Der Verbrennungsmotor im Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie

Autor(en): **Eberle, Meinrad K.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 33/34

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75509

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Der Verbrennungsmotor im Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie

Von Meinrad K. Eberle, Zürich

Der Verbrennungsmotor wird bis mindestens zu Beginn des nächsten Jahrhunderts die dominante Antriebsquelle für Fahrzeuge zu Lande wie zur See bleiben. Die Anforderungen an Strassenfahrzeuge bezüglich Ökonomie und Ökologie sind – unter Voraussetzung einer weit vorausschauenden Gesetzgebung – ohne Einbusse an Mobilität und unter Wahrung der Verhältnismässigkeit von Aufwand und Ertrag durchaus erfüllbar.
Das Verbrennen nicht erneuerbaren und in ferner Zukunft knapp werdenden Erdöls führt zu einer nicht zu vernachlässigenden Umweltbelastung. Hier ist zu zeigen, dass die heutigen Ansprüche bezüglich Ökonomie wie auch Ökologie sehr wohl befriedigt werden können. Bewusst ist nur von den technischen Lösungen für die Zeit bis zum Beginn des nächsten Jahrhunderts die Rede. Spektakulärer wäre es zwar, denkbare technische Möglichkeiten der fernen Zukunft zu diskutieren, doch mit grösster Wahrscheinlichkeit wird keine dieser Varianten, z.B. Wasserstoff, die heutige Lage massgebend beeinflussen. Das Hoffen auf morgen löst die heutigen Aufgaben nicht. Doch sollen auch nicht kurzfristige Sofortmassnahmen erläutert werden – so gut sie gemeint sind, bleibt ihre Wirksamkeit doch eher bescheiden. Eine langfristig angelegte und ausgewogene Politik ist deshalb vorrangig; der Planungshorizont der Technik muss relativ weit in die Zukunft gesetzt werden.

Unter Ökonomie ist hier einerseits unmittelbar der thermische Wirkungsgrad einer Maschine verstanden, anderseits jener des Gesamtsystems bis hin zur Frage des Primärenergieverbrauchs. Mit Ökologie ist die Umweltbelastung durch Abgasemissionen angesprochen; die Fragen des Lärms mitzubehandeln würde hier den Rahmen sprengen.

Die dargestellten Beispiele sind zum Teil das Ergebnis eines Gedankenaustausches mit Firmen wie Gebrüder Sulzer AG, Brown Boveri AG, General Motors Research Laboratories und Mobil Oil, um nur einige zu nennen. An dieser Stelle sei für die Unterstützung gedankt. Die dargelegten Aussagen geben nicht zwangsläufig die Meinungen der erwähnten Firmen wieder.

Verbreitung des Verbrennungsmotors

Der Verbrennungsmotor weist Vorteile auf wie

- hohen thermischen Wirkungsgrad über einen vergleichsweise grossen Betriebsbereich,
- grosse Leistungskonzentration (einschliesslich Brennstoffenergiedichte),
- extreme Flexibilität,
- niedrigen Preis.

Solche Eigenschaften führten zu seiner heute grossen Verbreitung, doch seien seine heutigen Nachteile nicht verschwiegen

- Umweltbelastung mit Schadstoffen und Lärm,
- weitgehende Verwendung nicht erneuerbarer Energie.

Thermischer Wirkungsgrad – Stand der Technik und Aussichten

Grossdieselmotoren bis zu Einheitsleistungen von 40 MW (2-Takt) weisen heute effektive thermische Wirkungsgrade von über 50 Prozent auf – dies als einfache Maschinen. Ähnliche Werte erreichen nur kombinierte Dampf-Gasturbinenanlagen mit einem höheren Komplexitätsgrad. Im Vergleich zum Gasturbinenprozess zeigt eine Analyse des Verbrennungsmotorprozesses, dass er einen ausgezeichneten Kompressions- und Expansionswirkungsgrad aufweist und in dieser Art den sehr guten Gesamtwirkungsgrad erreicht. Der Grund liegt also nicht allein in der hohen Prozesstemperatur, bei der die Wärme zugeführt wird.

Bild 1 zeigt einen Ausschnitt aus einer Grenzpotentialbetrachtung für langsamlaufende 2-Takt- und mittelschnelllaufende 4-Takt-Dieselmotoren (Sulzer). Erreicht der Multiplikator k_η den Wert 1, so sind für den betrachteten Parameter (Mitteldruck, maximaler Verbrennungsdruck usw.) die besten Verhältnisse bezüglich des thermischen Wirkungsgrades der Maschine erreicht. Die unschraffierten Flächen entsprechen etwa dem Stand der Technik, das Gebiet der hellen Schraffur ist realisierbar, und im Bereich der dunklen Schraffur sind Massnahmen wenig sinnvoll bzw. nicht realisierbar.

Mit aller Deutlichkeit zeigt das Bild 1, dass ausser der Mitteldruckabsenkung (bei konstantem maximalem Verbrennungsdruck) und der Erhöhung des maximalen Verbrennungsdruckes nur noch sehr geringe Reserven zur Wirkungsgradverbesserung dieser Motortypen vorhanden sind. Die scheinbar grossen Potentiale «mechanischer Wirkungsgrad» und «Wandwärmeverluste» sind nur sehr schwer realisierbar; für den letzteren Fall gibt Bild 2 eine Idee der möglichen Gewinne eines adiabaten (wärmeisolierten) Motors, gezeigt am Beispiel eines hochaufgeladenen 2-Takt-Dieselmotors. Wenn durch die Brennraumwände hindurch keine Wärme nach aussen gelangt, steigt der thermische Wirkungsgrad, und gleichzeitig nimmt der Energieinhalt der Abgase zu (im Bild 2 ist die Differenz $Q_{Gas} - Q_{Luft}$, relativ zur Brennstoffwärme, aufgetragen). Die Ergebnisse sind verschieden, je nachdem, ob der Grenzfall des differentiell adiabaten (kein Wärmeaustausch zwischen Zylinderfüllung und Wänden während des Arbeitsspiels) oder des integral

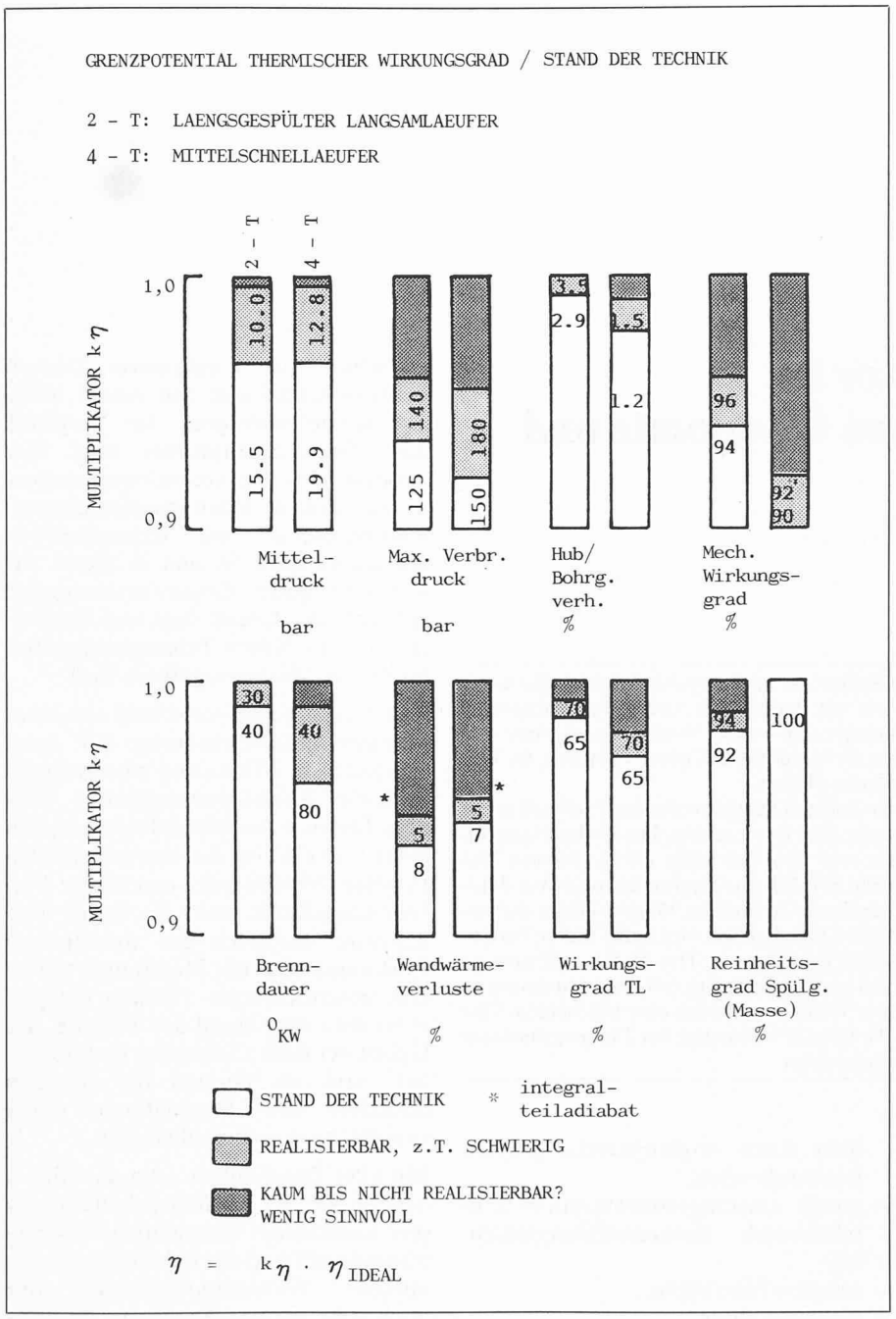


Bild 1. Grenzpotential grosser Dieselmotoren

Bild 2. Wärmebilanz adiabater Grossdieselmotor (2-Takt-Diesel)

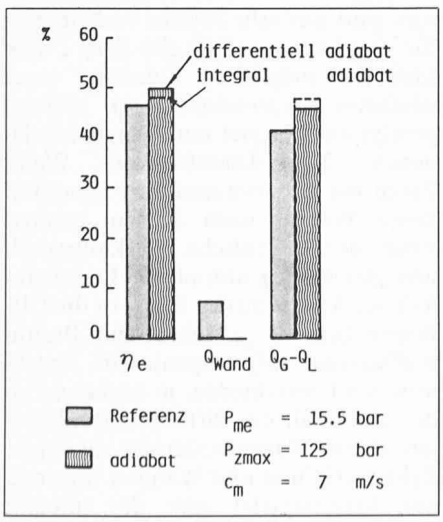
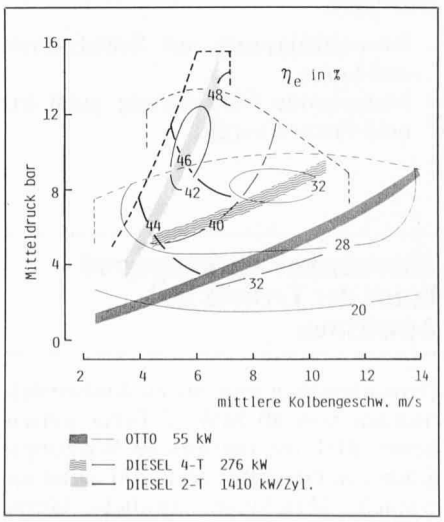


Bild 3. Kennfeldvergleich



(über ein Arbeitsspiel) adiabaten Motors vorausgesetzt wird. Mit einem Stoff sehr geringer Wärmeleitfähigkeit wird der differentiell adiabate Motor angenähert. Ein Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit (z.B. Stahl) führt bei entsprechender Materialoberflächentemperatur zum integral adiabaten Motor, der gemäss Bild 2 weniger interessant ist. Ziel ist also ein Motor mit Oberflächentemperaturen, die der Gastemperatur folgen. Was thermodynamisch interessant ist, bringt jedoch für das Material riesige Probleme (Temperaturspannungen). Beiden Systemen ist eigen, dass die Auspuffenergie steigt, und damit wird eine Compoundlösung (mit einer Nutzturbine in Serie oder parallel zur Turboladerturbine) besonders interessant. Heisse Brennraumwände in Kombination mit Turbocompound sind also eine Variante für aufgeladene Dieselmotoren, um den Gesamtwirkungsgrad weiter zu steigern.

Grosse Verbrennungsmotoren - wie auch grosse Strömungsmaschinen - weisen je die besten thermischen Wirkungsgrade auf. Mit abnehmender Bohrung nehmen die relativen Wärmeverluste Q_{Wand} (Bild 2) zu, womit eine Abnahme des thermischen Wirkungsgrades der Maschine verbunden ist.

Bild 3 zeigt den Stand der Technik für thermische Wirkungsgrade dreier Motortypen: Otto-Personenwagenmotor (55 kW), 4-Takt-Lastwagendieselmotor (270 kW) mit Direkteinspritzung, Aufladung und Ladeluftkühlung sowie ein langsamlaufender 2-Takt-Schiffsdieselmotor (1410 kW/Zyl.) mit Aufladung und Ladeluftkühlung. Dabei fallen die Unterschiede der Kennfeldgrösse einerseits und die erreichten Wirkungsgrade anderseits auf. Die Unterschiede im Wirkungsgrad des Grossdiesels zum Lastwagenmotor sind teils durch die Bohrungsgrösse, teils durch den niedrigeren Wirkungsgrad des Aufladeaggregates gegeben; der Ottomotor liegt im Wirkungsgrad ziemlich viel niedriger, was nebst der Baugrösse hauptsächlich durch die klopfbedingte Beschränkung des Kompressionsverhältnisses gegeben ist.

Während beim Schiffs- und beim Lastwagenmotor häufig Lasten nahe dem oder im Minimum des spezifischen Verbrauchs gefahren werden, lässt sich der Ottomotor nur selten so betreiben.

Hieraus erklärt sich auch der vergleichsweise schlechte Verbrauch des Ottomotors. Umgekehrt hat der Ottomotor ein sehr grosses Verbesserungspotential, das bis heute kaum oder nur wenig genutzt ist. Mit Blick auf Bild 3 ist erkenntlich, wie wesentlich die Ge-

triebestufung (bzw. ein stufenloses Getriebe) für den mit einem Ottomotor ausgerüsteten Personenwagen ist, wenn von der eingezeichneten Fahrleistungskurve im höchsten Gang ausgegangen wird.

Festzuhalten ist also, dass die aufgeladenen, direkt einspritzenden Dieselmotoren (2-Takt oder 4-Takt) bezüglich ihres thermischen Wirkungsgrades mit einfachen Mitteln nur noch wenig verbessert werden können. Durch ziemlich tiefgreifende Entwicklungsschritte sind aber massgebliche Verbrauchsabsenkungen noch immer möglich. Für den Ottomotor ist das Feld für weitere Wirkungsgradsteigerungen weit offen.

Nach diesem Exkurs zu Grossdieselmotoren mit ihrer bisher unangefochtenen Stellung bezüglich Wirkungsgrad werden im folgenden nur noch Motoren behandelt, wie sie in Personen- und Lastwagen Verwendung finden.

Abgasemissionen heute und morgen

Bild 4 zeigt das Schlüsseldiagramm «Verbrauch/Abgasemissionen» eines Ottomotors, gefahren in einem Lastpunkt, der für den Fahrzeugbetrieb einigermassen repräsentativ ist. Dabei wird ein emissionsoptimierter (späte Zündung) mit einem verbrauchsoptimierten Fall verglichen. Diese einfache Abgas-Kontrollstrategie zeigt klar die damit verbundene Verschlechterung des spezifischen Verbrauchs (proportional zum Kehrwert des thermischen Wirkungsgrades). Das Bild 4 umreisst im Prinzip drei Konzepte für die Reduktion der Abgasemissionen von Ottomotoren (CO, HC, NO_x): Zwecks Verbrauchsverbesserung werden in Europa viele Motoren mit Luftüberschusszahlen um 1,1 betrieben; dabei sind CO und HC tief. Zur Erfüllung der schweizerischen Abgasgesetzgebung 1982 muss in vielen Fällen zusätzlich mit mehr oder weniger Spätzündung, gegebenenfalls zusammen mit Abgasrezirkulation, operiert werden, um den NO_x-Standard zu erfüllen. Damit liegt im Mittel der schweizerische Verbrauch tendenzmässig zwischen den beiden angegebenen Kurven, näher der dünnen Linie. Beim Magerkonzept sucht man den Motorbetrieb zu hohen Luftüberschusszahlen hin zu verschieben, z.B. $\lambda_v = 1{,}3$. Damit werden niedere NO_x-Emissionen bei gutem Verbrauch (ausgezogene Linie) erreicht: CO reagiert nicht, und HC darf noch nicht ansteigen. Eine HC-Reduktion wird durch Magerbetrieb - wie im Bild 4 gezeigt - nicht erreicht.

Heute wird viel von Dreiwegkatalysatoren gesprochen, die alle drei Emissionsarten CO, HC und NO_x reduzieren (Konversionsfaktor für neuen Katalysator über 80 Prozent). Diese Kontrolltechnologie setzt genaues Einhalten (closed-loop control) einer Luftüberschusszahl von 1 voraus. Damit steigt der Verbrauch im Vergleich zum Magerkonzept leicht an (siehe Bild 4), die Emissionen sind aber wesentlich tiefer, jedenfalls für HC. Damit ist die Frage nach den «Trade-Offs» gestellt: Etwas mehr Verbrauch, dafür weniger Emissionen. Und endlich lautet die Frage: Welche Luftqualität wird eigentlich angestrebt? Der Gesetzgeber entscheidet in einem gewissen Ausmass über die anzuwendende Technik und die damit verbundenen Konsequenzen.

Im Vergleich zum erstgenannten Konzept ($\lambda_v \approx 1{,}1$) ist in der Schweiz (1982 Standard) in praktisch allen Fällen der Dreiwegkatalysator bezüglich Verbrauch besser, bezüglich Abgasemissionen ohnehin. Es sollte noch beachtet werden, dass im Bild 4 von einer konstanten Motorleistung ausgegangen wird und Abgaswerte nicht als Konzentrationen, sondern als spezifische Emissionen angegeben sind. Nur so sind objektive Vergleiche möglich.

Bild 5 zeigt nochmals die beiden sich konkurrenzierenden Otto-Konzepte: Katalysator und Magerbetrieb, im Vergleich mit einem Dieselmotor mit Vorkammer. CO wurde nicht aufgetragen: Wenn HC befriedigt, ist CO kein Problem. Diese Abbildung zeigt einmal mehr, dass das Magerkonzept in erster Linie mit der HC-Gesetzgebung steht oder fällt; der Diesel mit Vorkammer ist bezüglich der genannten Emissionen ungefähr dem Ottomotor mit Dreiwegkatalysator ebenbürtig. Dieselmotoren mit von Natur aus geringer CO- und HC-Emission emittieren zusätzlich Partikel (d.h. alles, was mit einem Filterpapier aus dem Auspuffstrom herausgeholt werden kann). Diese bestehen grösstenteils aus Russ und unterliegen in Zukunft in den USA ebenfalls einer Gesetzgebung, welche nur äusserst schwierig erfüllbar ist. Es hat sich gezeigt, dass mindestens im Falle des direkteingespritzten Dieselmotors mittels heisser Brennraumwände, zusammen mit einer Verbrennungssystemoptimierung, sehr niedrige Partikelemissionen erreichbar sind.

Bild 6 zeigt einen weiteren Vergleich verschiedener Konzepte für Personenwagenantrieb betreffend Abgasemissionen und Wirkungsgrad, mit und ohne besondere Massnahmen (Stand Europa um 1980) zur Emissionsabsenkung. Wiederum ist ein repräsentativer Be-

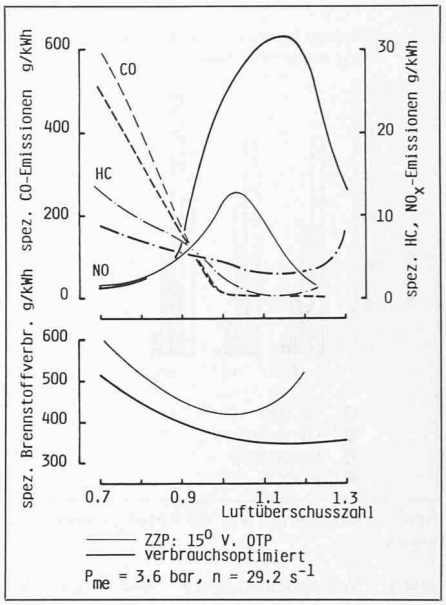


Bild 4. Vergleich verbrauchs-/emissionsoptimierter Ottomotor

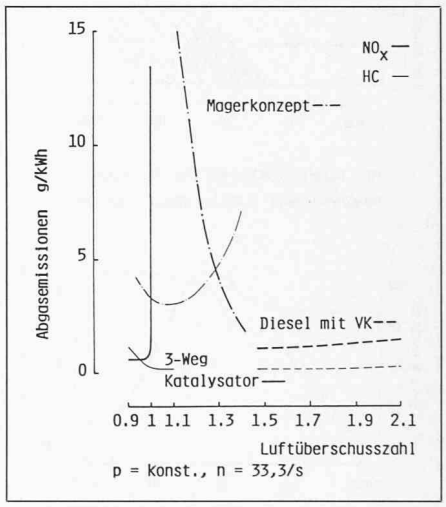
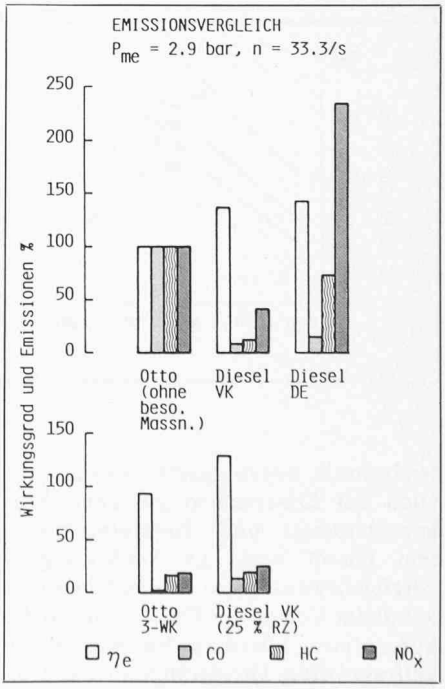


Bild 5. Konzeptvergleich bezüglich Emissionen

Bild 6. Konzeptvergleich bezüglich Wirkunbgsgrad und Emissionen



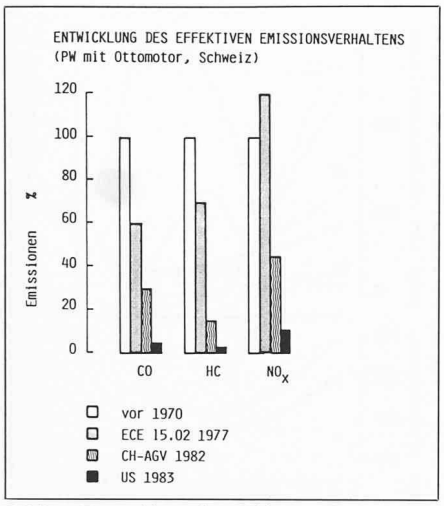


Bild 7. Entwicklung des effektiven Emissionsverhaltens

Bild 8. NO_x-Emissionsfaktor und Benzinverbrauch

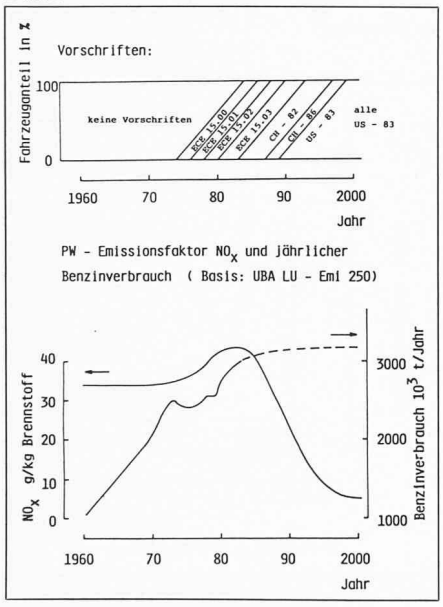
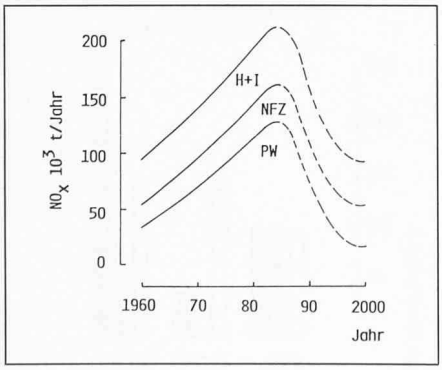


Bild 9. NO_x-Emissionen von Ottomotoren in Personenwagen, Nutzfahrzeugen, Heizungen und Industrie



triebspunkt vorausgesetzt; deshalb ist auch der Unterschied zwischen Vorkammerdiesel und direkteingespritztem Diesel bezüglich Wirkungsgrad vergleichsweise klein. Einmal mehr ist damit der Vorteil des Dieselprinzips dokumentiert - allerdings bleibt die Partikelfrage offen. Direkteingespritzte Diesel für Personenwagen sind heute im Versuchsstadium, daher ist dieser Typ mit abgasemissionsmindernden Eingriffen im Bild 6 nicht aufgeführt.

Gesetzgebung

Bild 7 zeigt die Entwicklung der Abgasemissionen der mit Ottomotoren ausgerüsteten Personenwagen in der Schweiz. Während das ECE-Reglement 15.02 (1977) wohl eine Absenkung von CO und HC mit sich brachte, ist NO_x aufgrund nicht gezeigter, vor 1977 ergriffener Massnahmen sehr hoch und wurde erst mit der CH-Vorschrift von 1982 reduziert. Zum Vergleich sind im Bild 7 die Werte von Fahrzeugen eingetragen, die den viel strengeren Vorschriften US 83 genügen. Generell hinkt heute Europa sowohl den USA wie auch Japan um rund zehn Jahre hintennach, wobei damit unterstellt werden soll, dass z.B. die US-Gesetzgebung sinnvoll ist, was wohl mehrheitlich akzeptiert wird.

Den NO_x-Emissionen von Fahrzeugen wird heute grosse Bedeutung zugemessen. Ohne auf die Streitfrage einzugehen, ob Schwefelverbindungen oder Stickoxide wichtiger seien, soll im folgenden der NO_x-Aspekt näher untersucht werden. Übrigens ist die weitgehende Entschwefelung von Brennstoffen nicht so sehr ein technisches oder wirtschaftliches Problem als vielmehr eine Frage der Normung.

Für die zukünftige Entwicklung des No_x-Ausstosses der Personenwagen (Otto) in der Schweiz kann eine Prognose, basierend auf dem Benzinverbrauch und dem Verhalten des Gesetzgebers, erstellt werden. Im Jahre 1983 wurden bei einer Bevölkerung von etwa 6,4 Mio. Einwohner und 392 Personenwagen/1000 Einwohner rund 3 Mio. t Benzin verbraucht.

Mit der geschätzten Zunahme auf 500 Fahrzeuge pro 1000 Einwohner im Jahre 2000 (USA 1983: 538), wird tendenzmässig eine Reduktion der pro Fahrzeug zurückgelegten Strecke pro Jahr um angenommene 10 Prozent erfolgen. Gleichzeitig, trotz zum Teil anderweitiger Aussagen, wird auch der Verbrauch pro Wegeinheit um ebenfalls angenommene 10 Prozent zurückgehen. Der zunehmende Anteil von Zweit- und Drittwagen, die kleiner sind und weniger gefahren werden, wird sich so mitauswirken. Mit der Prognose einer Bevölkerungszahl von 6,5 Mio im Jahre 2000 ergibt sich eine Verbrauchskurve gemäss Bild 8 mit einem Benzingesamtverbrauch im Jahre 2000 von annähernd 3,2 Mio. t/Jahr. Dies würde bedeuten, dass der Verbrauch von heute 10 bis 11 l/100 km auf 9 bis 10 l/100 km sinken würde - eine äusserst konservative Annahme. Es mag auffallen, dass der Benzinpreis in dieser Betrachtung überhaupt nicht aufgeführt wird - dieser Punkt wird unter «Politik» behandelt.

Bild 8 enthält weiter die Szenarien bezüglich Abgasvorschriften, Geschichte und Projektion. Wenn wir davon ausgehen, dass in der Schweiz ab 1989 die US-Vorschriften 83 gelten (in der EG ist die Rede von 1995!), verhalten sich die NO_x(NO_2)-Emissionsfaktoren für Personenwagen gemäss der angegebenen Kurve. Schliesslich, zusammen mit dem Brennstoffverbrauchszenario, folgt die Kurve für die NO_x(NO_2)-Emissionen (Bild 9). Damit wird deutlich, dass der Personenwagen - eine entsprechende Gesetzgebung vorausgesetzt - im Jahre 2000 weniger NO_x emittieren wird, als dies Ende der fünfziger Jahre der Fall war. Als Nachtrag sei noch erwähnt, dass sich ein Fahrzeug-Generationenwechsel über etwa zehn Jahre erstreckt. Auf dieser Annahme basiert Bild 8.

Nicht nur Personenwagen mit Ottomotoren (Diesel vernachlässigt), sondern auch Nutzfahrzeuge mit Dieselmotoren sowie Heizungen und die Industrie emittieren NO_x.

Der Dieselölverbrauch im Jahre 1983 betrug 0,78 Mio. t. Bei einer geschätzten Zunahme auf 0,85 Mio. t und einem unveränderten NO_x(NO_2)-Emissionsfaktor von 42 g/kg Brennstoff für Nutzfahrzeuge, ergibt sich die in Bild 9 gezeigte Kurve. Auch die geschätzten Werte für Heizungen und Industrie wurden in Bild 9 eingetragen. Es zeigt sich deutlich, dass im Jahre 2000 der Ottomotor im Personenwagen (bzw. der Diesel im Personenwagen) der vergleichsweise kleinste NO_x-Emittent sein wird, sofern nicht ebenfalls für Nutzfahrzeuge sowie Heizungen und Industrie Standards gefordert und durchgesetzt werden.

Denkbare Motorkonzepte für Personenwagen

Unter Berücksichtigung des Zeithorizonts der Industrie und der heute wie schon vor Jahren diskutierten Varianten wie Schichtladungsmotor, Gasturbine, Sterlingmotor, Wasserstoffmotor, Elektroantrieb, Dampfmotor usw. ergibt sich die Darstellung in Tabelle 1 als denkbare Variante.

Auf den ersten Blick erscheint dies als sehr konservative Beurteilung der Lage. Damit ist nicht gesagt, dass nicht

Tabelle 1. Denkbare Motorkonzepte für Personenwagen bis zum Jahre 2000

Zeitraum	*Gesetzgebung bezüglich Abgasemissionen*	
	streng	*mild*
bis 1988	Otto 3-WK	Otto mager
	Diesel IDE mit Aufl.	Diesel DE mit Aufl.
bis 1993	Otto 3-WK + z. B. var. Steuerzeiten	
	Diesel DE mit Aufl.	
bis 2000	Otto 3-WK + Prozessverb. bei Teillast	
	Diesel DE mit Keramik + Compound	
	wenig Methanol, Aethanol	

DE Direkteinspritzung
IDE indirekte Einspritzung

intensiv nach Alternativen gesucht werden soll. Doch muss betont werden, dass der Verbrennungsmotor bezüglich der uns interessierenden Kriterien in ihrer Gesamtheit einen Reifegrad erreicht, der nicht so leicht zu überbieten ist. Auch ist der Verbrennungsmotor bezüglich seiner Weiterentwicklung ganz und gar nicht am Ende. Diese gründet einzig und allein auf den neuen Randbedingungen der Ökonomie und Ökologie.

Ökonomie und Ökologie

Falls das Partikelproblem des Dieselmotors eine Lösung findet - was als wahrscheinlich gilt - wird der aufgeladene Personenwagendiesel an Bedeutung gewinnen. Der Ottomotor wird sicher noch lange dominieren; er wurde in den letzten Jahren stark verbessert (Verbrauch) und hat noch immer ein grosses Potential. Der Verbrauchsunterschied zum indirekt eingespritzten Dieselmotor wurde verkleinert - ein Mitgrund für den Dieselmotorhersteller, den direkteinspritzenden Diesel für Personenwagenanwendungen zu forcieren.

Drei Beispiele sollen nun die Tabelle 1 illustrieren.

Bild 10 zeigt für einen mit Dieselmotor ausgerüsteten Personenwagen, aufgeladen mit wahlweise verschiedenen Aggregaten, die relativen Brennstoffverbräuche und Beschleunigungsreserven in Abhängigkeit vom Hubvolumen. Dieses Bild zeigt zwei Punkte. Erstens geht mit kleinerem Hubvolumen der Verbrauch zurück. Dies steht nicht im Widerspruch zur Feststellung, dass grosse Maschinen einen besseren thermischen Wirkungsgrad aufweisen. Im hier interessierenden Fall kommt die Problematik des Teillastverbrauchs (bei niedrigem Mitteldruck) zum Ausdruck, d.h., der mechanische Wirkungsgrad wird mit kleiner werdendem Mitteldruck schlechter und damit auch der Verbrauch. Ein kleinerer Motor in einem gegebenen Fahrzeug weist einen besseren Wirkungsgrad auf; dies gilt auch für den Ottomotor - dort in noch vermehrtem Mass wegen der bis heute angewandten Lastregelung durch Drosselung. Der kleinere Motor bei gegebener Fahrzeugmasse ergibt eine geringere Beschleunigungsreserve, wie Bild 10 zeigt. Durch die Anwendung des Comprexladers mit Ladeluftkühlung, in der Zwischenzeit durch BBC zur Marktreife entwickelt, kann ein im Vergleich zum unaufgeladenen Motor kleinvolumiges Aggregat mit gleicher Beschleunigungsreserve gebaut werden. Das Ergebnis ist ein markanter Verbrauchsgewinn. Mit Abgasturboladern wären ähnliche Gewinne erzielbar unter der Voraussetzung variabler Geometrie; der sogenannte Variolader ist bis heute nicht marktreif.

Zweitens illustriert das Bild 10, dass für einen ökonomischen Fahrzeugbetrieb die Fahrzeugmasse eine dominante Rolle spielt. Ein geometrisch ähnlicher verkleinerter Motor muss in ein Fahrzeug mit entsprechend reduzierter Masse eingebaut werden, um das gleiche Beschleunigungsverhalten zu erreichen. Die Maximalgeschwindigkeit ist bei dieser Betrachtung von untergeordneter Bedeutung; die Erzielung einer möglichst hohen Autobahngeschwindigkeit dürfte ohnehin bald überall der Geschichte angehören. Die Zukunft wird also bedeutend leichtere Fahrzeuge ohne Einbusse an Sicherheit bringen müssen.

Das zweite Beispiel gilt dem Ottomotor. Die Teillastregelung mittels Drosselung ist energetisch ungünstig. Das Schichtladungskonzept soll diesem Übel abhelfen; variable Einlasssteuerzeit ist eine andere Möglichkeit, illustriert in Bild 11. Mit diesem Konzept würde nicht nur der Teillastverbrauch verbessert, sondern die NO_x-Rohemissionen wären überdies tiefer, und noch immer könnte mit einem Dreiwegkatalysator operiert werden.

Das dritte, etwas futuristische Beispiel zeigt den Cummins Advanced Adiabatic Diesel in einer Personenwagenanwendung. Die Zahlen in Tabelle 2 sind selbsterklärend. Auch wenn nur ein

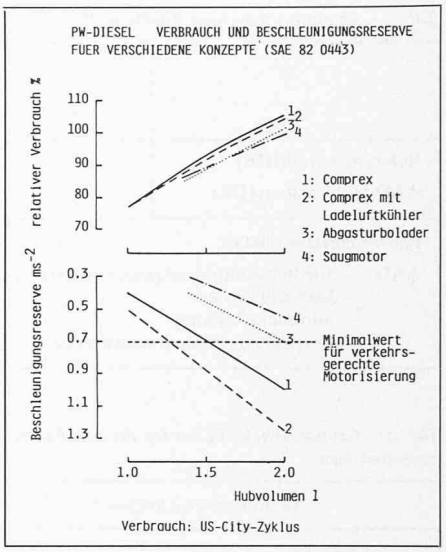
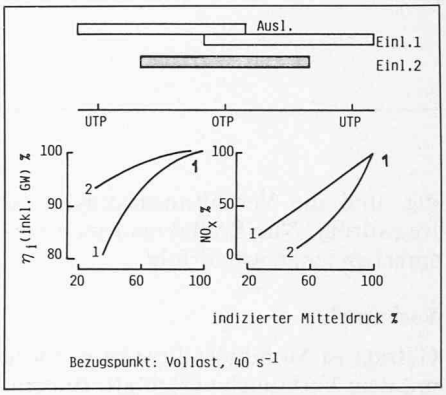


Bild 10. Verbrauch und Beschleunigungsreserve, Personenwagendiesel (nach BBC)

Bild 11. Ottomotor mit variabler Einlass-Steuerzeit



Teil dieser Projektionen realisiert werden kann, bringt dies einen enormen Fortschritt.

Diese drei Beispiele - es gäbe noch mehr - mögen die Aussage stützen, dass bezüglich Ökonomie, bei gleichzeitig sehr niedrigen Abgasemissionswerten, technisch noch sehr viel erreichbar ist. Die Kosten wären durchaus vertretbar, d.h., die Verhältnismässigkeit ist gewahrt.

Ansätze zu einer Politik

Den Gesetzgeber beschäftigen in zunehmendem Masse zwei Fragen, nämlich Brennstoffverbrauch und Umweltbelastung. Grundsätzlich bieten sich zwei Philosophien und deren Mischformen an: Gebrauchsvorschriften und Produktenormen. Tabelle 3 zeigt einige der zu beachtenden Punkte bzw. Elemente. Gebrauchsvorschriften sind in der Regel kurzfristig realisierbare Massnahmen und in bezug auf den diskutierten Problemkreis eher wenig wirksam. Die Akzeptanz ist beschränkt, die Kontrollen sind aufwen-

Tab. 2. Cummins Advanced Adiabatic Diesel (AAD) für Personenwagenanwendung

	Brennstoffverbrauch l/100 km			*Beschleunigung* s
	Stadt	Autobahn	kombiniert	0–96 km/h
Referenzmotor (IDE)	6,7	5,6	6,2	15,2
AAD Motorsystem (DE)	3,2	2,4	3,0	13,9

Fahrzeugmasse 1360 kg

AAD
- alle Brennraumkomponenten keramisch isoliert
- kein Kühlsystem.
- minimale Reibung
- Compoundsystem (mechanisch)

Tab. 3. Grundsätzliche Varianten für eine Politik bezüglich Personenwagen, Brennstoffverbrauch und Abgasemissionen

Gebrauchsvorschriften	*Produktenormen*
- Akzeptanz - Kontrolle - Verhältnismässigkeit	- Verbrauch - Abgasemissionen - Kontrolle *setzen voraus* - langfristige Planung - internationale Koordination *wobei zu beachten ist* - Verhältnismässigkeit wahren - objektiv informieren

dig, und die Verhältnismässigkeit ist fragwürdig. Nur Produktenormen versprechen langfristig Erfolg.

Verbrauch

Gefragt ist Mobilität; diese ist nur lose mit dem Verbrauch verknüpft. Imperativ ist die Senkung des Gesamtverbrauchs. Dabei geht es im Augenblick nicht in erster Linie um die endlichen Reserven – diese reichen noch lange –, sondern um die CO_2-Produktion, die, nebst den übrigen Abgasemissionen, gedrosselt werden muss. Die Idee, bei Verwendung von Methanol und Äthanol mehr verbrauchen zu können, ist daher falsch; diese Brennstoffe sollten nur als Substitution gesehen werden.

Dampfturbinen als Schiffsantriebsmaschinen wurden in den letzten Jahren wegen ihres relativ schlechten Wirkungsgrades eliminiert und vor allem durch langsamlaufende Dieselmotoren ersetzt – eine Motorgattung, welche vor rund 20 Jahren als dem Untergang geweiht galt. Dieser Eliminationsprozess ist das Ergebnis einer sachlichen Kosten-Nutzen-Rechnung. Diese Betrachtungsweise gilt für das Automobil jedoch nur sehr beschränkt; es ist nicht bloss Transportmittel, sondern spielt nach wie vor eine nicht unerhebliche psychologische Rolle. Nur so ist erklärbar, dass viele Kunden auch heute noch enorm hohe Verbräuche akzeptieren. Und weil dem so ist, sind die Verbräuche nach wie vor höher, als dies technisch für die reine Transportaufgabe nötig wäre. Somit sind Preiserhöhungen ein wenig wirksames Mittel, um den Verbrauch der Personenwagen zu senken. Aus diesen skizzierten Gründen und unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit ist ein Verbrauchsstandard mindestens zu erwägen. Übrigens: Die technische Innovation findet nur aufgrund klarer, realistischer Zielsetzungen und Beschränkungen statt, nicht unter Randbedingungen des Überflusses.

Gekürzte Fassung der Antrittsvorlesung vom 23. Mai 1984 im Auditorium Maximum der ETH Zürich

Abgasemissionen

Mit einer entsprechenden langfristigen Politik lässt sich sehr viel erreichen. Das Risiko des schweizerischen Gesetzgebers ist klein. Die Pionierarbeit – mit Erfolg – wurde vor rund zehn Jahren in den USA und in Japan geleistet.

Kontrolle

Strenge Abgasvorschriften setzen heute eine Technologie voraus, die durch unsachgemässe Behandlung – wie zum Beispiel Verwendung bleihaltigen Benzins für alle mit Katalysator ausgerüsteten Fahrzeuge – unwirksam wird. Periodische Kontrollen sind deshalb nötig und mit den bei uns im Gegensatz zu den USA verfügbaren Fachkräften durchführbar. Auf dem Gebiet der Kontrollvorschriften und deren Durchführung kann noch Pionierarbeit geleistet werden.

Fraglos muss das bleifreie Benzin die billigste Benzinsorte sein. Die bleihaltigen Qualitäten müssen mit dem Ziel einer ausgeglichenen Benzinrechnung entsprechend teurer sein.

Langfristige Planung

Vorschriften für Verbrauch und Abgasemissionen setzen seitens des Gesetzgebers eine langfristige Planung voraus. Sind diese Randbedingungen einmal formuliert, ist der Entwickler in der Lage, aus der Vielzahl der möglichen Konzepte jene weiterzutreiben, die unseren Gesamtvorstellungen entsprechen. Sehr viel kann getan werden, nur sollte bekannt sein, was man will. Kurzfristige Politik ist einfach und wenig wirksam; was wir brauchen, sind langfristige Zielvorstellungen. Mangelnde planerische Weitsicht einfach der Technik als Versagen anlasten zu wollen wäre zu billig.

Verhältnismässigkeit

Stets ist eine möglichst objektive, alles umfassende Kosten-Nutzen-Analyse nötig. In den Kosten sind nicht nur jene für die «Hardware», sondern auch die administrativen und Kontrollaufwendungen einzuschliessen.

Objektiv informieren

In unserem Zeitalter ist nur die Informationsmenge total, nicht deren Qualität. Ein Mehr an objektiver Information ist dringend nötig.

Schlussfolgerungen

Auch in Zukunft kann die Mobilität unserer Gesellschaft voll gewährleistet werden – dies unter Berücksichtigung der berechtigten und nötigen Anforderungen an Ökonomie und Ökologie. Im besonderen im Falle des Automobils ist aber die steuernde Hand des Gesetzgebers nötig.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *M.K. Eberle*, Institut für Energietechnik, Labor für Verbrennungsmotoren, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.