

## **Inhaltsverzeichnis**

|   | <b>Seite</b> |
|---|--------------|
| <b>Enhanced Environmentally Friendly Vehicles-EEV</b>                                   | <b>3</b>     |
| <b>1. Einleitung</b>  | <b>4</b>     |
| <b>2. Antriebskonzepte in der Diskussion</b>  | <b>8</b>     |
| <b>3. Emissionen</b>  | <b>9</b>     |
| <b>3.1 HC- und CO-Emissionen</b>  | <b>9</b>     |
| <b>3.2 Stickoxid-Emissionen</b>   | <b>10</b>    |
| <b>3.2.1 NO<sub>x</sub>-Adsorber</b>  | <b>11</b>    |
| <b>3.3 Partikel-Emissionen</b>  | <b>13</b>    |
| <b>3.4 Kohlendioxid-Emissionen</b>  | <b>14</b>    |
| <b>3.4.1 Kaltstart-CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Brennstoffzellen-Reformersystems</b> | <b>15</b>    |
| <b>4. Zusammenfassung</b>   | <b>18</b>    |
| <b>5. Literaturverzeichnis</b>  | <b>19</b>    |

## **Enhanced Environmentally Friendly Vehicles-EEV: Eine neue Herausforderung – Das Ende der Schadstoffemissionen?**

---

### ***Enhanced Environmentally Friendly Vehicles EEV: A New Challenge – The End of Vehicle Pollutants?***

Dipl. Ing. Wolfgang Maus; Emitec GmbH  
Dipl. Ing. Rolf Brück; Emitec GmbH

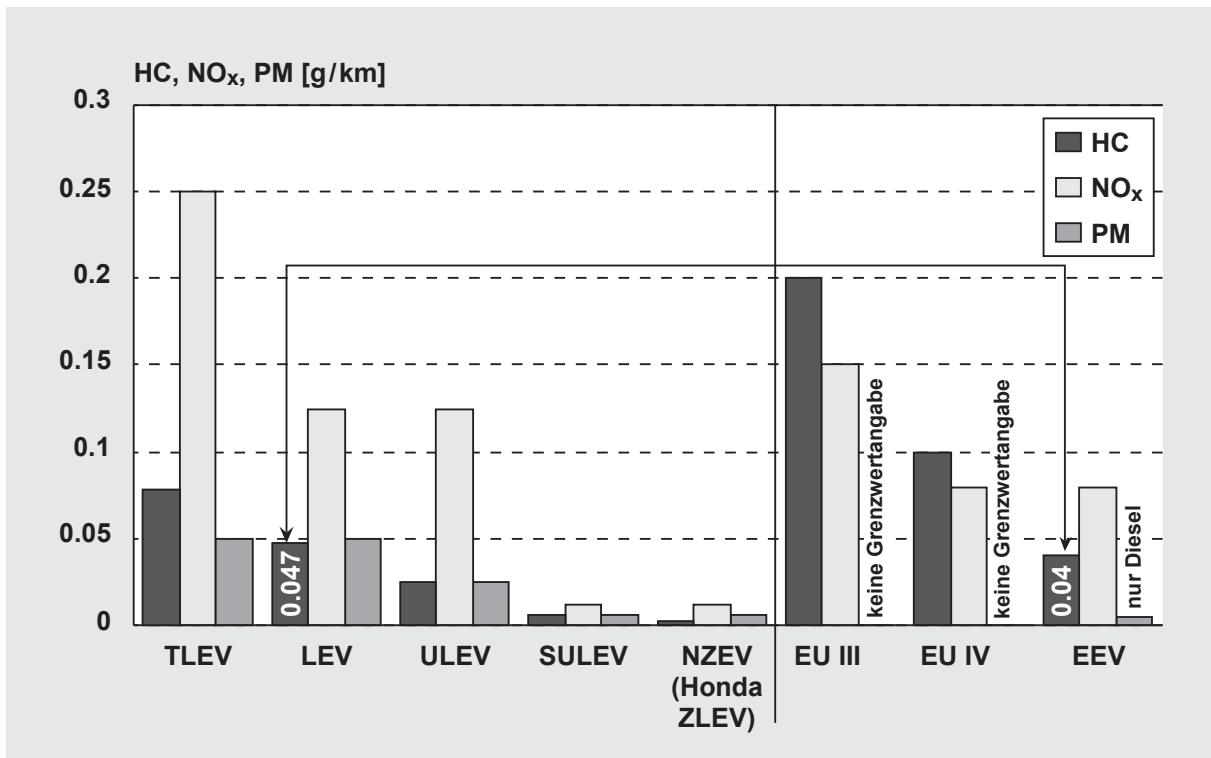
#### **Abstract:**

Zur Zeit wird für das Jahr 2010 eine sinnvoll verschärfte europäische Abgasgesetzgebung des sog. „Enhanced Environmentally Friendly Vehicle“ EEV diskutiert. Diese sieht eine weitgehende Gleichstellung aller Antriebskonzepte hinsichtlich der limitierten Schadstoffe vor. Die dann erforderliche Absenkung der toxischen Emissionen wie Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Partikel sowie der Verbrauch an fossilen Kraftstoffen bzw. die Emission von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) werden erörtert. Darauf aufbauend werden die möglichen Abgasnachbehandlungssysteme, insbesondere für die Stickstoffoxid-Reduzierung der Magermotoren (Otto-Direkteinspritzer, Diesel) bewertet und im Vergleich zu alternativen Konzepten wie der Brennstoffzelle dargestellt. Zur Einschätzung eines auch längerfristig zu erwartenden Zielkorridors für eine zukünftige umweltgerechte Mobilität werden US-amerikanische Grenzwerte miteinbezogen und erreichbare HC-Endrohr-Emissionen repräsentativen Umgebungsmissionen gegenübergestellt.

*The new european 2010 emission legislation “Enhanced Environmentally Friendly Vehicles” EEV, which is in discussion today, demands an equalization of all engines regarding the limited emissions. The needed conversion rates of Carbon Monoxyd (CO), Hydro Carbons (HC), Nitrogen Oxyds (NO<sub>x</sub>), Particulates and the consumption of fossil fuels respectively the emission of Carbon Dioxyd (CO<sub>2</sub>) will be discussed. Based on that, possible aftertreatment systems, especially regarding the NO<sub>x</sub> reduction of lean burn engines like gasoline direct injected and Diesel engines, will be rated and presented in comparison to alternative solutions as for example the fuel cell. For a realistic assessing of tomorrow’s mobility including all environmental aspects, exhaust gas regulation limits in the US will be considered and HC emissions will be compared to environmental imissions.*

# 1. Einleitung

Der Beitrag des Kraftfahrzeugs an der Umweltbelastung sowie die daraus resultierende Forderung politischer Minoritäten, Verkehr zu vermeiden, wurde in der Vergangenheit sehr emotional geführt. Inzwischen hat sich die Debatte versachlicht: Zum einen durch die technisch – umweltpolitische Erfolgsgeschichte des Automobils hinsichtlich der Verringerung der toxischen Emissionen und zum anderen durch das Wissen, dass Mobilität eine der Voraussetzungen für Wohlstand ist. Politische Anreize in Form sehr niedriger, zunächst unrealistisch erscheinender Emissionsstandards, haben diesen positiven Trend aus Kalifornien heraus entscheidend beeinflusst. Steuerentlastungen für umweltgerechtere Fahrzeuge waren ebenfalls hilfreich. Die Einführung der strengsten bestehenden „Zero Emission Vehicle“-Gesetzgebung in Kalifornien zeigt jedoch, dass solche Einflußnahme – ohne ausreichendes technisches Grundwissen – Fehlentwicklungen generieren kann. Gesetzgeberisch favorisiert wurde das Elektrofahrzeug. Bis heute ist es jedoch nicht gelungen, solche Fahrzeuge mit alltagstauglicher Energieversorgung und vergleichbaren Leistungsdaten kostengünstig herzustellen. Selbst von Seiten der Umweltbilanz war dies ein Mißgriff. Der Markt lehnt solche Fehlentwicklungen ab, so dass der kalifornische Gesetzgeber neue Grenzwerte wie zum Beispiel die „Super Ultra Low Emission Vehicle“ SULEV-Standards einführen mußte.



**Abbildung 1: Europäische und amerikanische HC-, NO<sub>x</sub>- und PM-Grenzwerte im EU III- und FTP-Test**

Tatsache ist, dass Kraftfahrzeuge mit modernen Verbrennungsmotoren und Abgasnachbehandlungssystemen heute auch schärfste Abgasgrenzwerte einhalten können [1, 2]. Abbildung 1 zeigt den Trend der kalifornischen (auf g/km umgerechnet) und europäischen Abgasgesetzgebung am Beispiel der erforderlichen Kohlenwasserstoff (HC)-, Stickoxid (NO<sub>x</sub>)- und Partikel-Grenzwerte. Der Einfluß der unterschiedlichen Testzyklen wurde hierbei vernachlässigt, da das Emissionsverhalten bei entsprechender Applikation in beiden Tests ähnlich ist.

Dieser Vergleich läßt erkennen, dass die bestehenden Grenzwerte in Kalifornien denen in Europa um mehrere Jahre voraus sind.

Betrachtet man die zukünftigen Anforderungen für „saubere“ Fahrzeuge in Kalifornien und die machbaren in Europa unter dem Gesichtspunkt der „besten verfügbaren Technologie“, so sollte das kalifornische „Near Zero Emission Vehicle“ NZEV – mit dem europäischen EEV-Gesetzesvorschlag verglichen werden. Das Ziel der NZEV-Gesetzgebung ist es, Fahrzeuge herzustellen, deren Emissionen mit denen bei der Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge in den Kraftwerken vergleichbar ist.

Entsprechend einer Feststellung der Europäischen Kommission vom 13.12.2000 [3] soll das EEV-Abgas-Grenzwertkonzept bei allen Antriebskonzepten weitgehend gleich gehalten werden. Es soll dazu beitragen, die verbleibenden Emissionsprobleme des Straßenverkehrs – wie lokal hohe NO<sub>2</sub>- Emissionen, Partikel, Treibhausgas CO<sub>2</sub> und die Bildung von Ozon – zu lösen. EEV wird zur Zeit als optionaler Grenzwert angesehen, so dass der Kunde, unterstützt durch Steuervergünstigungen, die Wahl hat, sich ein umweltfreundlicheres Fahrzeug anzuschaffen. Die zur Zeit in Diskussion befindlichen Grenzwerte sind in Tabelle 1 aufgelistet.

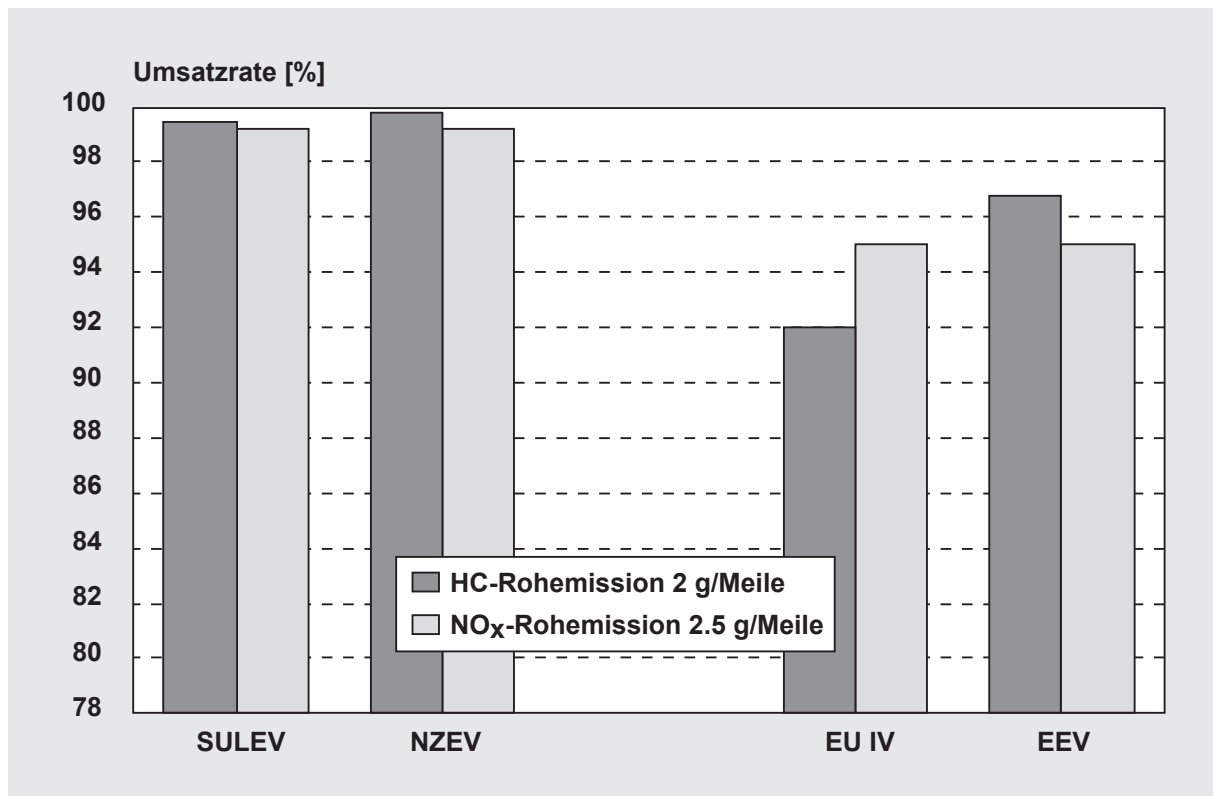
|                    | CO<br>[g/km]   | HC<br>[g/km] | NO <sub>x</sub><br>[g/km] | NMHC<br>[g/km]  | CH <sub>4</sub><br>[g/km] | PM<br>[g/km]    |
|--------------------|----------------|--------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| Otto-<br>motoren   | 1.0<br>(EU IV) | 0.04         | 0.08<br>(Euro IV)         | keine<br>Angabe | keine<br>Angabe           | keine<br>Angabe |
| Diesel-<br>motoren | 0.5<br>(EU IV) | 0.04         | 0.16                      | keine<br>Angabe | keine<br>Angabe           | 0.005           |
| LPG                | 1.0<br>(EU IV) | 0.04         | 0.08<br>(Euro IV)         | keine<br>Angabe | keine<br>Angabe           | keine<br>Angabe |
| NG                 | 1.0<br>(EU IV) | 0.04         | 0.08<br>(Euro IV)         | keine<br>Angabe | 0.1                       | keine<br>Angabe |

**Tabelle 1: In Diskussion befindliche EEV-Grenzwerte für Fahrzeuge der Kategorie M1 (PKW) und N1-Klasse 1 (Ref. Weight ≤ 1305 kg) [4]**

Die in Tabelle 1 angeführten Werte entsprechen dem Stand vom 13.12.2000 (11.04.2000). Die ursprüngliche Idee, alle Antriebskonzepte gleich zu behandeln, wurde bezüglich der NO<sub>x</sub>- Emissionen bei Otto- und Dieselmotoren aufgegeben.

Im Vergleich zu dem EU IV-Grenzwert reduzierten sich die HC-Emissionen von 0.1 g/km bei Ottomotoren bzw. 0.3 g/km NMHC bei Dieselmotoren auf 0.04 g/km. Im oben beschriebenen Vergleich zu den kalifornischen Grenzwerten entspricht der HC-Grenzwert rechnerisch gerade einmal der seit 1999 in Kalifornien geltenden Emissionsstufe des „Low Emission Vehicle“ LEV.

Betrachtet man die notwendigen Umsatzraten als Maß des Aufwandes für die Abgasnachbehandlung eines EEV und „Near Zero Emission Vehicle“ NZEV im direkten, oben beschriebenen Vergleich



**Abbildung 2:** Vergleich der erforderlichen HC- und NO<sub>x</sub>-Umsatzraten des kalifornischen NZEV- und des europäischen EEV-Gesetzesvorschlags

(Abbildung 1), so ist hier festzustellen, dass die heute als machbar eingestuften SULEV-HC, -CO und -NO<sub>x</sub>-Grenzwerte deutlich schärfer angesetzt wurden.

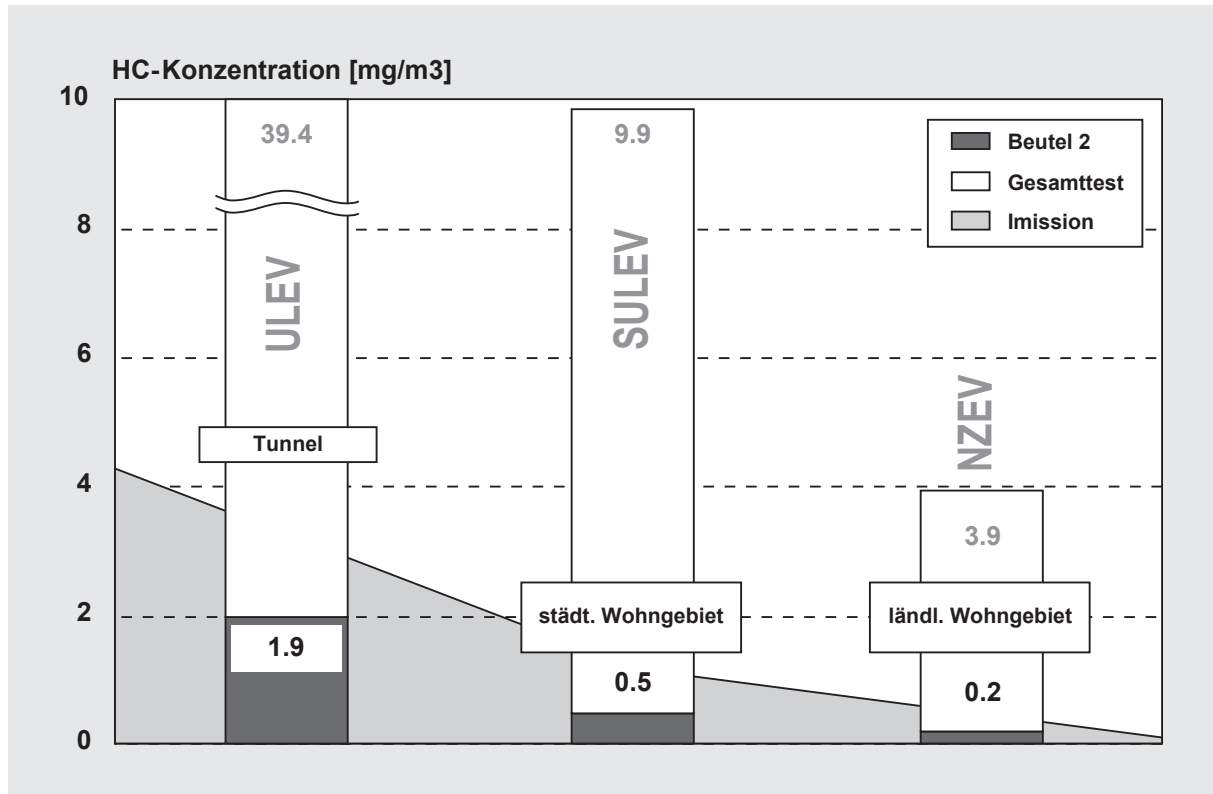
Den Umsatzraten wurde eine HC-Rohemission von 1.25 g/km (2.0 g/Meile) und eine NO<sub>x</sub>- Rohemission von 1.6 g/km (2.5 g/Meile) zugrundegelegt. Dies gilt ebenfalls für die Partikelemissionen. In Europa soll allerdings auch zusätzlich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch eine freiwillige Selbstbeschränkung der Automobilindustrie auf 140 g/km als Flottendurchschnitt bis 2008 begrenzt werden.

Für die Entwicklungsarbeiten der Automobil- und Zuliefererindustrie haben langfristige Ziele größte wirtschaftliche Bedeutung. Gravierende Investitionsrisiken werden dann erzeugt, wenn neue Grenzwertanforderungen den Umstieg auf nicht großserienfähige alternative Antriebskonzepte erfordern könnte (NZEV, ZEV). Für weltweit operierende Unternehmen muß deshalb als Benchmark der jeweils schärfste Grenzwert (als Einzelanforderungen) zur Ausrichtung der Entwicklungsschwerpunkte berücksichtigt werden. Abgasgesetze sind aus diesem Grunde auch industriepolitische Steuerungselemente [5].

Die langfristig einzuplanende Maximalforderung ist, das Auto hinsichtlich der limitierten, toxischen Emissionen so „sauber“ werden zu lassen, dass Abgas mit mindestens so niedrigen Schadstoffkonzentrationen emittiert wird, wie an Umweltbelastung vorhanden ist. Das bedeutet, dass das Automobil die Umwelt nicht belastet, sondern diese sogar reinigen kann. Um dies zu verdeutlichen, ist es notwendig, die Imissionen in Großstädten, Dörfern oder auf dem Land mit den Schadstoffkonzentrationen des Autoabgases zu vergleichen.

Aus den Grenzwerten und dem kumuliertem Abgasmassenstrom im Testzyklus ist es möglich, die mittlere HC-Restkonzentrationen im Abgas zu berechnen [6].

Der in Abbildung 3 dargestellte Vergleich dieser Emissionen mit den Immissionen in unterschiedlich bebauten und besiedelten Gebieten [7, 8] macht deutlich, dass bereits ULEV-Fahrzeuge mit aktivem, betriebswarmen Katalysatorsystem in hoch belasteten Stadtgebieten, wie z. B. in Tunneln, niedrigere Schadstoffkonzentrationen erreichen, als dort heute gemessen werden. NZEV-Fahrzeuge erfüllen dieses Kriterium sogar unter Einbeziehung der Kaltstart-Emissionen.



**Abbildung 3: Mittlere HC-Schadstoffkonzentrationen eines Mittelklassefahrzeugs im FTP-Test in Abhängigkeit der erreichten Grenzwerte im Vergleich zu den Immissionen**

Diese Betrachtung macht deutlich, dass Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren bezüglich der HC-Emissionen dabei sind, so sauber zu werden, dass zur weiteren Reduzierung der Treibhausgase möglicherweise die Grenzwerte für andere Emissionsquellen verschärft werden müssen.

Trotz dieser Erfolge des Verbrennungsmotors ist es wegen der begrenzten Ölvorräte und des möglichen Beitrags von CO<sub>2</sub> zum Treibhauseffekt notwendig, die Vor- und Nachteile neuer Antriebskonzepte mit ggf. noch besserem Umweltverhalten zu erforschen.

Hier werden vor allem Otto-Magerkonzepte, Hybridantriebe, Wasserstoffmotoren und die Brennstoffzelle mit Reformer oder Wasserstoffbetrieb diskutiert. Wie vorher erwähnt, wurden Batterie-Fahrzeuge – was Gebrauchswert und Umweltbilanz angeht – früher überschätzt. Würden effizientere Energiespeicher für Elektrofahrzeuge bekannt, müssten diese Konzepte ggf. erneut für Sonderfälle mitbetrachtet werden. Alle genannten alternativen Konzepte müssen sich jedoch mit dem heute sehr weit entwickelten, kostengünstigen Verbrennungsmotor messen.

## 2. Antriebskonzepte in der Diskussion

In den Wirtschaftsräumen USA und Europa herrscht keine einheitliche Meinung über die Dringlichkeit der zu reduzierenden Emissionen vor. In Europa – und hier speziell in Deutschland – gesteht man eher dem globalen Kohlendioxid-/Klima-Problem einen großen Stellenwert zu. In den USA werden die gesundheitsgefährdenden Auswirkungen der Gase und Partikel auf die amerikanische Bevölkerung sehr viel ernster genommen. US-amerikanische Politiker weisen zur Begründung ihrer Haltung auch darauf hin, dass der Einfluß der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch PKWs nur 0.2 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen [9]. Entsprechend gering können sich auch nur die von EU-Umweltpolitikern geforderten und politisch unterstützten CO<sub>2</sub>-Absenkungsmaßnahmen auf mögliche Klimaveränderungen auswirken. Die unterschiedlichen Politikansätze müssen deshalb auch die Bewertungsmaßstäbe für optimale Antriebskonzepte verschieben. Folgende Konzepte werden hier näher diskutiert:

- Otto-Motor ( $\lambda = 1$ )
- Otto-Benzin-Direkteinspritzer-Motor (BDE)
- Diesel-Motor
- Hybrid-Fahrzeug
- Brennstoffzelle mit H<sub>2</sub> fremdversorgt
- Brennstoffzelle mit H<sub>2</sub> aus bordeigenem Methanol-Reformer

Neben den, meist noch in der Entwicklung befindlichen Otto-BDE-Magerkonzepten und Hybrid-Fahrzeugen, wurden die Dieselmotoren konsequent weiterentwickelt und stellen heute einen Anteil von nahezu 30 % bei den Neuzulassungen in Deutschland. Konsequenterweise gibt es nun seitens des Gesetzgebers verstärkte Überlegungen, das NO<sub>x</sub>-Privileg und die Partikelemissionen, insbesondere die

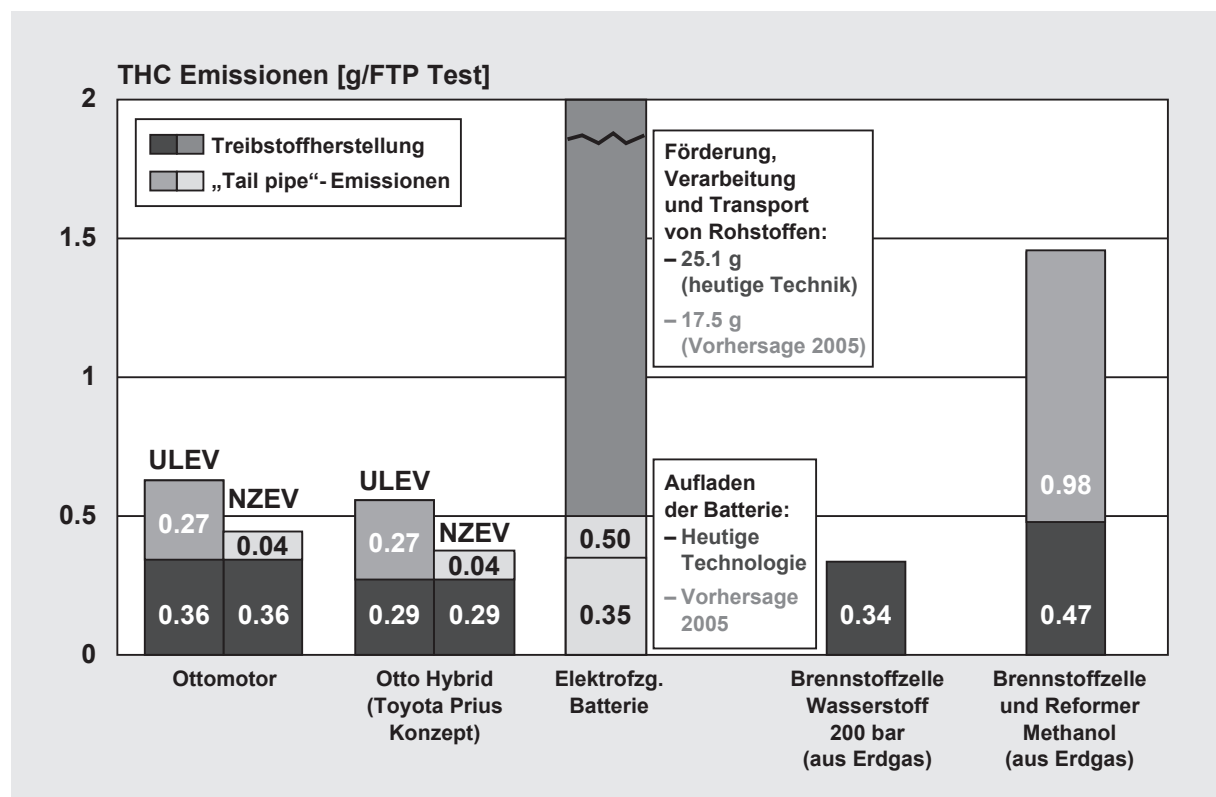


Abbildung 4: THC-Emissionen unterschiedlicher Antriebskonzepte während des Betriebs, unter Berücksichtigung der Herstellung des im FTP-Test benötigten Treibstoffs

Feinstpartikel, zu beschränken. Dabei ist das Gefahrenpotential der im täglichen Verkehr anfallenden Partikelemissionen nicht eindeutig geklärt. Es gibt allerdings Hinweise auf Gesundheitsgefährdung.

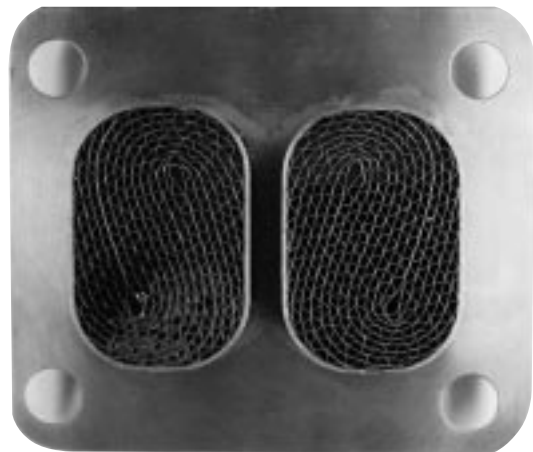
Obwohl – wie erwähnt – auch der Einfluß von CO<sub>2</sub> auf die Klimaveränderungen nicht restlos geklärt ist, bleibt ein Entwicklungsziel: das Treibstoffsparen. Dies dient sicherlich der Schonung der Ressourcen, jedoch in jedem Falle der Kosteneinsparung.

### 3. Emissionen

---

#### 3.1 HC- und CO-Emissionen

Im folgenden werden sowohl die beim Betrieb des Fahrzeugs entstehen Emissionen betrachtet, als auch diejenigen Emissionen, die bei der Herstellung der Brennstoffe entstehen. Allerdings sind die Angaben aus der Literatur speziell bzgl. der Brennstoffherstellung unterschiedlich. In Abbildung 4 sind demnach die HC-Emissionen verschiedener Antriebskonzepte (Otto-Motor, Hybrid, Elektrofahrzeug sowie Brennstoffzelle (H<sub>2</sub>) bzw. CH<sub>3</sub>OH-Reformer) miteinander verglichen [10,11]. Dabei wird unterschieden zwischen den Emissionen bei der Herstellung bzw. Bereitstellung der Antriebsenergie und den Emissionen im Betrieb des jeweiligen Konzepts. Hier wird klar ersichtlich, dass sowohl Elektrofahrzeuge als auch das Brennstoffzellenkonzept mit Reformer um ein vielfaches höhere Emissionen verursachen als beispielsweise der Ottomotor bzw. das Hybridkonzept.



*Abbildung 5: Diesel-Vorturbolader-Katalysator*

Selbst die fremdversorgte Brennstoffzelle verursacht aufgrund der H<sub>2</sub>-Herstellung aus Erdgas im oben gezeigten Beispiel annähernd dieselbe HC-Emission wie ein Hybrid-Konzept mit Verbrennungsantrieb, welches Grenzwerte auf NZEV-Niveau erreicht.

Veröffentlichungen zeigen, dass mit einem Lambda 1-geregelten Ottomotor bereits heute „Near Zero Emission“ Werte in Serie eingehalten werden können [1].

Der Dieselmotor benötigte in der Vergangenheit aufgrund seiner niedrigen Rohemissionen keine Abgasnachbehandlung. Für die Zukunft ist es möglich, durch neue motornahe Katalysatorsysteme wie z. B. Vorturboladerkats (Abbildung 5) [12, 13] die HC- und CO-Emissionen sehr effektiv umzusetzen, so dass hier auch aufgrund des mageren Gemisches neben den Partikelemissionen nur die Stickoxide mit herkömmlichen Katalysatoren nicht umgesetzt werden können.

Ähnliches gilt auch für den Benzin-Direkteinspritzer-Motor (BDE-Motor), wobei jedoch aufgrund der im Vergleich zum Lambda 1-Motor höheren HC-Rohemissionen eine höhere Konvertierung erreicht werden muss.

Hybridantriebe, bestehend aus Elektromotor und Verbrennungsmotor (Otto oder Diesel) mit optimierten Katalysatoren, verhalten sich ähnlich dem entsprechend eingesetztem Verbrennungsmotor. Allerdings nur, wenn der Katalysator in den alleine durch elektrischen Strom angetriebenen Betriebsphasen auf Betriebstemperatur gehalten werden kann.

Bei Brennstoffzellen mit Wasserstoffbetrieb entstehen außer bei der Wasserstoffherstellung keine HC-Emissionen. Brennstoffzellen mit Reformern sind zur Zeit nicht abschließend bewertbar. Es liegen keine veröffentlichten Versuchsergebnisse der für den Kaltstart benötigten Brennersysteme bzw. der im realen, dynamischen Fahrbetrieb auftretenden Reformersystem-Emissionen vor. Abschätzung lassen erkennen, dass dem Kalt- und Wiederstart eine besonders hohe Bedeutung zukommen könnte.

Der Verbrennungsmotor mit Wasserstoffbetrieb erzeugt bei der Wasserstoffverbrennung selbst keine Emissionen. Es treten jedoch zusätzlich geringe Sekundäremissionen aufgrund der Kolbensmierung auf, die wiederum über ein Katalysatorsystem umgesetzt werden können.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Problem der HC- und CO-Emissionen bei den auch kostenseitig gut bekannten Antriebssystemen mit Verbrennungsmotor, mit optimierten Motormanagement und 3-Wege Katalysatoren auf SULEV/NZEV-Niveau gelöst werden kann. Hinsichtlich dieser Schadstoffe besteht also aus heutiger Sicht keine Notwendigkeit, weder Elektrofahrzeuge noch Brennstoffzellenkonzepte zu favorisieren, wie oben gezeigt wurde. Den HC-Emissionen wird in Europa wegen der 20-fachen Klima-Wirksamkeit wohl höhere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

## 3.2 Stickoxid-Emissionen

Der zur Zeit strengste Abgasgrenzwert für  $\text{NO}_x$  ist der kalifornische SULEV-Grenzwert von 0.02 g/Meile (zum Vergleich Europa: EEV mit 0.04 g/km, Diesel PKW), siehe auch Abbildung 1.

Wegen der elektrochemischen Umsetzung von Wasser- und Sauerstoff sind  $\text{NO}_x$ -Emissionen für keines der beiden Brennstoffzellenkonzepte zu thematisieren. Aber auch beim Ottomotor konnten mit Hilfe des 3-Wege-Konzepts – wie bereits gezeigt wurde – hinsichtlich dieser Abgaskomponente schon Resultate auf NZEV-Niveau erzielt werden. Deutlich höher ist hingegen die Anforderung an die Abgasnachbehandlung von Otto-BDE- und Dieselmotoren.

Zur  $\text{NO}_x$ -Reduktion im mageren Betriebszustand liegt der Schwerpunkt des Interesses heute bei den bereits serienreifen Abgasnachbehandlungssystemen:

- $\text{NO}_x$ - Adsorber
- Harnstoff-SCR

Für Lastkraftwagen wird ein Harnstoff-SCR System bevorzugt. Dies liegt vor allem an der Zielsetzung einer Motorenauslegung mit möglichst geringem Kraftstoffverbrauch. Durch die im Vergleich zu PKW-Motoren hohen absoluten  $\text{NO}_x$ -Emissionen wäre bei Adsorbersystemen ein häufiges Regenerieren und damit ein erhöhter Kraftstoffverbrauch hinzunehmen.

Bei Diesel-PKW's ist sowohl in Europa als auch in den USA der  $\text{NO}_x$ -Adsorber die favorisierte Lösung. Hintergrund ist hier vor allem der bei SCR-Systemen notwendige zusätzliche Harnstoff- oder Ammoniak-Betriebsstoff, der häufig ergänzt werden muß. Dies steht dem Wunsch nach einem möglichst einfach zu betreibenden Fahrzeug entgegen. Auswege wären Dualzapfsäulen, bei denen Diesel und Harnstoff gleichermaßen getankt werden können oder Festharnstoff-Speichersysteme, bei denen der Harnstoffvorrat für ein Wartungsintervall aufgenommen würde. Ab EU-Stufe IV (ohne Diesel-Privileg) und ab etwa USA LEV II kann eine  $\text{NO}_x$ -Reduktion erforderlich sein.

Es existieren zur Zeit Meßergebnisse sowohl an  $\text{NO}_x$ -Adsorbersystemen [14] als auch an SCR-Systemen [15], die beide  $\text{NO}_x$ -Reduktionsraten von etwa 75 % aufweisen. Mit beiden Techniken läßt sich der EU-IV-Diesel-Grenzwert also schon deutlich unterbieten. Speziell im Falle des  $\text{NO}_x$ -Adsorbers bergen die Systeme noch großes Potential für weitere Reduktion, insbesondere auch seitens der Katalysatorträger [16].

Deshalb wird im folgenden ein  $\text{NO}_x$ -Adsorber System näher betrachtet werden, dessen Einsatz sowohl beim Diesel als auch beim BDE-Motor möglich ist.

### 3.2.1 NO<sub>x</sub>-Adsorber

Die Funktion der NO<sub>x</sub>-Adsorber, im mageren Gemisch Stickoxide zu speichern und kurzfristig im fetten Betriebszustand die gespeicherten Stickoxide umzusetzen, ist bekannt [17, 18, 19]. Der Grundvoraussetzung, schwefelarme, -freie Kraftstoffe zu verwenden, wurde mittlerweile sowohl vom Gesetzgeber als auch von den Kraftstoffherstellern Rechnung getragen. Als heute kritischster Punkt bleibt die Betriebstemperatur. Die heutigen NO<sub>x</sub>-Adsorber speichern, die Stickoxide in einem Temperaturbereich von ca. 200 - 500 °C. Die maximale Temperaturbeständigkeit reicht bis etwa 850 °C.

Zur Ausweitung des Magerbetriebes hin zu höheren Fahrgeschwindigkeiten und zum Schutz des Adsorbers vor hohen Temperaturen im Lambda 1-betriebenen Volllastbereich, ist es notwendig, vor dem Adsorber einen Kühler zu installieren. Neue Beschichtungsentwicklungen [20] auf der Basis von Kalium erweitern sowohl das Temperaturfenster als auch die maximale Temperaturstabilität um etwa 100 K. Dadurch wird es u. U. möglich, den Kühler entfallen zu lassen und die Systemkosten zu senken.

Trotz Einsatz von schwefelarmen Kraftstoff ist es zur Erhaltung der Effektivität notwendig, den Adsorber von Zeit zu Zeit zu desulfatisieren. Die Desulfatisierung findet bei Temperaturen um 650 °C statt. Dabei muß der gesamte Adsorber für eine kurze Zeit, unabhängig von der vom Fahrer angeforderten Leistung/Betriebstemperatur, durchgeheizt werden. Da im realen Fahrbetrieb der Fahrerwunsch Priorität hat, wird es vorkommen, dass die Desulfatisierung unterbrochen werden muß. Dies wirkt sich besonders dann aus, wenn der Adsorber längere Zeit zum kompletten Durchheizen benötigt. Entsprechend spielt Größe und vor allem die Wärmekapazität des Adsorbers eine wichtige Rolle. Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz hoher Zelldichten (Abbildung 6) eine wichtige Möglichkeit darstellt, die Effektivität zu erhöhen oder damit die Katalysatorgröße zu reduzieren [16]. Der Effekt basiert auf dem besseren Massentransport der Schadstoffe aus der Gasphase an die katalytisch aktive Wand. Die Versuche wurden

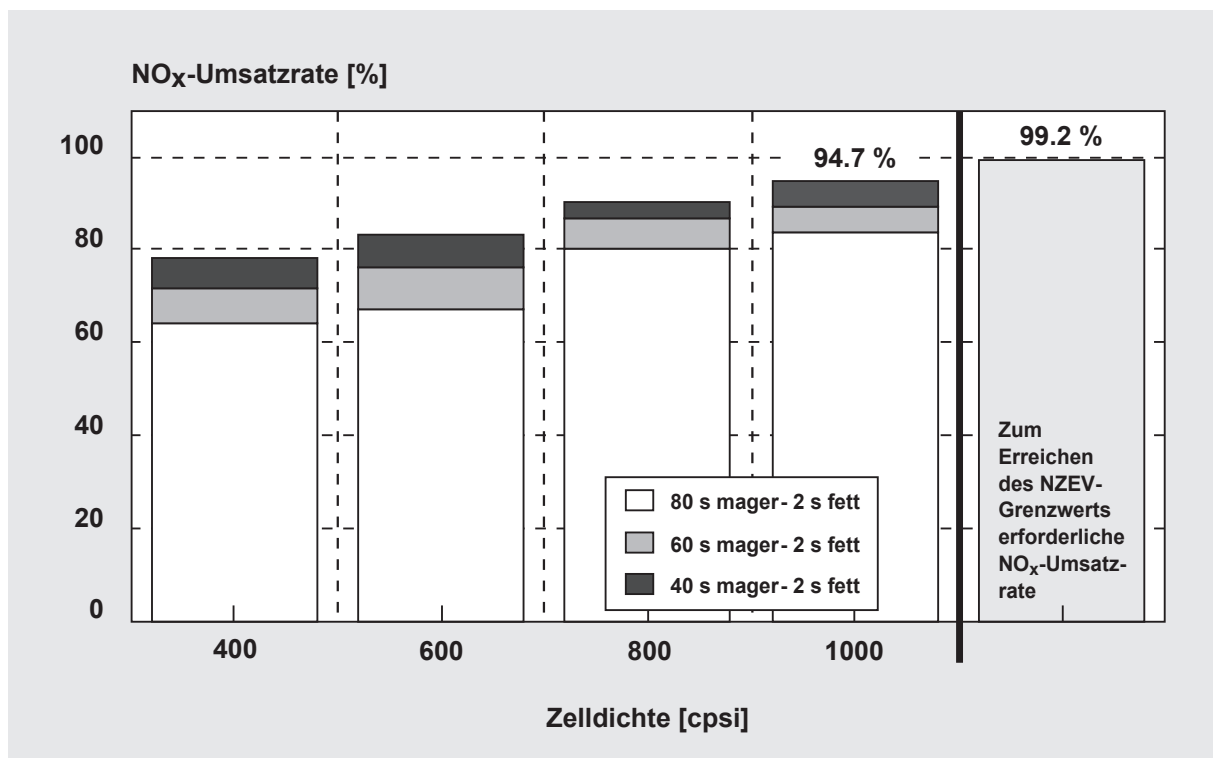


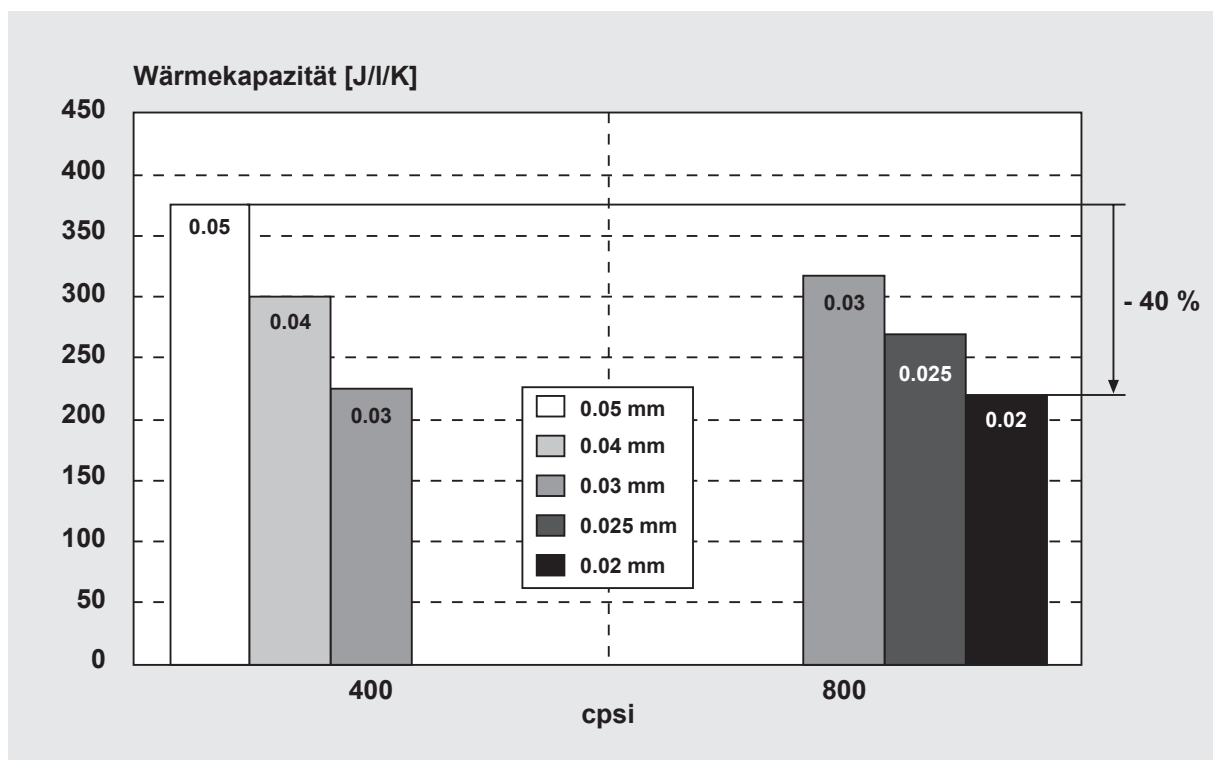
Abbildung 6: NO<sub>x</sub>-Adsorber-Effektivität als Funktion der Zelldichte bei konstantem Volumen [16]

am synthetischen Gasreaktor mit einem fahrzeugähnlichem Gasgemisch durchgeführt. Es wurden unterschiedliche Betriebspunkte mit drei verschieden lang andauernden Magerphasen getestet. Die Raumgeschwindigkeit betrug  $45\,000\text{ h}^{-1}$ .

Aufgrund der verbesserten Effektivität bei größeren Zelldichten ist es bei vorgegebener Effektivität auch möglich, das Adsorbervolumen zu reduzieren. Hierdurch wird nicht nur die Desulfatisierung erleichtert, sondern es lassen sich auch Kosten für die Beschichtung einsparen.

Eine weitere Möglichkeit stellt der Einsatz von Trägern mit geringen Wärmekapazitäten dar. Metallträger bieten die Möglichkeit, weitgehend unabhängig von der Zelldichte verschiedene Foliendicken einzusetzen. Abbildung 7 zeigt die Wärmekapazität eines 400-cpsi (Cells per inch<sup>2</sup>) und eines 800-cpsi Trägers in Abhängigkeit der Foliendicke (Volumen konstant).

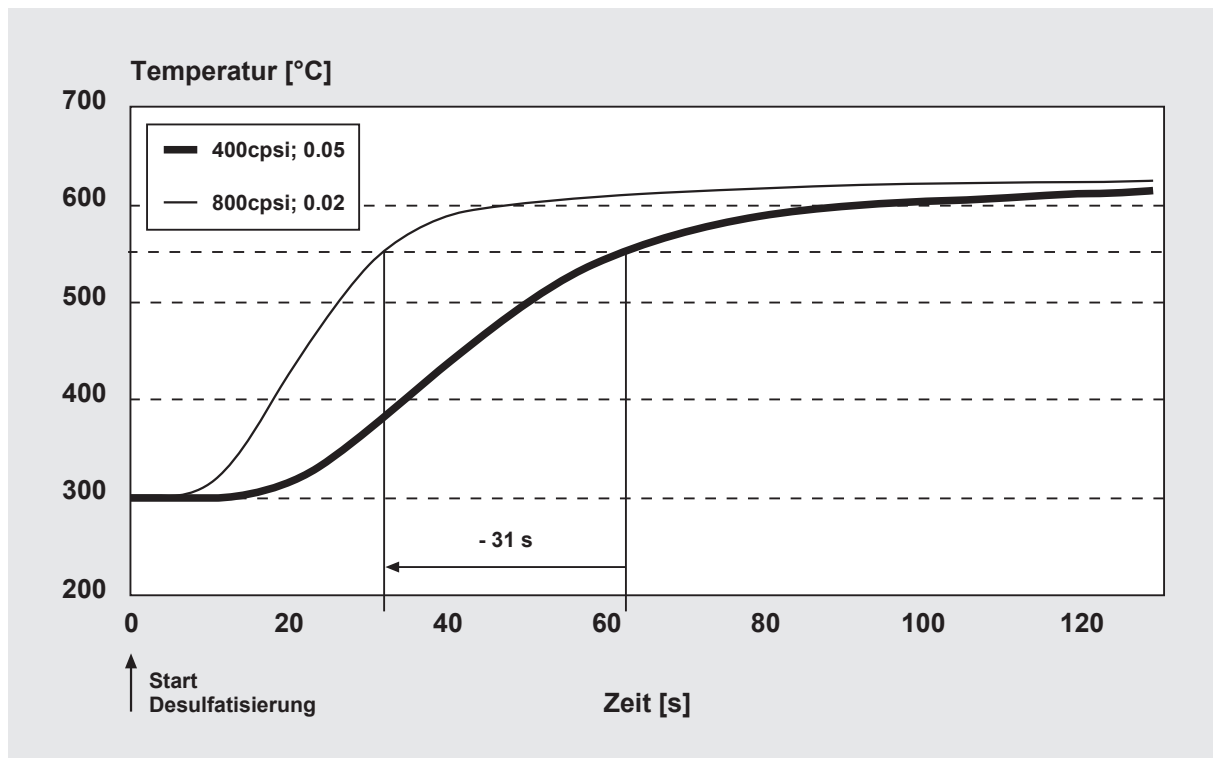
Die Auswirkungen auf das Aufheizverhalten zweier Träger gleicher Effektivität bei der Desulfatisierung ist in Abbildung 8 dargestellt. Es wurde ein Träger mit einer Zelldichte von 400 cpsi und einer Wandstärke von 0.05 mm; Volumen 1.6 l, mit Träger gleichen Durchmessers, aber 800 cpsi und einer Wandstärke von 0.02 mm und einem Volumen von 1.2 l verglichen. Die Träger hatten in etwa dieselbe geometrische Oberfläche. Die Washcoatmenge betrug 200 g/l. Es wurde ein Heizzyklus von 300 °C auf 650 °C mit einem Massenstrom von 80 kg/h angenommen.



**Abbildung 7:** Wärmekapazität eines Metallträgers in J/K als Funktion der Foliendicke

Es wird deutlich, dass bei vergleichbarer NO<sub>x</sub>-Umsetzung unter diesen Randbedingungen die Desulfatisierung alleine über das Volumen und die Wärmekapazität um 31 Sekunden verkürzt und so der Kraftstoffverbrauch gesenkt werden kann.

Als Fazit kann also folgendes gelten: Die in Abbildung 6 dargestellten, an einem synthetischen Gasreaktor bei einer Raumgeschwindigkeit von  $45\,000\text{ h}^{-1}$  gemessenen Umsatzraten bei kürzeren Magerzeiten lassen erwarten, dass mit hochzellichten Katalysatoren auch Umsatzraten entsprechend den EEV-Anforderungen



**Abbildung 8:** Vergleich des Aufheizverhalten eines  $\text{NO}_x$ -Adsorbers während der Desulfatisierung als Funktion der Foliendicke; Temperatur am Adsorberaustritt

für Diesel und BDE Motoren realisiert werden könnten. Zu klären bleibt, ob eine weitere Absenkung der Emissionen um Faktor 6 zur Erfüllung der USA-/Kalifornien-NZEV-Grenzwerte alleine mit Hilfe der Adsorber-Technologie erreicht werden kann. Aus heutiger Sicht wird es kein Diesel-Privileg in USA/Kalifornien geben.

### 3.3 Partikel-Emissionen

In der Vergangenheit waren Partikelemissionen nur beim Dieselantrieb in der Diskussion. Mit Entwicklung der Otto-DI-Motoren, die im Vergleich zum Lambda 1-Motor deutlich höhere Partikelemissionen aufweisen, wurde die Diskussion auch auf den Ottomotor übertragen.

Von seiten des Gesetzgebers existieren wiederum in Kalifornien mit der SULEV/NZEV-Gesetzgebung und in Europa mit EEV (für Diesel-PKW 0.005 g/km) die für die Fahrzeughersteller relevanten Grenzwertvorgaben.

Was die Erfüllbarkeit der Gesetzesvorlagen angeht, gilt – ähnlich den  $\text{NO}_x$ -Emissionen –, dass alle Brennstoffzellenkonzepte hiervon nicht betroffen sind. Auch bei den Ottomotoren sind naturgemäß kaum Probleme zu erwarten, da hier die Partikelemissionen im Vergleich zum Dieselmotor immer noch einen Faktor 5 kleiner als beim Dieselmotor sind [21]. Somit konzentriert sich die Entwicklungstätigkeit auf die Otto-BDE-Motoren und den Diesel. Es sind Forschungsergebnisse verfügbar, bei denen Partikel durch teilweise serienreife Filtersysteme mit Filterraten über 90 % reduziert werden. So wurden mit Partikelkonzentrationen von 0.004 g/km im EU-IV-Test nach Filter schon Emissionen erzielt, die auf dem Niveau der angesaugten Verbrennungsluft liegen [22]. Praktische Erfahrung hinsichtlich der Langzeitstabilität der Filter liegen zur Zeit jedoch noch nicht vor.

Als Fazit bleibt festzustellen, dass – ähnlich wie bei den Schadstoffen HC und CO – auch bei den Partikeln Konzentrationen erzielt werden können, die das Niveau in der Umgebungsluft erreichen oder sogar noch unterbieten. Dies zu erreichen, ist letztendlich nur eine Frage des zu betreibenden Aufwands.

### 3.4 Kohlendioxid-Emissionen

Im Gegensatz zu den oben diskutierten Schadstoffen gibt es bei dem Treibhausgas CO<sub>2</sub> keine für die Fahrzeughersteller verbindliche gesetzliche Regelungen. Es existiert lediglich eine Absichtserklärung der Fahrzeughersteller in Form einer freiwilligen Selbstbeschränkung, die einen CO<sub>2</sub>-Emissionszielwert von 140 g/km vorsieht.

Beim Vergleich der unterschiedlichen Antriebskonzepte hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emission ist es von großer Bedeutung, ob man die Emissionen in einem Testzyklus mit niedriger, mittlerer oder hoher Last vergleicht. Abbildung 9 zeigt die relativen CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Antriebssysteme im Vergleich zum Lambda 1-Ottomotor [23].

Aus dem Vergleich der Systeme geht unter anderem hervor, dass der Ottomotor ( $\lambda = 1$ ) aufgrund seiner Drosselverluste hauptsächlich im Niedriglastpunkt benachteiligt ist. Bei höheren Lastpunkten werden jedoch die Unterschiede zwischen den einzelnen Antriebskonzepten weniger groß. Die Wasserstoff-Brennstoffzelle zeigt dieses Verhalten nicht. Beim Verbrennungsmotor wird auch der Einsatz von CVT-Getrieben, variablen Ventilsteuerungen und von Magerkonzepten dafür sorgen, dass der Verbrennungsmotor möglichst häufig im günstigsten Betriebspunkt arbeiten kann. Lediglich das fremdversorgte Wasserstoff-Brennstoffzellensystem zeigt also hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Problematik deutliche Vorteile. Die Angaben der Brennstoffzelle bzw. des Brennstoffzellen/Reformer-Systems beziehen sich hierbei auf den betriebswarmen Zustand. Die für den Kaltstart benötigten Energien werden im folgenden separat betrachtet.

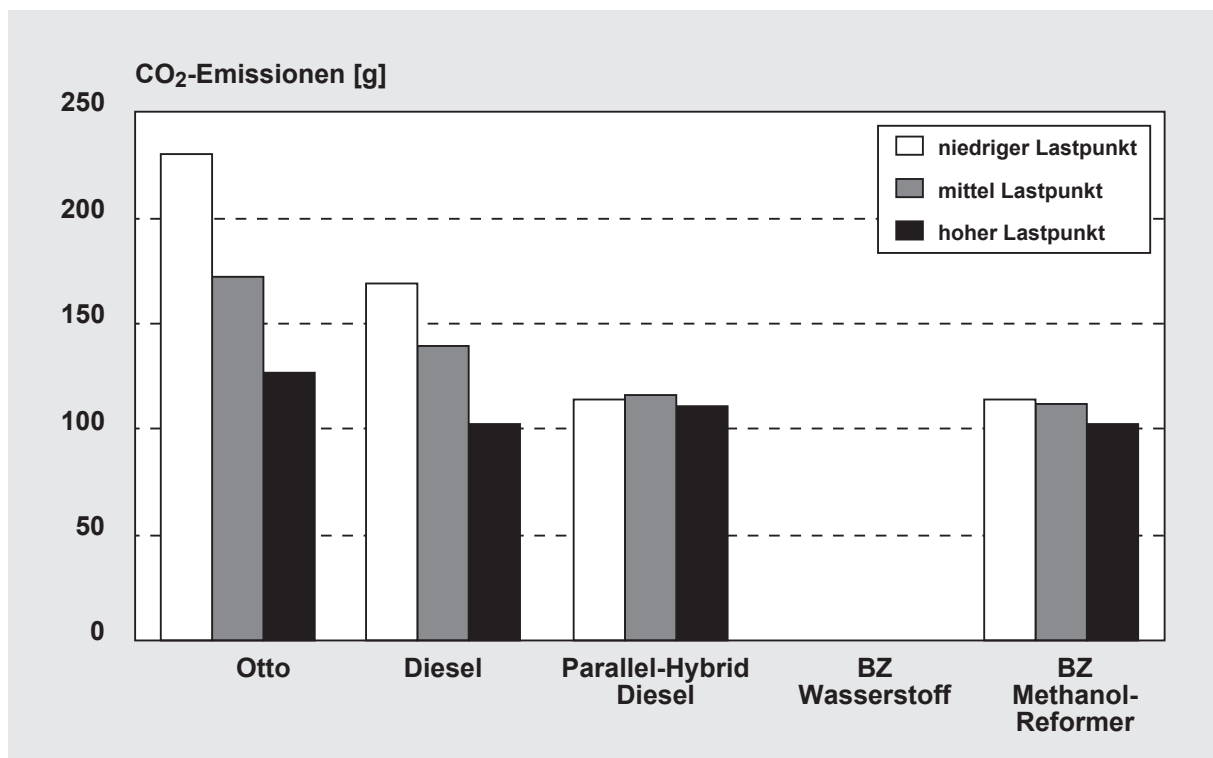


Abbildung 9: CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedener Antriebskonzept in Abhängigkeit von der Last im Fahrzyklus

### 3.4.1 Kaltstart-CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Brennstoffzellen-Reformersystems

Unter dem Begriff Reformersystem wird hier ein Reformer mit angeschlossener Gasreinigung für eine PEM-Brennstoffzelle verstanden. Die Aufgabe des Reformersystems ist es, nicht nur Wasserstoff bereitzustellen, sondern auch das Betriebsgas von CO zu reinigen, damit die PEM-Brennstoffzelle langfristig keiner Wirkungsgradeinbuße unterliegt.

Ein Reformersystem besteht aus den in Abb. 10 gezeigten Hauptkomponenten. In der chemischen Industrie werden heute für Reformer üblicherweise Schüttgutkatalysatoren eingesetzt. Für den Einsatz im Automobil unter beschränkten Platzbedingungen und fahrzeugspezifischen Anforderungen kommen – wie beim Abgaskatalysator – nur monolithische Wabenkörper in Frage.

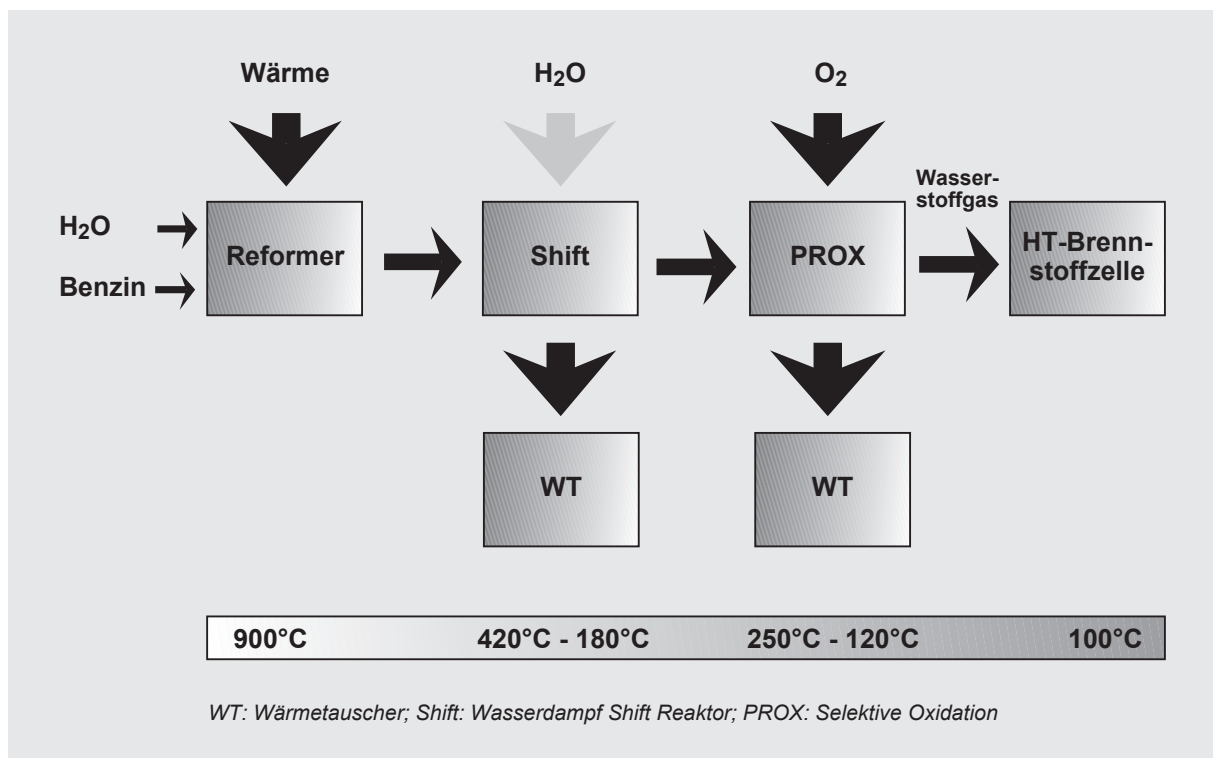


Abbildung 10: Hauptbestandteile eines Reformersystems

Die in die einzelnen Reformerbauteile eingezeichneten Betriebstemperaturen beziehen sich auf das Beispiel eines Benzinreformers.

Das Gesamtkatalysatorvolumen inkl. der Gasreinigung eines 50 kW-Reformersystems beträgt etwa 11 Liter. Die Zelldichten in den verschiedenen Reformerstufen sind unterschiedlich. Grundsätzlich können bei Reaktionen mit relativ niedrigen Reaktionsgeschwindigkeiten bzw. niedrigen Temperaturen Träger mit niedriger Zelldichte verwendet werden, während in stofftransportlimitierten Bereichen und bei niedrigen Konzentrationen der Reaktanden hochzelldichte Träger zum Einsatz kommen. Die Gesamtwärmekapazität eines solchen Systems inkl. der katalytischen Beschichtung bei Trägern mit einer Wandstärke von 0.05 mm ohne Berücksichtigung des Gehäuses ist in Abbildung 11 dargestellt.

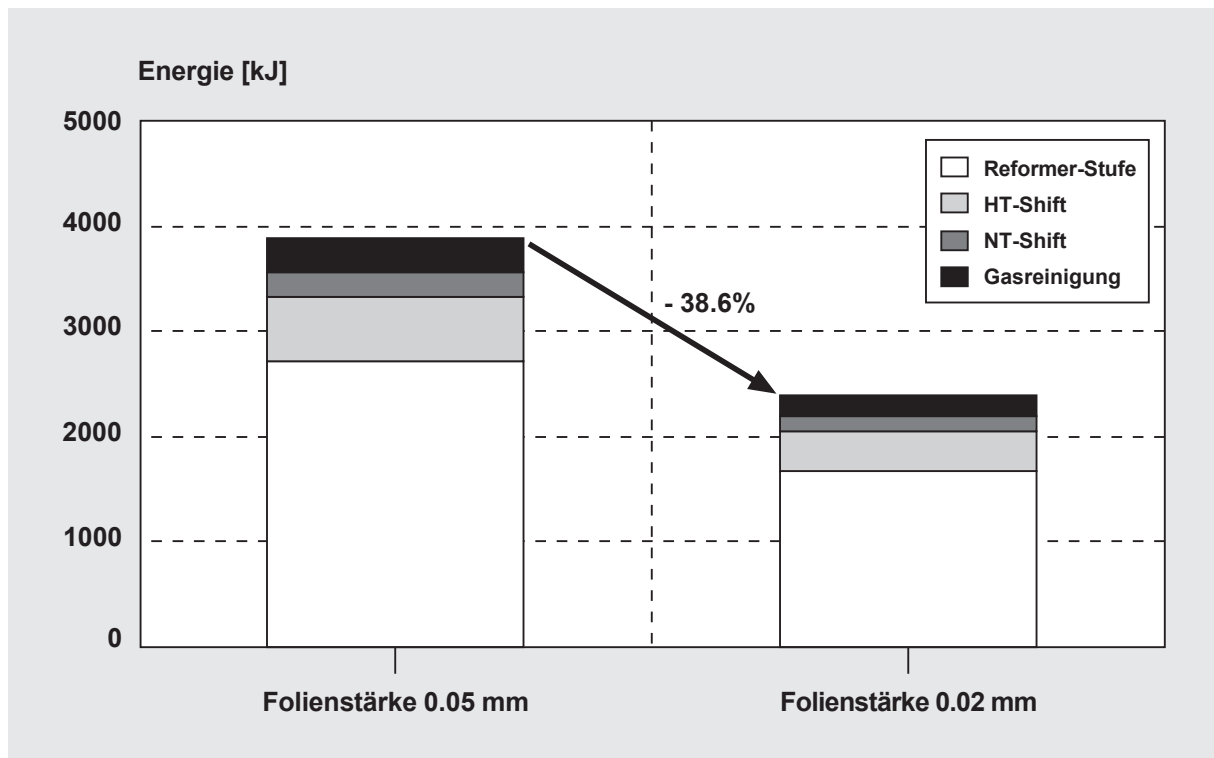


Abbildung 11: Gesamtwärmekapazität und Energiebedarf zum Aufheizen auf Betriebstemperatur eines Reformersystems auf Basis von Metallträgern mit einer Foliendicke von 0.05 und 0.02 mm

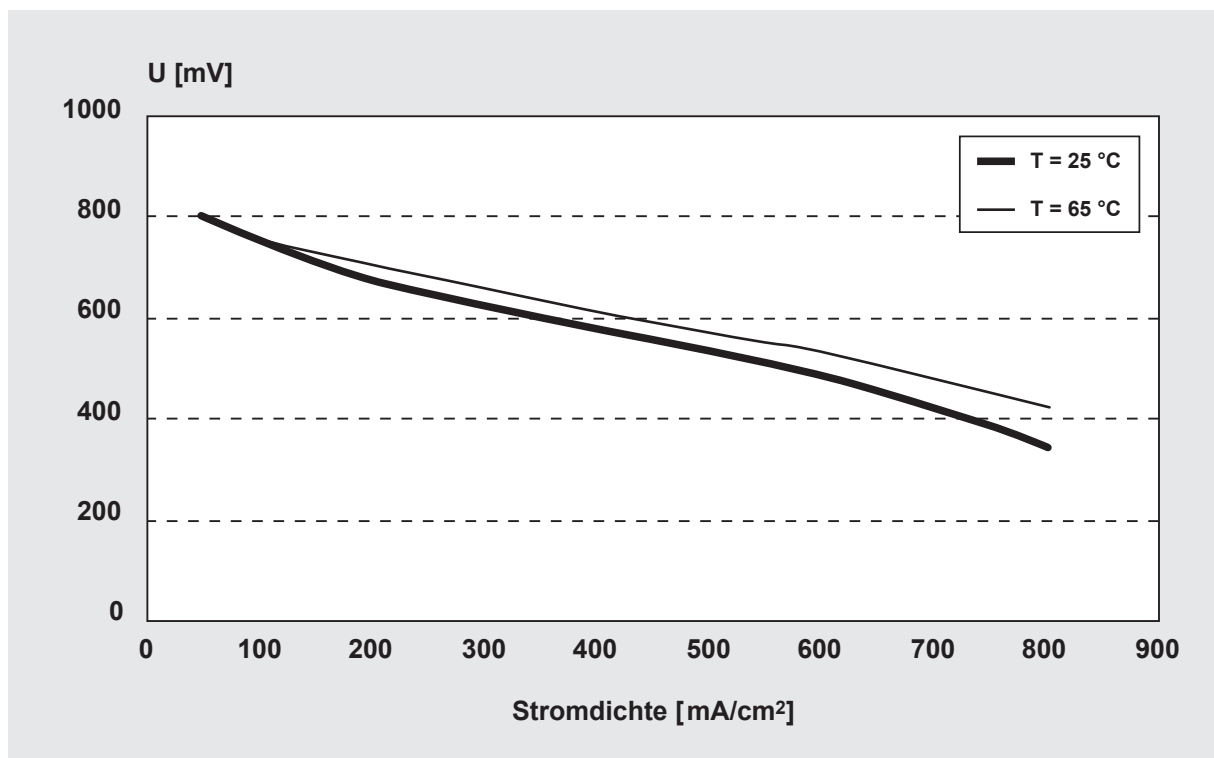


Abbildung 12: Brennstoffzellen-Wirkungsgrad, dargestellt als Spannungs/Strom-Werte in Abhängigkeit von der Temperatur

Die in Abbildung 11 dargestellte Kaltstartenergie muss aufgewendet werden, bevor wasserstoffhaltiges Gas an den Brennstoffzellenstack geliefert werden kann, da ansonsten die CO-Emissionen zu einer Vergiftung des Stacks führen. Durch Verringerung der Foliendicke der Katalysatorträger von 0.05 mm auf 0.02 mm kann der Energiebedarf um 38 % gesenkt werden.

Die Wirkungsgrade des Brennstoffzellenstacks bei 25 °C bzw. bei Betriebstemperatur (65 °C) unterscheiden sich (Abbildung 12) nur unwesentlich, so dass für den Stack zumindest bei Raumtemperatur keine zusätzliche Aufheizenergie aufgewendet werden muß. Betrachtet man einen Kaltstart bei -7 °C, so muß der Stack jedoch zumindest über den Gefrierpunkt vorgeheizt werden.

In Abbildung 13 wurde die Reformer-Kaltstartenergie mit der im europäischen Fahrzyklus erforderlichen Antriebsarbeit bzw. den modalen CO<sub>2</sub>-Emissionen verglichen.

Durch Berechnung auf Basis der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist der Wirkungsgrad des Motors und die Rollwiderstände des Mittelklassefahrzeugs enthalten. Der Gesamtwirkungsgrad des Brennstoffzellensystems wurde optimistisch 10 % über dem des Verbrennungsmotors angesetzt.

Es wird deutlich, dass der Reformer alleine zum Erreichen der Betriebstemperatur eine Energiemenge benötigt, die einer Fahrtstrecke von knapp 2 km eines Fahrzeugs mit Ottomotor entspricht. Durch Einsatz der ultradünnen Folien kann der Energieaufwand zwar um 38 % gesenkt werden, dies entspricht aber immer noch einer Fahrtstrecke von 0.8 km. Vergleicht man die gesamte CO<sub>2</sub>-Emission am Testende, so hat das Reformer-Brennstoffzellensystem unter den getroffenen Annahmen einen Emissionsnachteil von 7 % für die Standardfolie und 0.5 % für den Reformer mit ultradünner Folie.

Die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Brennstoffzelle wird bei Betrieb eines Wasserstoff-Brennstoffzellensystems, insbesondere bei CO<sub>2</sub>-armer Herstellung des Wasserstoffs, daher deutlich besser. Ein solches Konzept scheitert heute jedoch noch an den Speichermöglichkeiten des Wasserstoffs.

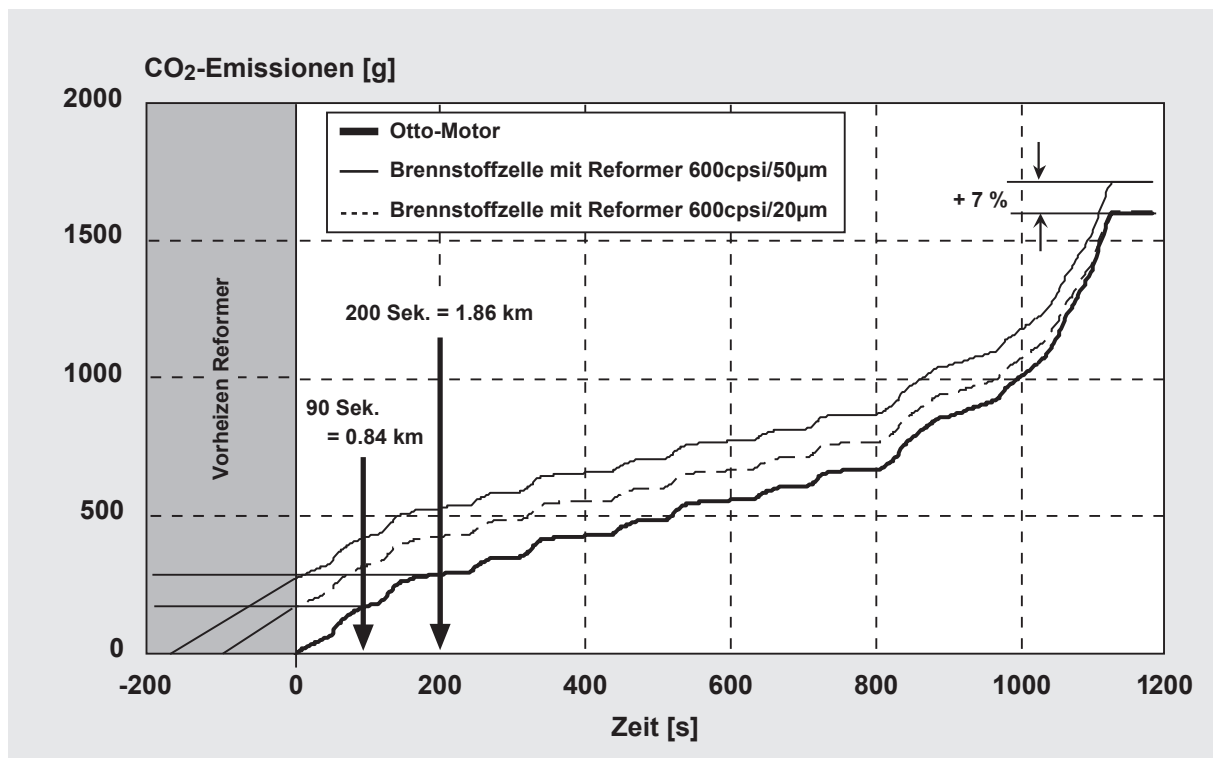


Abbildung 13: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen eines PKWs mit Ottomotor und eines Brennstoffzellensystems mit Reformer

## 4. Zusammenfassung

Der diskutierte Vergleich von Verbrennungsmotoren und neuen, alternativen Antriebskonzepten zeigt, dass mit entsprechender Motorentwicklung und Abgasnachbehandlung die klassischen Antriebskonzepte in der Lage sind, alle zukünftigen Emissionsanforderungen zu erfüllen. Die Stickoxidemissionen von Magermotoren wie Diesel und Otto-BDE sind durch geeignete Technologien wie dem NO<sub>x</sub>-Adsorber in Verbindung mit hochzelldichten Katalysatorträgern noch deutlich zu reduzieren. Ob SULEV/NZEV-Werte erreicht werden können, ist noch offen. Da die Hybridantriebe auf den Verbrennungsmotorenprinzip aufbauen, gilt hier dasselbe. Tabelle 2 zeigt zusammenfassend den relativen Vergleich der Konzepte.

Ein Hauptnachteil der Verbrennungsmotoren hinsichtlich der Gesamtbilanz bleiben die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Hier macht sich vor allem der Wirkungsgrad der verschiedenen Konzepte bemerkbar. Man muß jedoch den Wirkungsgrad in allen Lastbereichen vergleichen, was zum Beispiel dazu führt, dass Hybridfahrzeuge im Stadtverkehr deutlich besser abschneiden, aber aufgrund ihres höheren Gewichts bei höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten im Vergleich zum Otto oder Dieselmotor einen Nachteil haben.

Die Brennstoffzelle als Wasserstoffsystem stellt hinsichtlich CO<sub>2</sub> zur Zeit die günstigste Lösung dar. Fahrzeuge mit On-Board-Wasserstoffherzeugung durch Reformer haben jedoch aufgrund des Kaltstartverhaltens heutiger Reformersysteme einen deutlichen Nachteil gegenüber bereits heute in Serie befindlichen Verbrennungsmotoren.

Der Vergleich der Schwerpunkte in der amerikanischen und europäischen Abgasgesetzgebung zeigt den Unterschied in den Philosophien. Die Automobil- und Zuliefererindustrie ist aufgrund dessen gezwungen, für den weltweiten Einsatz ihrer Produkte unterschiedliche, parallele Entwicklungsschwerpunkte zu setzen. Es wird deutlich, dass die Neigung der europäischen Gesetzgeber, keine langfristigen Rahmenbedingungen vorzugeben, einen schwerwiegenden industriepolitischen Nachteil für Europa darstellt. Das Ende des Strebens nach immer geringeren Schadstoffemissionen ist jedoch, ähnlich den NZEV-Grenzwerten, erst dann erreicht, wenn die Emissionen der Kraftfahrzeuge auf dem Niveau der Umgebungsemissionen liegen.

|  | HC/CO | NO <sub>x</sub> | CO <sub>2</sub> | Partikel |
|--|-------|-----------------|-----------------|----------|
| <b>Ottomotor<br/>Lambda = 1</b>            | ++    | ++              | – (0)           | ++       |
| <b>Dieselmotor</b>                         | +(++) | --(-)           | 0(+)            | – (0)    |
| <b>Otto DI<br/>mager</b>                   | +(++) | --(-)           | 0(+)            | – (0)    |
| <b>Verbrennungs-<br/>motor Wasserstoff</b> | +     | ++              | ++              | ++       |
| <b>Brennstoffzelle<br/>Wasserstoff</b>     | ++    | ++              | ++              | ++       |
| <b>Brennstoffzelle<br/>Reformer</b>        | +     | ++              | –               | +        |

( ) - Werte in Klammern: Potential vorhanden, jedoch weitere Entwicklungleistungen nötig

**Tabelle 2: Vergleich verschiedener Antriebssysteme hinsichtlich der Emissionen von HC, CO, NO<sub>x</sub> und Partikeln (nur Betrieb)**

## 5. Literaturverzeichnis

---

- [1] Ing. K. Nishizawa, Ing. S. Momoshima, Ing. M. Koga, Ing. N. Kachi, Nissan Motor Co, Ltd., Kanagawa, Japan: „Entwicklung eines neuen Bezinmotors mit schadstofffreie Emissionen als Ziel“; 21. Internationales Wiener Motorensymposium, VDI-Fortschritt Berichte, Reihe 12 (2000)
- [2] Tadayoshi Hayashi, Noriyuki Kishi, Shinichi Kikuchi, Norio Suzuki Honda R&D Co.: „The Research of Emission Reduction Technologies for ZLEV“; Haus der Technik 11/98
- [3] „EEV concept for light vehicles“; European Commission 2000-12-13
- [4] P. Schindler, C. Nagel, VW AG: „Entwicklungspotentiale von leichten Nutzfahrzeugen“; VDA-Kongress, 28.9.2000, Frankfurt
- [5] Board on energy and enviromental systems, Commission on engineering and technical systems, Transportation research board: „Partnership for a new generation of vehicles“; ISBN 0-309-07094-5, National Academy Press, Washington, 2000
- [6] Wolfgang Maus, Rolf Brück, Emitec GmbH: „Ein modulares Katalysatorkonzept für heutige und zukünftige weltweite Abgasgrenzwertanforderungen“; Symposium „Entwicklungstendenzen bei Ottomotoren“; Dezember 2000 Technische Akademie Esslingen
- [7] Metz, N.: „Ozon – Der Grund für erneute Verschärfung der Abgaswerte“; 18. Internationales Wiener Motorensymposium April 1997, Vol. II
- [8] Brendt, Volkmer, Appel: „Möglichkeiten der Imissionsreduzierung durch den Einsatz extrem schadstoffarmer Fahrzeuge“; März 1996, TU Berlin, ISS Fahrzeugtechnik
- [9] D. Gruden: „CO<sub>2</sub>-emissions and their environmental impact“; Int. Symposium „Powertrain technologies for a 3-litre car“, Siena, 4.- 5. November 1996
- [10] L. Kaufmann: „Vergleich und Bewertung verschiedener PKW-Antriebskonzepte hinsichtlich Energie- und Schadstoffbilanz“; Diplomarbeit, FH Köln, 1996
- [11] „The Wheel Extended“, A Toyota quarterly Review, No. 100, Nv. 1997
- [12] Dr. E. Jacob, Dipl.-Ing. A. Döring, MAN Nutzfahrzeuge AG, Nürnberg: „GD-KAT: Abgasnachbehandlungssystem zur simultanen Kohlenstoffpartikel-Oxidation und NO<sub>x</sub>-Reduktion für Euro 4/5-Nfz-Dieselmotoren“; 21. Internationales Wiener Motorensymposium, VDI-Fortschritt Berichte, Reihe 12 (2000)
- [13] Meike Reizig, Rolf Brück, Roman Konieczny, Peter Treiber, Emitec GmbH: „New Approches to Catalyst Substrate Application for Diesel Engines“; SAE 2001-01-0189
- [14] E. Pott, G. Splisteser, R. Bosse, A. König, F.-J. Quissek; VW AG; I. Kutschera, Audi AG: „Potential des NO<sub>x</sub>-Speicherkatverfahrens bei DI-Dieselmotoren“; Int. Wiener Motorensymposium 1999, VDI Nr. 376, Band 2
- [15] M. Aust, H.-P. Rabl, G. Wißler; Siemens AG: „SINOX – Ein Abgasnachbehandlungssystem auf SCR-Basis für Diesel-Pkw“; Haus der Technik, Essen, Tagung vom 15.6.1999
- [16] Andrée Bergmann, Rolf Brück, Emitec GmbH: „Design Criteria of Catalyst Substrates for NO<sub>x</sub> Adsorber Function“; SAE 2000-01-0504
- [17] M. S. Brogan, R. J. Brisley, J. S. Moore, A. D. Clark Johnson, Matthey Pic: „Evaluation of NO<sub>x</sub> Adsorber Catalysts Systems to Reduce Emissions of Lean Running Gasoline Engines“; SAE 962042
- [18] Stefan Brandt, Uwe Dahle, John Hochmuth, Michel Deeba, Engelhardt: „Entwicklungsfortschritte bei NO<sub>x</sub>-Adsorber Katalysatoren für magerbetriebene Ottomotoren“; SAE X0088
- [19] Danan Dou, Owen H. Bailey, ASEC: „Investigation of NO<sub>x</sub> Adsorber Catalyst Deactivation“, SAE 982594
- [20] S. Brandt, U. Dahle, M. Deeba, J. K. Hochmuth, Engelhard Technologies GmbH: „Entwicklungsstand von NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysatoren für Otto-DI-Motoren“; Symposium „Entwicklungstendenzen bei Ottomotoren“; Dezember 2000 Technische Akademie Esslingen
- [21] H. Eichelseder, E. Baumann, P. Müller, S. Neugebauer, BMW AG: „Chancen und Risiken von Ottomotoren mit Direkt-einspritzung“; Motortechnische Zeitschrift MTZ 3/2000
- [22] O. Salvat, P. Marez, G. Belot, PSA Peugeot Citroen: „Passenger Car Serial Application of a Particulate Filter System on a Common Rail Direct Injection Diesel Engine“; SAE 2000-01-0473
- [23] IKA-Studie