

**Futura tecnologia del trattamento
gas di scarico dei motori a ciclo Otto.
La prossima generazione di veicoli
ad emissione estremamente bassa**

Dipl. Ing. W. Maus, Dipl. Ing. R. Brück
Emitec GmbH, Lohmar

Dipl. Ing. G. Holy
AVL

Motore & ambiente
Emissioni di sostanze inquinanti contro CO₂

Congresso Internazionale GRAZ
2 e 3 settembre 1999

Futura tecnologia del trattamento gas di scarico dei motori a ciclo Otto. La prossima generazione di veicoli ad emissione estremamente bassa

Dipl. Ing. W. Maus Emitec GmbH
Dipl. Ing. R. Brück Emitec GmbH
Dipl. Ing. G. Holy AVL

1) Introduzione

Nel corso degli ultimi anni i valori limite di emissione dei veicoli motorizzati vennero continuamente ridotti. Attualmente i valori più severi vengono imposti dalla legislazione SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle) in California.

Tabella 1: valori limite per i gas di scarico

	HC	CO	NOx
ULEV*	0.04 g/m	1.7 g/m	0.2 g/m
SULEV (2003)*	0.01 g/m	1.0 g/m	0.02 g/m
EG III (2000)**	0.2 g/km	2.3 g/km	0.15 g/km
EG IV (2005)**	0.1 g/km	1.0 g/km	0.08 g/km

*Test FTP; **Ciclo di test CEE

Inizialmente l'ente della California per la difesa ambientale CARB prese in considerazione il coercitivo utilizzo di vetture a trazione elettrica per l'anno modello 2003 al fine di ridurre l'incidenza inquinante sull'ambiente, soprattutto nell'ambito delle metropoli Los Angeles. Studi internazionali e ricerche su grande scala con vetture a trazione elettrica hanno dimostrato che tali mezzi semoventi possono essere considerati ad "emissione zero" localmente, le emissioni però insorgono a causa della produzione sia dei veicoli sia della necessitata corrente elettrica [1]. I pubblicati risultati dei valori di emissione di vetture d'avanguardia con ottimizzato sistema di trattamento dei gas di scarico dimostrano, con sempre maggior frequenza, che a temperatura d'esercizio tali emissioni raggiungono valori negativi anche nel caso di comparativamente bassi valori di inquinamento ambientale. Ciò significa che con catalizzatori attivi tali vetture sono in grado, soprattutto nell'ambito urbano ed alla presenza di un inquinamento locale relativamente elevato, di esercitare un effetto positivo, vale a dire di degradazione, contribuendo così alla soluzione della problematica di emissione nell'ambiente. Un rivestimento catalitico dei radiatori delle vetture ha un parallelo effetto di riduzione del tasso d'ozono al livello del terreno [2]. Alla premessa che nel giro dei prossimi 10...20 anni tutti i veicoli motorizzati vengano equipaggiati con motori e catalizzatori che ottemperino o si avvicinino ai limiti imposti dalla legislazione SULEV, potrebbe considerarsi risolta la problematica in merito alle emissioni di idrocarburi aromatici, monossido di carbonio ed ossidi d'azoto.

Oltre al consumo di risorse per la produzione di carburanti, rimane in discussione l'emissione di CO₂ quale gas con influenze ambientali e possibilmente causante "l'effetto serra". Se su scala mondiale si prendono in considerazione le emissioni naturali di CO₂ e quelle prodotte dall'uomo, si potrà constatare che la quelle generate dal traffico individuale è di solamente il 0,2% [3]. Attualmente non è ancora definitivamente chiarito se il tasso di CO₂ dell'atmosfera terrestre, comprovatamente in incremento, siano causa del riscaldamento globale oppure se tale fenomeno termico sia causato, ad esempio, dal prolungamento di durata delle macchie solari e di conseguenza da una maggiore emissione di CO₂ dei mari.

Il minor consumo di carburante delle vetture in generale, richiesto dagli enti legislatori, potrà essere realizzato nel futuro con una nuova tecnologia dei motori e delle trasmissioni di forza unitamente ad una più leggera costruzione senza pregiudizio della comodità. In questa correlazione la discussione in merito agli azionamenti ottimali passa ulteriormente in primo piano. Nella comparazione fra nuove tecnologie di propulsione devono però essere presi in considerazione tutti i punti di vista d'importanza per l'ecologia.

2) Tecnologie di propulsione

Oltre ai noto motori a ciclo Otto e Diesel, sono in discussione, quale concetto di propulsione, motori a ciclo Otto ad iniezione magra diretta, vetture ad azionamento ibrido, pile a combustione e, come nel passato, motori elettrici.

Al riguardo delle emissioni tutti gli azionamenti vengono già oggi comparati negli USA alla già applicata normativa ZLEV per le vetture automobilistiche [4]. In comparazione ai motori a ciclo Otto i motori Diesel presentano un chiaro vantaggio di consumo. La problematica implica le emissioni di particelle e un'ulteriore riduzione degli ossidi d'azoto. I motori a ciclo Otto con iniezione diretta "magra" sono basati sulla riflessione di possibilmente minimizzare le emissioni alla presenza di basso carico, cosa comparabile nel caso dei motori Diesel nel caso di chiusura dell'aria al carburatore. Attualmente però un regime continuo a carburazione magra in qualsiasi situazione di carico ed in particolare durante il periodo di avviamento a freddo non è fattibile per ragioni tecniche inerenti il motore e la catalisi. In seguito al contenuto di zolfo dei carburanti, delle rigenerazione e del massimo carico termico degli assorbitori NO_x alla presenza di certe temperature potrebbero persino insorgere svantaggi di consumo. In maniera simile per quanto concerne il Diesel, il problema principale viene posto dalla riduzione delle emissioni d'ossido d'azoto poiché attualmente non è disponibile un "Catalizzatore Lean NO_x" con sufficiente effettività.

Vetture a trazione ibrida, come ad esempio la Toyota Prius [5], sono il risultato di un compromesso fra trazione elettrica e motore Diesel o a ciclo Otto. Uno dei maggiori svantaggi, oltre alla complessità del sistema, è la maggiorazione di peso. Vantaggi di consumo possono essere ottenuti solo in situazioni di stop-and-go, prevalentemente alla presenza di congestioni di traffico. Nel caso di un continuo funzionamento, soprattutto a velocità elevate, il peso supplementare porta dei concreti svantaggi.

Il fattore critico, nel caso delle vetture a trazione elettrica, rimane quello dell'alimentazione di energia on-board. Anche gli accumulatori di tecnologia più avanzata non offrono bastante capacità da potersi misurare con quanto offerto dalla carburazione di un motore a combustione. Oltre a ciò, per quanto riguarda il bilancio d'energia, la massa degli accumulatori ha un ulteriore effetto negativo.

Le pile a combustione potrebbero rappresentare una soluzione che rende possibile una produzione di energia elettrica on-board. Qui si deve però differenziare fra pile a combustione con diretta alimentazione di idrogeno (serbatoio d'idrogeno a bordo delle vetture) e pile a combustione con

impianto di "reforming" a monte. Un tale impianto di "reforming" genera idrogeno da metanolo e/o benzina. Con l'ausilio di un tale sistema potrebbe essere possibile di utilizzare la presente infrastruttura di rifornimento benzina. Oggi un impianto di "reforming" e pile a combustione presentano ancora un peso rispettabile e necessitano di molto spazio. Per quanto riguarda il bilancio d'energia, all'attuale livello della tecnica sarebbe solo possibile di penetrare nell'ambito dei motori Diesel. Dato che il consumatore finale non è disposto ad accettare limitazioni di comodità, come ad esempio una lunga attesa prima della messa in esercizio, è apparente che una introduzione del sistema in grande serie sia alquanto dubbia entro il periodo di tempo dei prossimi 10 anni.

La sottostante tabella presenta una sinossi della valutazione degli azionamenti al riguardo delle emissioni, consumo (CO₂) e rapporto peso/costi.

Tabella 2: valutazione di diversi concetti di propulsione al riguardo delle emissioni e del rapporto peso/costo.

	Motori a ciclo Otto	Diesel	Otto, iniez. magra	Ibridi	Pile a combustione
HC	++	+	+	+	++
NOx	++	- (-)	- (-)	+	++
Particelle	++	--	-	++	++
CO ₂	+	++	+ (+)	-	o / -
Peso/costi	+	+	+	--	-
Somma	++	+	+	(+)	+

3) Valutazione del catalizzatore e delle emissioni

La raffigurata valutazione dei singoli concetti di propulsione dimostra inequivocabilmente che il motore a ciclo Otto rimarrà il concetto di trazione preferito e con il minore tasso di rischio per almeno i prossimi 10...15 anni. Il motore a ciclo Otto, da solo oppure in unione a nuove varianti di trasmissione, è ancora oggi suscettibile di un ampio potenziale di miglioramento al riguardo delle prestazioni, delle emissioni e del consumo, cosa che si riflette continuamente con più elevate esigenze ai nuovi concetti d'azionamento.

L'obiettivo da perseguire deve essere quello di equipaggiare tecnicamente un veicolo, al riguardo delle emissioni, in modo che politicamente non abbia più senso di stigmatizzare i veicoli motorizzati quali nemici numero 1 dell'ecologia ambientale allo scopo di introdurre decisioni politiche, più o meno arbitrarie, cosa dimostrata dall'attuale discussione in Germania in merito alle imposte sul carburante Diesel. Quale obiettivo viene qui per prima cosa definito il limite di emissione californiano SULEV.

La figura 1 rappresenta il decorso tipico delle accumulate emissioni di un motore di serie e i richiesti valori SULEV come presentati dal test americano FTP.

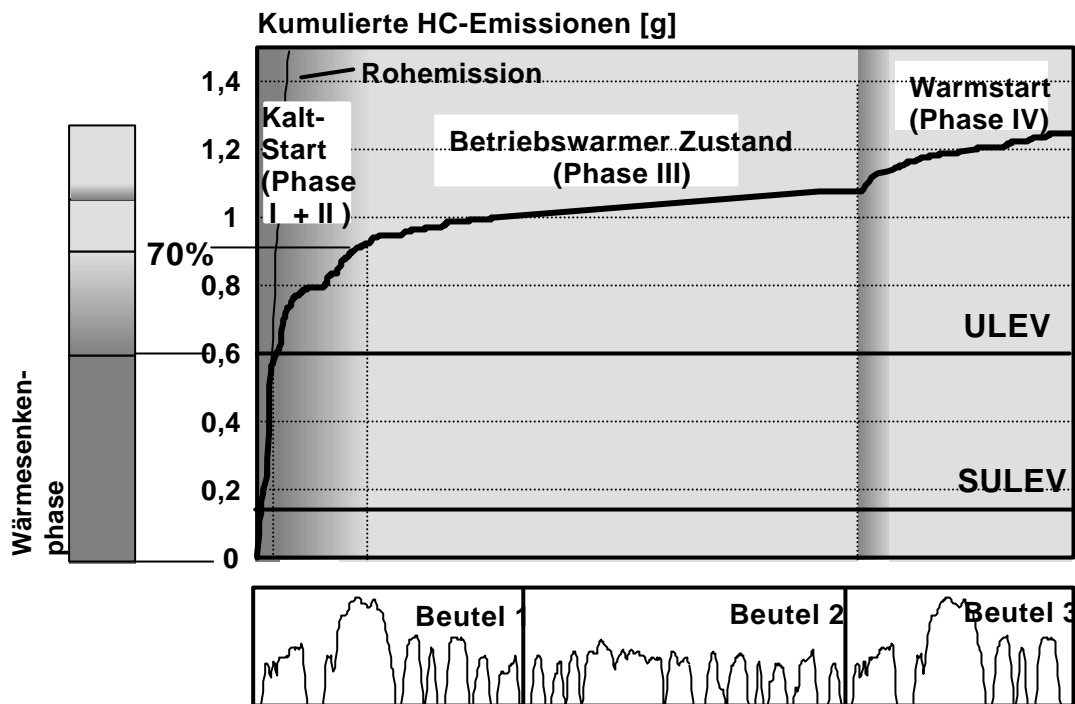


Fig. 1: emissioni HC accumulate secondo test FTP

Oltre ad un tasso di ricambio pari a pressoché il 100% con il motore a temperatura d'esercizio, si rende necessario un periodo di "accensione" del catalizzatore estremamente breve dopo l'avviamento del motore. La durata massima di tale periodo iniziale è direttamente subordinata alle emissioni del motore durante l'avviamento a freddo e, a seconda del motore, è pari ad un periodo di tempo che va dai 3 ai 15 secondi [6]. Per realizzare tale esigenza la temperatura dei gas di scarico a monte del catalizzatore devono superare in maniera più veloce di alcuni secondi la temperatura light-off di 200...300°C. Allo scopo di evitare superflue perdite di temperatura nelle tubazioni a monte del catalizzatore è presente la possibilità di posizionare il catalizzatore direttamente a valle del collettore di scarico.

Il comportamento di un catalizzatore durante il periodo di avviamento a freddo è subordinato, oltre alla temperatura dei gas di scarico ed al rivestimento catalitico, anche dai dati fisici e termodinamici del supporto. Durante la fase di avviamento a freddo un catalizzatore opera inizialmente quale puro scambiatore di calore con attività catalitiche a partire dal raggiungimento della temperatura di light-off.

Per le ragioni esposte l'obiettivo mirato è di mettere a disposizione una superficie catalizzante possibilmente ampia (GO) con capacità termiche il più possibile ridotte (cp). Per la valutazione dei diversi sistemi viene utilizzato il cosiddetto fattore di avviamento a freddo GO/cp [7].

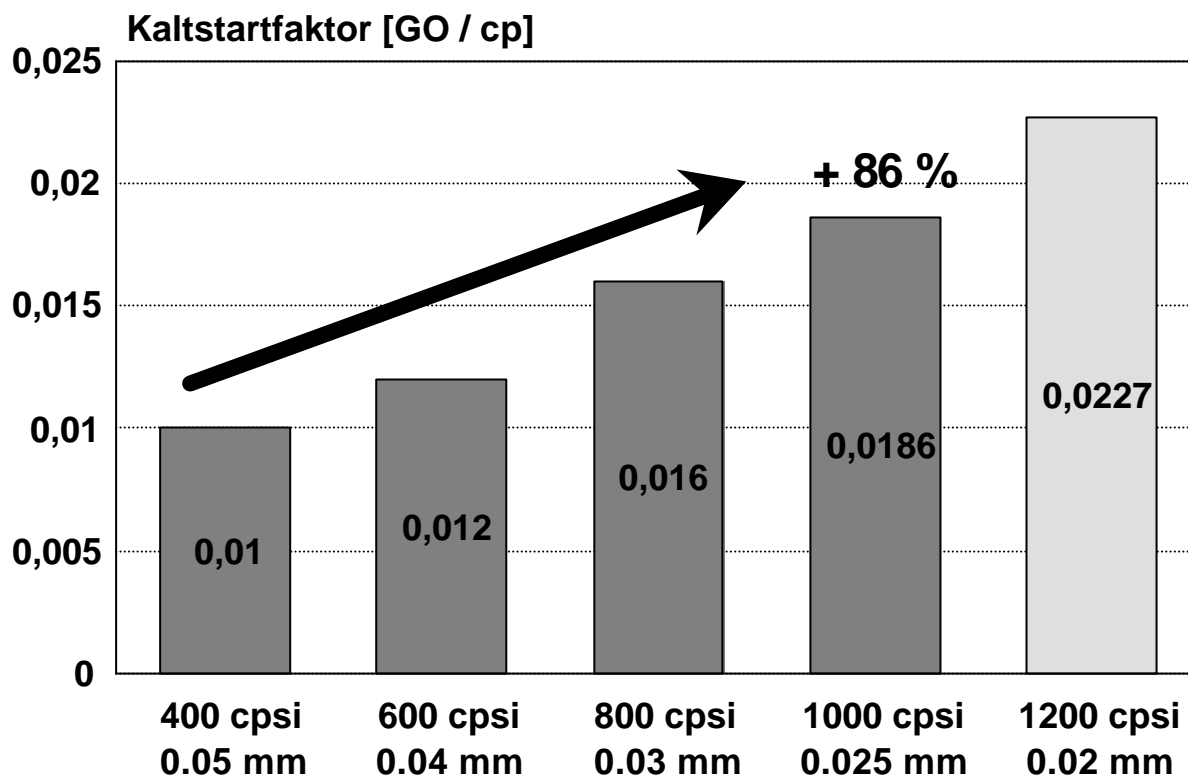


Fig. 2: fattore di avviamento a freddo di diversi supporti metallici di catalizzatori (400...1200)

Si può constatare che il fattore di avviamento a freddo, in subordinazione alla compattezza delle cellule, incrementa con la riduzione dello spessore del film. Se però la compattezza delle cellule viene incrementata senza una riduzione dello spessore del film è constatabile un peggioramento.

Un ulteriore fattore d'importanza è l'utilizzo di una cascata termica. In seguito alla riduzione della sezione d'entrata de primo elemento vengono positivamente influenzati sia il comportamento durante l'avviamento a freddo sia la distribuzione del flusso [8]. La figura 3 illustra l'esempio di un impianto graduato per avviamento a freddo nelle vicinanze del motore di una BMW con motore a 6 cilindri [9].

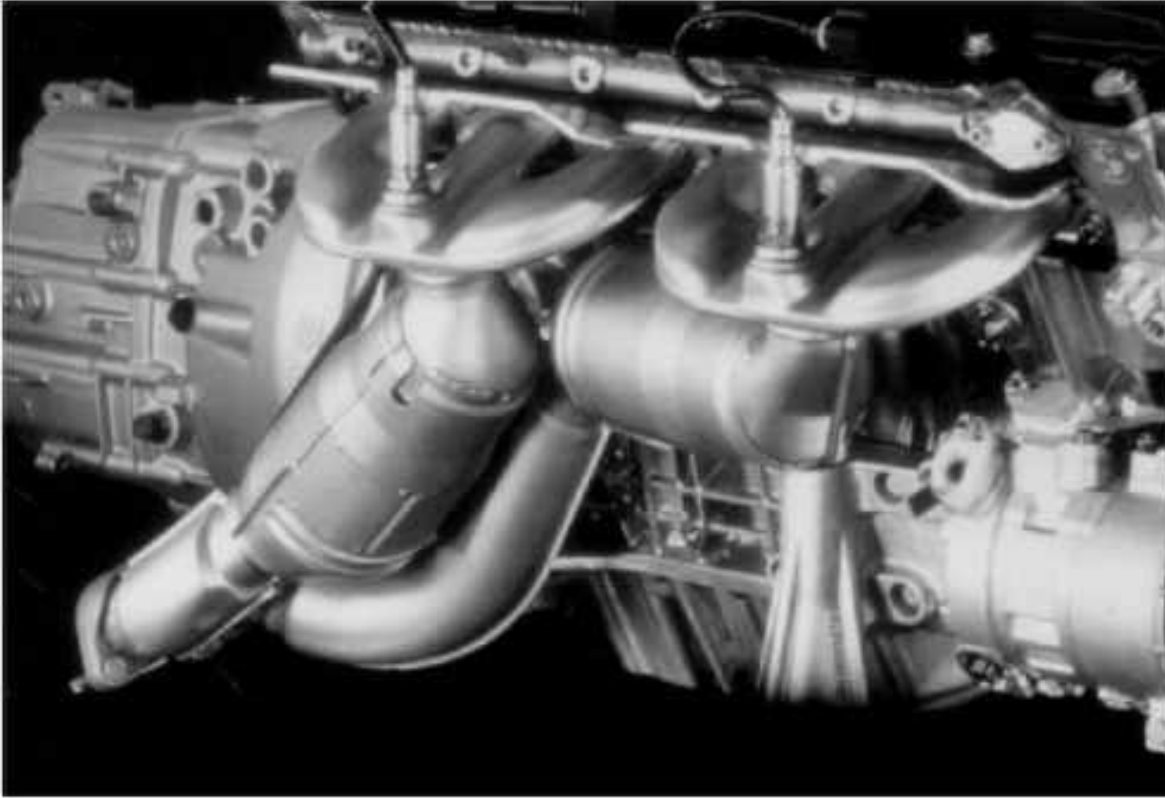


Fig. 3: impianto graduato per avviamento a freddo su motore BMW a 6 cilindri

In seguito alla continua riduzione delle capacità termica del supporto del catalizzatore aumenta l'importanza della quota di washcoat con riferimento alla totale capacità termica. Nel caso di catalizzatori a tre vie d'avanguardia una quantità di washcoat di 200...250 g/l è cosa senz'altro usuale. Una riduzione di questa massa a 150 oppure a 100 g significherebbe, nel caso di un catalizzatore di 400 cpsi con uno spessore di film di 1000 cpsi, una riduzione della quota di washcoat del 63% arrivando così al 25%. Nel caso di un elemento di 1000 cpsi con uno spessore di film di 0,025 mm il miglioramento è pari al 53%.

La figura seguente illustra la subordinazione della massa del washcoat alla capacità termica totale.

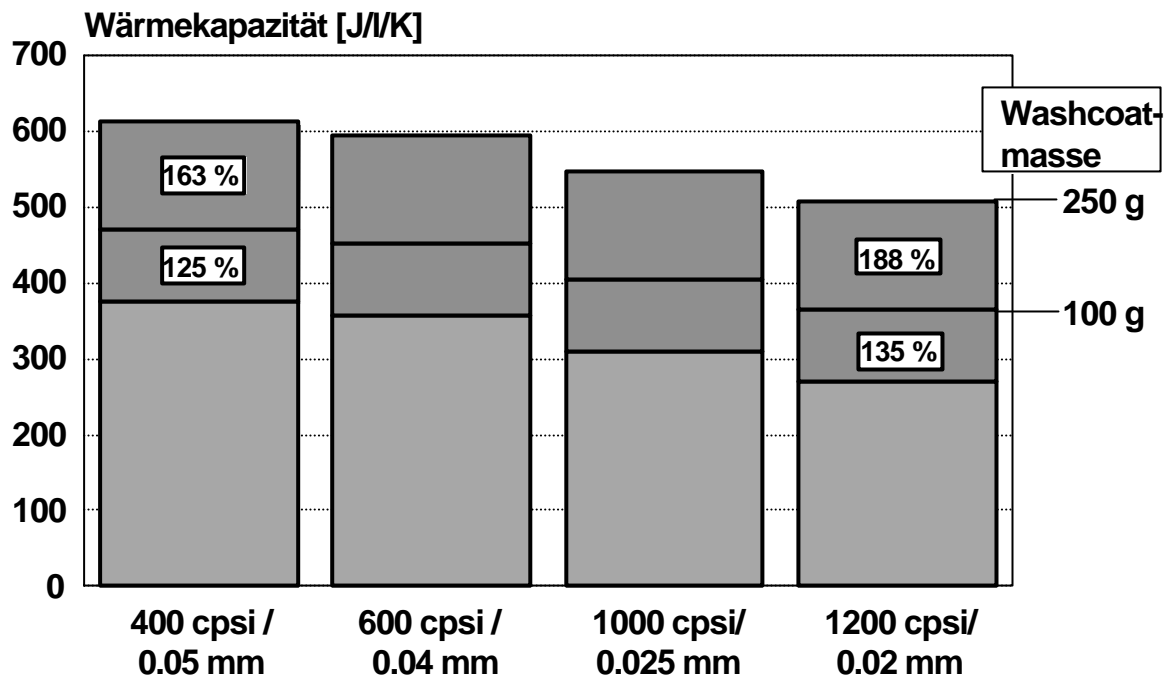


Fig. 4: influenza della massa del washcoat sulla capacità termica totale del catalizzatore

Per un'ottimale utilizzo del supporto e delle parti di metallo nobile integrate al rivestimento è di coercitiva necessità una uniforme distribuzione del washcoat sulla superficie delle cellule e sull'asse del catalizzatore. La figura 5 illustra gli esempi di un washcoat spesso e di un washcoat sottile nelle sezioni di cellule.

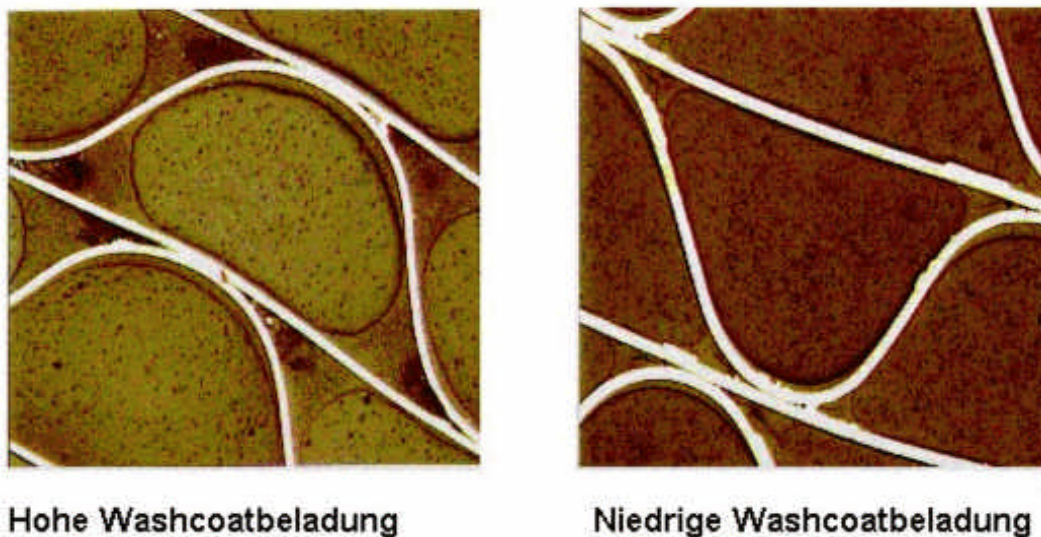


Fig. 5: distribuzione di washcoat in subordinazione alla massa di washcoat presente nella sezione delle cellule

Alla presenza di una ottimale regolazione lambda, in condizioni termiche d'esercizio l'effettività catalitica viene limitata solo dal flusso di materiale. tale flusso di materiale nella corrente laminare dei canali delle cellule viene influito principalmente dal diametro idraulico (dh) del canale. Quale fattore di effettività è valido il rapporto GO/dh [10]. La figura 6 illustra il fattore di effettività GO/dh alla presenza di diverse compattezze di cellule.

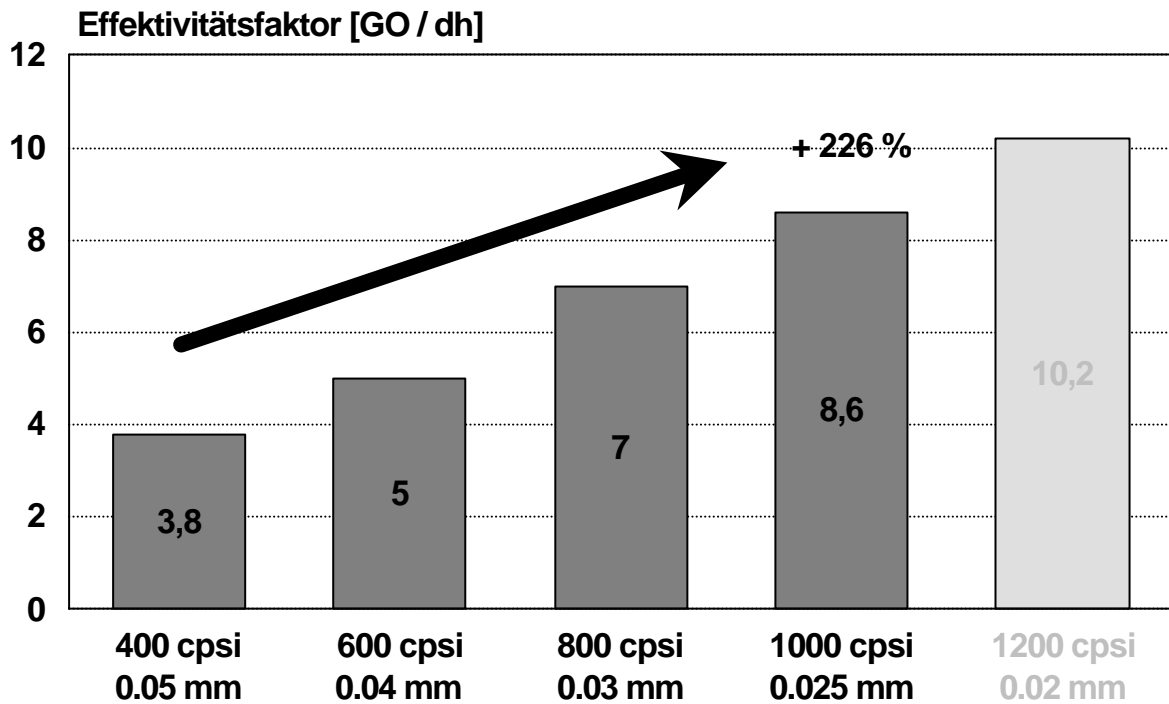


Fig. 6: fattore di effettività GO/dh alla presenza di diverse compattezze di cellule

Una elevata compattezza delle cellule migliora il grado di effettività per tutte le sostanze nocive [6,11,12]. Ciò rende possibile di ridurre il volume del catalizzatore, ottenendo persino una maggiore effettività catalitica in modo che si presenta la possibilità di rinunciare al catalizzatore sotto il fondo della vettura. In tale correlazione ad una riduzione del volume di catalisi reagisce il NO_x ad una non ottimale regolazione del motore.

Se si analizzano le accumulate emissioni di NO_x nel corso di un test dei gas di scarico si potrà constatare che la totalità delle emissioni sono dovute, nella maggior parte dei casi, ad alcuni "eventi" nel corso del test. Le brevi punte di emissione NO_x visibili nella figura 7 non sono subordinate ad un carico spaziale del catalizzatore ma bensì generate da una non ottimale regolazione lambda in ambito non stazionario. Accelerazione comandata elettronicamente e celeri dispositivi di comando motore che rendono possibile la regolazione diretta anche di singoli cilindri permetteranno un distinto miglioramento.

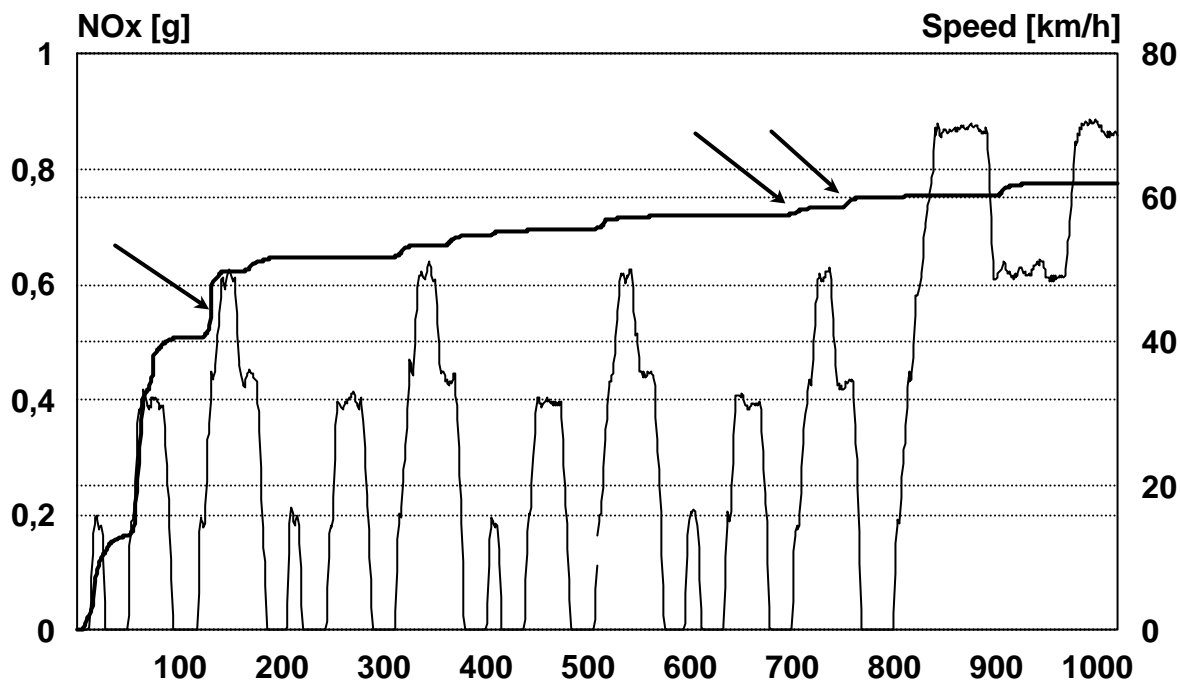


Fig. 7: accumulate emissioni NO_x dal test dei gas di scarico di un veicolo di serie

4) Concetto di catalisi SULEV

Per delucidare una vettura SULEV è assolutamente necessario partire da un motore con basse emissioni lorde ed una ottimale regolazione lambda. Per tale motivo tutte le qui seguenti considerazioni partono dal presupposto di una vettura ULEV presente sul mercato con potenziale SULEV.

Le emissioni lorde di una tale vettura, secondo un test FTP, sono al livello di 1,6 g/m.

La temperatura dei gas di scarico e l'accumulata emissione HC durante i primi 100 secondi nel test FTP sono illustrate nella figura 8.

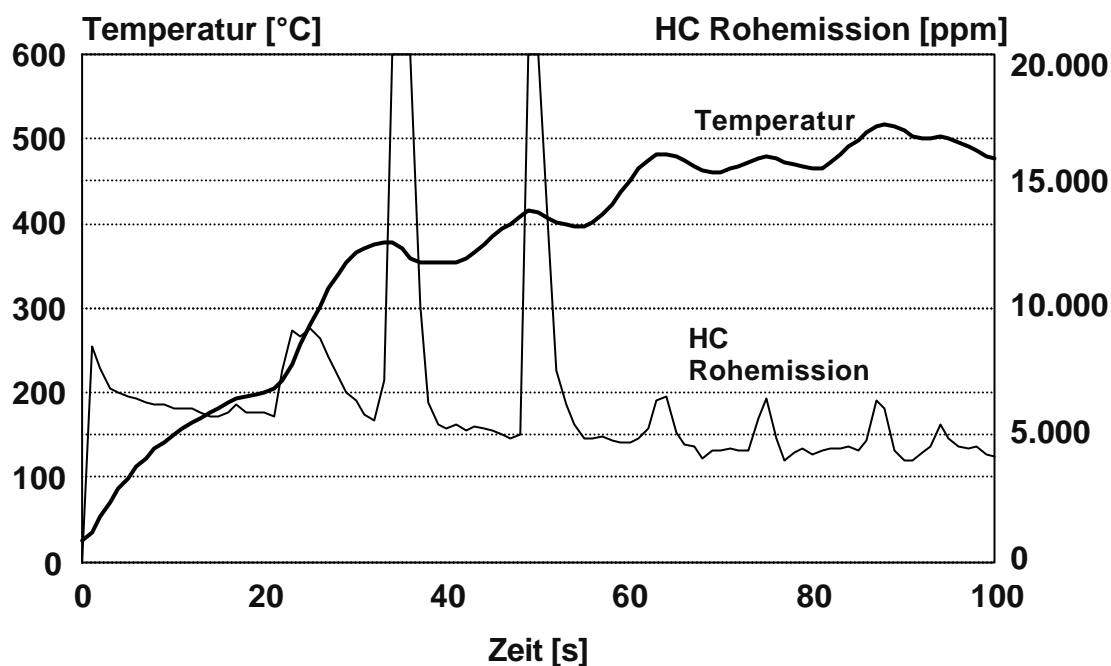


Fig. 8: temperatura dei gas di scarico a monte del catalizzatore ed emissione lorda HC durante i primi 100 secondi di un test FTP

La progettazione del sistema di catalisi avvenne secondo i fattori di valutazione descritti nel capitolo 3. Il volume totale dovrebbe essere pari a 0,6...0,8 volte la cilindrata del motore. Il test venne coadiuvato dal programma di simulazione catalizzatore KatProg.

Quale idea fondamentale si tratta di sviluppare un sistema di catalisi che sia modularmente modificabile ed adeguabile alle nuove legislazioni fino al livello SULEV. A causa delle esigenze OBD, il sistema deve essere una soluzione "2 Brick" con la possibilità di sorvegliare separatamente il primo elemento. In considerazione di una buona distribuzione delle correnti e di una migliorata effettività di catalisi, il sistema trova un'esecuzione a cascata. Alla presenza di costrizioni di spazio e di pessimo flusso d'ingresso il primo elemento viene sostituito da un catalizzatore conico.

La compattezza delle cellule e lo spessore del film possono subire delle variazioni in subordinazione alle esigenze di effettività. Nel caso di applicazioni alla presenza di elevate emissioni lorde ovvero di basse temperatura è presente la possibilità di sostituire il primo elemento con un catalizzatore riscaldabile elettricamente, consistente di un disco di riscaldamento ed un catalizzatore di supporto. La figura 9 illustra il principio del sistema in diverse varianti d'esecuzione.

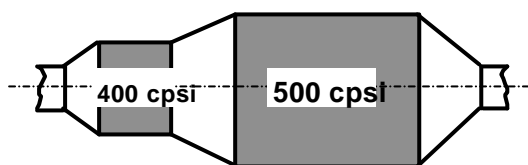
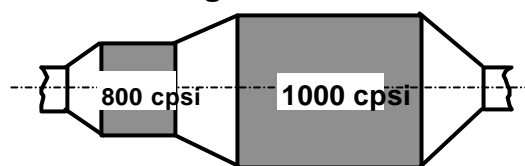
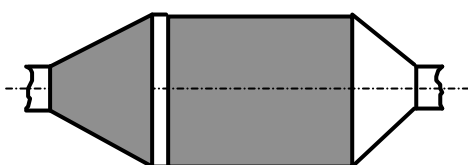
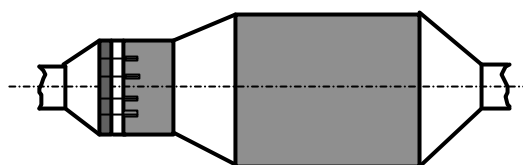
Kaskadensystem:**Kaskadensystem mit erhöhter Effektivität:****ConiCat System:****EmiCat System:**

Fig. 9: varianti d'esecuzione di un sistema a costruzione modulare

5) Risultati di emissione e di calcolo

Un sistema di catalisi a struttura modulare offre la possibilità di applicare un'applicazione a diversi valori limite dei gas di scarico senza necessità di modificare il canning. Ciò è ovviamente possibile solo con un parallelo ulteriore sviluppo del motore e della sua gestione. Catalizzatori con cellule compattate e film ultrasottili sono possibili solo alla presenza di una gestione ottimale del motore senza punte di emissione HC durante l'esercizio dell'azionamento. Nel caso di tali catalizzatori altamente attivi con bassa capacità termica conducono, a differenza dei catalizzatori con più bassa capacità termica e film più spessi, le punte di emissione HC conducono ad estremi incrementi di temperatura e di conseguenza ad invecchiamento del catalizzatore. Il volume totale del catalizzatore ammonta a 1,4 l ed è pari al 70% della cilindrata del veicolo testato.

Tabella 4: variazioni di un sistema modulare di catalisi

	1° elemento Ø 80 x 74.5 mm			2° elemento Ø 110 x 110 mm	
	Compattezza delle cellule/ Spessore del film		Fattore di avviamento a freddo	Compattezza delle cellule/ Spessore del film	Fattore di effettività
LEV / EG III	300cpsi / 0,05		0.01	500cpsi / 0,05	4.6
ULEV / EG IV	600cpsi / 0,04		0.12	800cpsi/0,03	7.0
SULEV	800cpsi / 0,03		0.16	1000cpsi / 0,025	8.6
EZEV	Disco di riscaldamento: 600cpsi / 0.04	Catalizzatore di supporto 800cpsi / 0,03	0.12 / 0.16	1200 cpsi / 0,025	10.1

L'immagine qui seguente illustra il tasso di trasformazione HC e le calcolate emissioni HC accumulate durante i primi 100 secondi di un test FTP. Per offrire una maggiore sicurezza al programma ed alla effettività del catalizzatore vennero eseguiti preventivamente, con una possibile trasgressione <5%, calcoli di comparazione con i risultati delle misurazioni dei gas di scarico del catalizzatore originale.

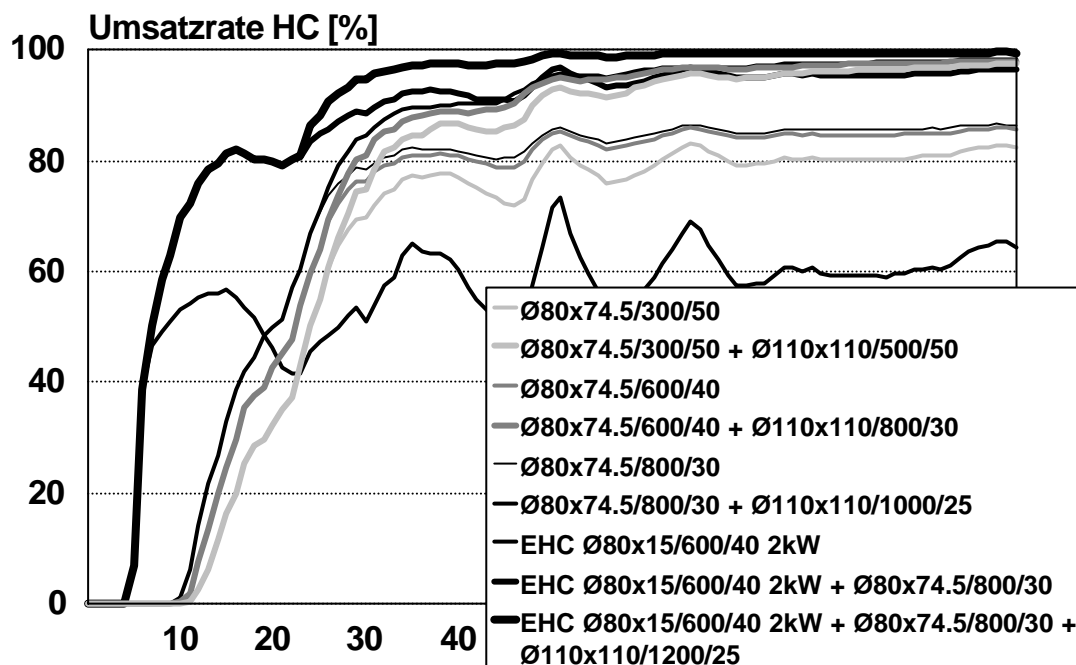


Fig. 10: tassi di trasformazione HC di diversi impianti di catalisi durante i primi 100 secondi di un test FTP

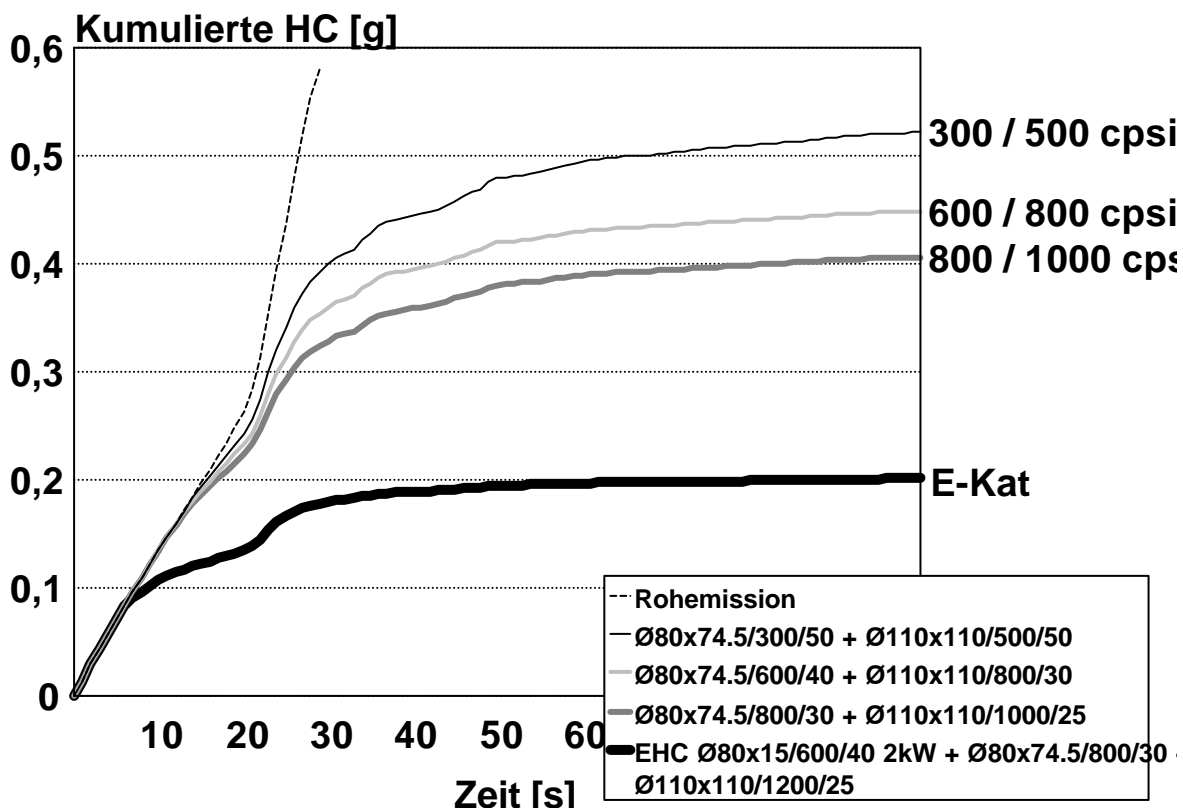


Fig. 11: emissioni accumulate di HC di diverse varianti di catalisi durante i primi 100 secondi di un test FTP

I risultati dei calcoli dimostrano che il vantaggio di una maggiore compattezza delle cellule in unione ad un film di sottile spessore. Con un canning identico le emissioni nel caso di avviamento a freddo possono essere ridotte del 23% passando da 300 cps / 0,5 mm ad 800 cps / 0,03 mm. La supplementare applicazione di un catalizzatore riscaldabile elettricamente apporta un potenziale di miglioramento nell'avviamento a freddo del 60%. Secondo l'esperienza fatta, anche a temperatura d'esercizio l'incremento di compattezza delle cellule permette un distinto miglioramento di effettività del catalizzatore grazie ad un migliore flusso nei canali.

La possibilità realizzare una migliore effettività del catalizzatore con un identico canning offre una soluzione ottimale al riguardo dei costi nel caso dei veicoli che devono rispettare differenti valori di emissione durante il loro ciclo di produzione.

6) Sinossi

I valori limite di emissione ottenuti in America con prototipi dimostrano che nel futuro sarà possibile la costruzione di veicoli i quali emetteranno gas di scarico meno inquinati dell'aria aspirata dal motore. Ciò significa che l'automobile risanerà l'ambiente.

A prescindere dalle emissioni di CO₂, una comparazione fra diversi concetti di propulsione attualmente in discussione da appoggio al concetto che il motore a ciclo Otto avrà un ruolo determinante in un prossimo futuro dai 10 ai 15 anni. L'importanza del CO₂ in tale relazione è sicuramente subordinata alla questione della misura in cui il biossido di carbonio veramente contribuisce al globale effetto serra oppure se viene usato quale argomento di pressione nella politica.

Per mantenere i limiti dei valori delle emissioni che verranno imposti nel caso dei motori a ciclo Otto sarà cosa assolutamente necessaria di ottimizzare, oltre al catalizzatore, anche i motori e la loro gestione. Il completo sistema di motore, gestione del motore, elementi del catalizzatore e strato catalizzante devono essere reciprocamente armonizzati. Se si rispettano tali premesse sarà possibile la realizzazione di sistemi modulari di catalisi all'altezza delle future prescrizioni.

I sistemi modulari di catalisi rendono possibile un economico adeguamento dell'effettività in seguito a incremento della compattezza delle cellule con contemporaneo decremento dello spessore del film (capacità termica) oppure con l'utilizzo di catalizzatori conici o elettricamente riscaldabili. Ciò significa che non è necessario un aumento del volume del catalizzatore per ottenere un miglioramento del completo sistema.

Attualmente sono in corso attività volte ad una conferma dei risultati calcolati in merito alle emissioni ed alla verifica dei fattori di durata utile, meccanica e termica, dei sistemi.