rpm

$$E = 19.000 \cdot c_w \cdot A_f + 860 \cdot c_r \cdot m_f + 12,7 \cdot m_f \text{ kJ / 100 km NEFZ}$$

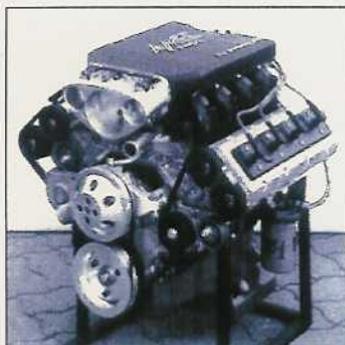
$$c_w \cdot A_f = \text{Luftwiderstandsbeiwert} \times \text{Frontfläche, in } m^2 \quad (1)$$

$$c_r \cdot m_f = \text{Rollreibungskoeffizient} \times \text{Fahrzeugmasse, in kg}$$

$$P_D \approx \frac{n}{2} \cdot V_h \cdot (p_0 - p_m)$$

$$n = \text{Motordrehzahl in U/s, } V_h = \text{Hubraum in } m^3 \quad (2)$$

$$p_0 - p_m = \text{Druckdifferenz über Motor in Pa}$$



**Es müssen  
ja nicht  
immer gleich  
500 PS sein!**

Wenko AG swissauto entwickelt Verbrennungsmotoren für alle Anwendungen – vom Design bis zum fertigen Prototypen. Neue Ideen, Effizienz und Zuverlässigkeit stehen dabei im Mittelpunkt unserer Entwicklungstätigkeit. Unsere grosse Erfahrung auf dem Gebiet von hoch aufgeladenen Motoren und von Aufladeaggregaten aller Art wird auch Ihr Projekt weiterbringen.

Überzeugen Sie sich persönlich von unseren Ideen und unserem Know-how:

Wenko AG swissauto  
Industrie Buchmatt  
CH-3400 Burgdorf



Tel.: +41 34 426 66 66  
Fax: +41 34 426 66 69  
swissauto@bluewin.ch  
www.swissauto.com

sign und die Sicherheit neue Möglichkeiten. Die in den letzten Jahren stetig ansteigende Gewichtsspirale kann damit gestoppt werden: reduzierte Verbräuche ermöglichen kleinere Tanks, Motoren mit reduzierter Reibung benötigen kleinere Anlasser und damit kleinere Batterien etc. Es ist klar, daß bis zu einer Serienreife dieses Konzepts noch Entwicklungsarbeit nötig ist. Die Automobilhersteller sind sicher fähig und motiviert, solche oder ähnliche sparsame Antriebe und Fahrzeuge zu entwickeln und dem Markt anzubieten. Solange aber diese Automobile nicht gekauft werden, bleiben alle Anstrengungen fruchtlos. Der Markt entscheidet aber vor allem anhand von ökonomischen und nicht von ökologischen Kriterien. Das SAVE-System möchte einen möglichen Ausweg aus dieser Sackgasse aufzeigen.

### Literaturhinweise

- [1] Reinhard: The Assessment of Fuel Cells in Transport from the Environmental Point of View, „Commercialising Fuel Cell Vehicles '97“, Frankfurt, October 1997
- [2] Gyarmathy, G.: How does the COMPREX Pressure-Wave Supercharger Work. SAE 830234, 1983
- [3] Tatsutomi Y., Yoshizu K.; and Komagamine M.: Der Dieselmotor mit Comprex-Aufladung für den Mazda 626. In: MTZ 51 (1990) Nr. 3

Die in diesem Artikel beschriebenen Ideen und Prototypen wurden von H. P. Götti, H. R. Jenny, B. Kohler, R. Martin und U. Wenger, WENKO AG, Burgdorf entwickelt. Die Ladedruckregelung und Steuerung und einige Berechnungen bzw. Messungen stammen von A. Amstutz, E. Cortona, R. Pfiffner, P. Soltic und F. Weber, ETH Zürich.

### Die Verfasser

Prof. Dr. Lino Guzzella ist ausserordentlicher Professor für Motorsysteme im Departement Maschinenbau und Verfahrenstechnik der ETH Zürich.



Automobil Ing. HTL Roger Martin ist Leiter des SAVE-Projekts bei der Firma WENKO AG, Burgdorf.



**MTZ**



You can read the English version of this article in **MTZ worldwide**.

Subscription Hotline:  
++49 / 6 11 / 78 78 151