

Bild 2: Verlustteilung  $n=2000$  U/min;  $w_i/w_e=0,27/0,20$  kJ/dm<sup>3</sup> *Figure 2: loss distribution at 2000rpm;  $w_i/w_e=0,27/0,20$  kJ/dm<sup>3</sup>*

## 2. Lösungsansätze zur Verbrauchsabsenkung

Weitere erhebliche Verbesserungspotenziale sind für den idealen Motor ( $\eta = 1 - 1/\varepsilon^{\kappa-1}$ ) neben dem Verdichtungsverhältnis  $\varepsilon$  nur noch über den Isentropenexponenten  $\kappa$  zu erzielen, der von Gaszusammensetzung und Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  abhängt (Bild 3).

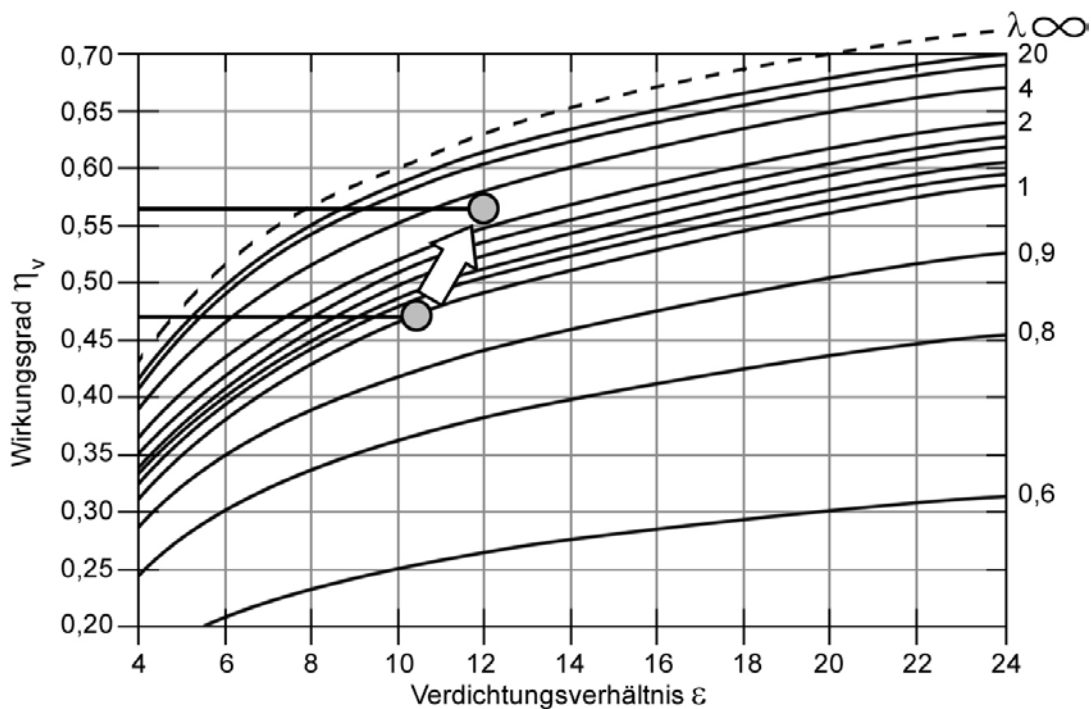


Bild 3: idealer Motor (Gleichraumprozeß) – Grenzpotenziale über Lambda / Epsilon *Figure 3: ideal engine (constant volume process) – potentials of A/F ratio and CR*

Ein Umsetzungsansatz hierfür sind die zur Zeit in Serie befindlichen DI-Brennverfahren (wand- / luftgeführt), die auch im Hause BMW im Wettbewerb mit der VALVETRONIC entwickelt wurden.

Allerdings konnten mit dieser Technologie die theoretischen Potenziale des Schichtbetriebes in der Fahrzeugapplikation bei weitem nicht erschlossen werden. Die Gründe dafür liegen sowohl in dem Brennverfahren selbst als auch im Gesamtsystem für die Fahrzeugapplikation.

Die Verlustteilung (Bild 4) zeigt klare thermodynamische Defizite auf:

- wegen mangelhafter Gemischaufbereitungsgüte bei erhöhten Gegendrücken ergibt sich eine sehr frühe Schwerpunktlage der Verbrennung  $\Rightarrow$  Verbrennungs- und Wandwärmeverluste
- Gemischbildungsdefizite, Wandbenetzung und magerer Ausbrand im Schichtbetrieb führen zu erhöhten HC-, CO- und ggf. Rußemissionen  $\Rightarrow$  unvollkommene Verbrennung
- geringe Stabilität der Verbrennung erfordert Zusatzeingriffe wie zum Beispiel die Androsselung oder geringe AGR-Raten  $\Rightarrow$  Reduzierung des thermodynamischen Verbrauchspotenziales

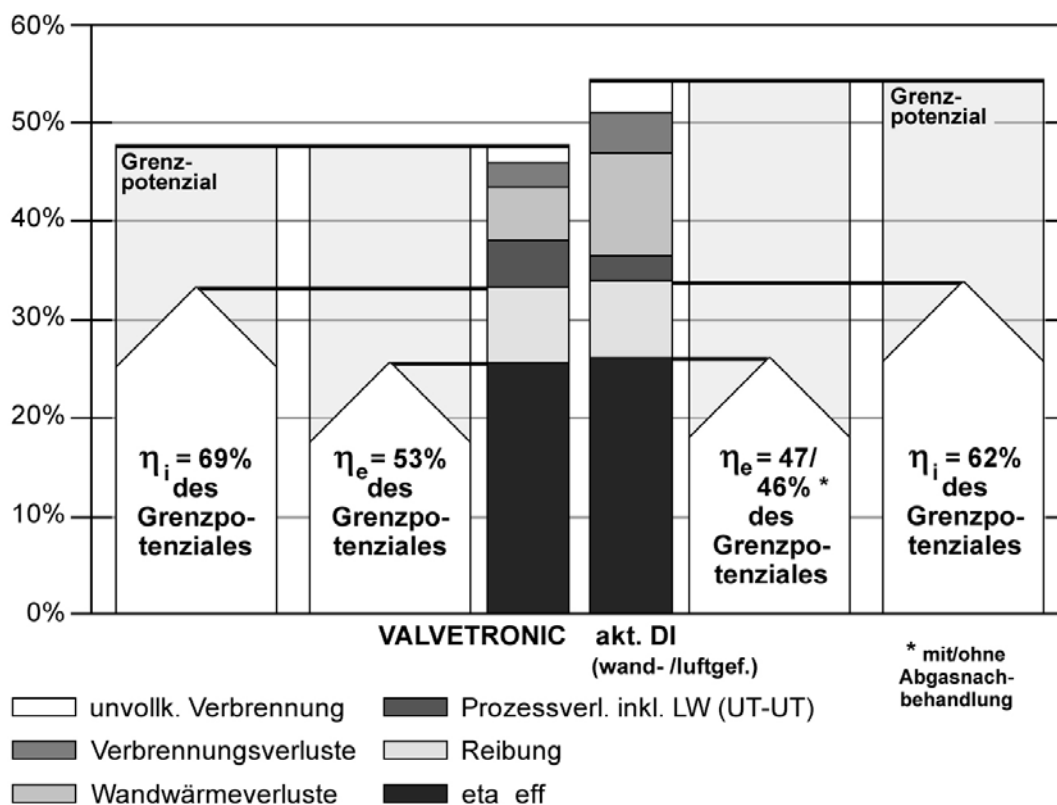


Bild 4: Verlustteilung  $n=2000$  U/min;  $w_i/w_e=0,27/0,20$  kJ/dm<sup>3</sup>

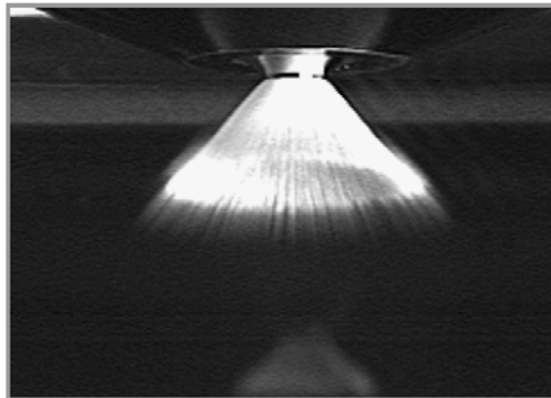
Figure 4: loss distribution at 2000rpm;  $w_i/w_e=0,27/0,20$  kJ/dm<sup>3</sup>

Darüber hinaus weisen diese Brennverfahren weitere Schwachpunkte auf:

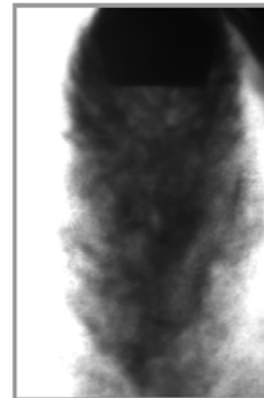
- sehr kleiner Kennfeldbereich für stabilen Schichtbetrieb; er deckt nur Teilbereiche des europäischen Fahrzyklus ab, bei dynamischer Fahrweise ist er nicht relevant
- Verbrauchsnachteile durch die magere Abgasnachbehandlung entstehen nicht nur im Test, sondern auch im oberen Last-/Drehzahlbereich wegen der geringen thermischen Stabilität der Beschichtungen für den NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator

- saugmotorische Maximalleistungen von nur  $55 \text{ kW/dm}^3$  wegen der für den Schichtbetrieb erforderlichen Kanalkonzepte mit hohem Swirl oder Tumble sowie des zusätzlichen Abgasgegendruckes durch den NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator
- hohe Preise für die Komponenten des Kraftstoffsystems und der Abgasnachbehandlung

Die Summe dieser Schwachpunkte verhinderte trotz des hohen theoretischen Potenziales eine volumenrelevante Einführung. BMW hat deshalb bereits vor zwei Jahren alle Entwicklungsaktivitäten an Motoren mit mageren Direkteinspritzungsbrennverfahren (wand- oder luftgeführt) eingestellt.



Hochdruckeinspritzung



luftunterstützte  
Niederdruckeinblasung

Bild 5: nach außen öffnende Injektoren für spraygeführte Brennverfahren

Figure 5: outward opening injectors for spray guided combustion processes

Durch weiterentwickelte, nach außen öffnende Gemischbildner wie luftunterstützte Niederdruckeinblasung oder 200 bar - Hochdruckeinspritzung (Bild 5) wurden inzwischen wesentlich günstigere Randbedingungen für ein spraygeführtes Brennverfahren geschaffen:

- bessere Kraftstoffaufbereitung mit deutlich reduzierten Sauterdurchmessern
- schnellere Gemischbildung für optimierte Schwerpunktlage der Verbrennung
- gleichmäßigere Spraygeometrie bei unterschiedlichen Brennraumdrücken und -temperaturen (200 bar – Hochdruckeinspritzung)

Diese Potenziale bestätigten sich in ersten Untersuchungen; Bild 6 zeigt das Ergebnis für ein bei BMW entwickeltes Brennverfahren mit Kraftstoffhochdruckeinspritzung.

Ein weiterer Lösungsansatz zur Nutzung der Stoffwerte ist die durch Kompression ausgelöste Selbstentflammung eines mageren oder stöchiometrischen homogenen Gemisches mit hohem Restgasanteil (CAI oder HCCI). Erste Versuchsergebnisse bestätigen sowohl eine signifikante Verbrauchsabsenkung (ebenfalls Bild 6) als auch die niedrigen NO<sub>x</sub>-Rohemissionen. Für den Lastpunkt 2000 U/min und  $w_i/w_e = 0,27/0,20 \text{ kJ/dm}^3$  betragen sie 5 ppm. Das Brennverfahren ist unter anderem auch wegen der hohen regelungstechnischen Komplexität als Serienanwendung für den Fahrzeugantrieb noch in weiterer Ferne.

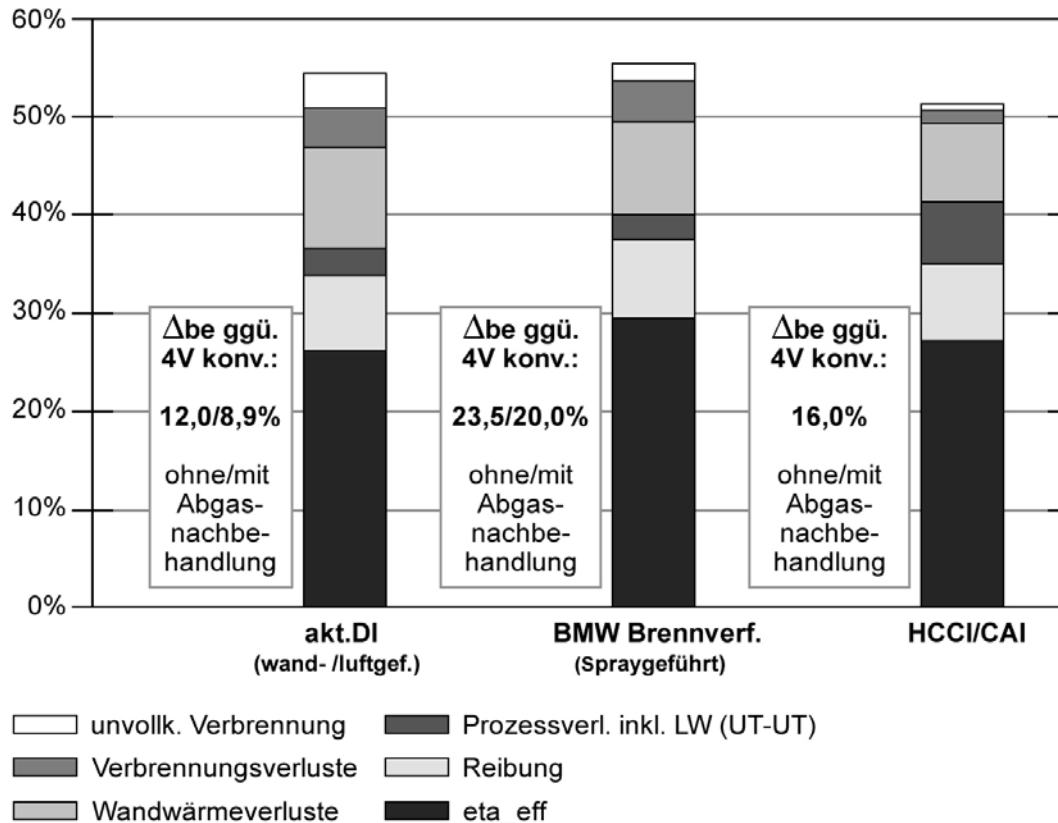


Bild 6: Verlustteilung n=2000 U/min;  $w_i/w_e=0,27/0,20$  kJ/dm<sup>3</sup>

Figure 6: loss distribution at 2000rpm;  $w_i/w_e=0,27/0,20$  kJ/dm<sup>3</sup>

In den folgenden Kapiteln wird die Fahrzeugapplikation des bei BMW entwickelten Brennverfahrens (spraygeführt, mit Kraftstoffhochdruckeinspritzung) näher behandelt.

### 3. Herausforderungen

Bei der Applikation dieses Brennverfahrens war neben der Erfüllung der Leistungs-, Fahrbarkeits- und Emissionsziele die deutlich verbesserte Ausschöpfung des thermodynamischen Grenzpotenziales die wichtigste Zielsetzung. Dadurch ergaben sich – aufbauend auf den Methoden, Konzepten und Erfahrungen aus der Entwicklung der wand- oder luftgeführten DI Brennverfahren – neue Herausforderungen. Einige von ihnen werden hier beispielhaft vorgestellt.

#### **Brennverfahrensentwicklung:**

Bei einem spraygeführten Brennverfahren mittels Hochdruckeinspritzung tritt über die Öffnung der Injektornadel ein kegelförmiger Kraftstoffstrahl aus. Begünstigt durch die hohe treibende Druckdifferenz bei geringen Nadelhuben beginnt der Aufbruch des Sprays sehr früh. Durch die Scherkräfte zwischen dem Spray und der umgebenden Luft entstehen Rezirkulationsgebiete, in denen ein zündfähiges Gemisch gebildet wird und in denen auch die Zündkerze zu positionieren ist (Bild 7). Weiterhin wird deutlich, dass bei Einspritzung kurz vor Verbrennungs-OT durch den Gegendruck die Strahlpenetration reduziert und durch die hohen Brennraumtemperaturen die Kraftstoffaufbereitung signifikant beschleunigt wird.

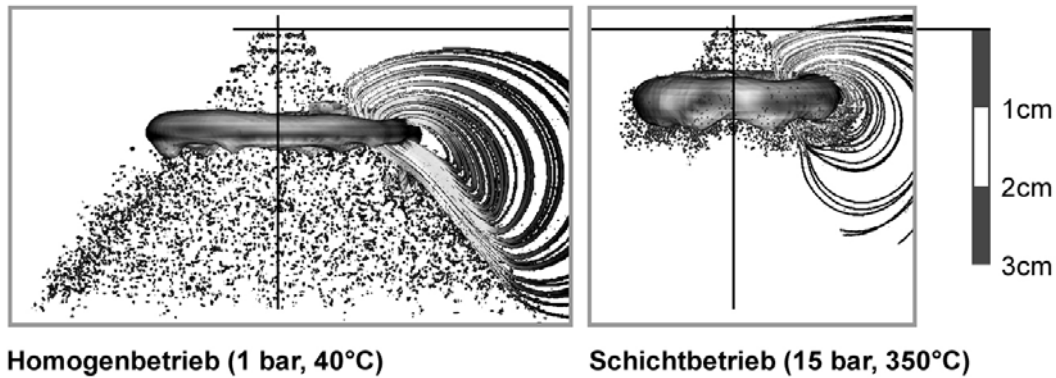


Bild 7: Sprayverhalten und Gemischbildungseffekte *Figure 7: spray characteristics and mixture preparation*

Damit werden die Herausforderungen an die Brennverfahrensentwicklung deutlich:

- Die Kraftstoffaufbereitung findet in einem Volumen von nur ca.  $2 \text{ cm}^3$  statt
- Im Schichtbetrieb stehen nur ca. 0,5 ms für die Gemischbildung zur Verfügung
- Die Zündkerze muss unabhängig von Betriebspunkten, brennraumseitigen Strömungsfeldern und summarischen Bauteiltoleranzen zum Zündzeitpunkt immer von aufbereitetem Gemisch umgeben sein (Bild 8). Dabei ist aber andererseits die Beaufschlagung der Zündkerze mit flüssigem Kraftstoff wegen des Thermo-schockrisikos zu vermeiden
- Die Gemischbildung soll darüber hinaus weder durch das Strömungsfeld im Zylinder noch durch die im Brennraum stehende Zündkerze negativ beeinflusst werden

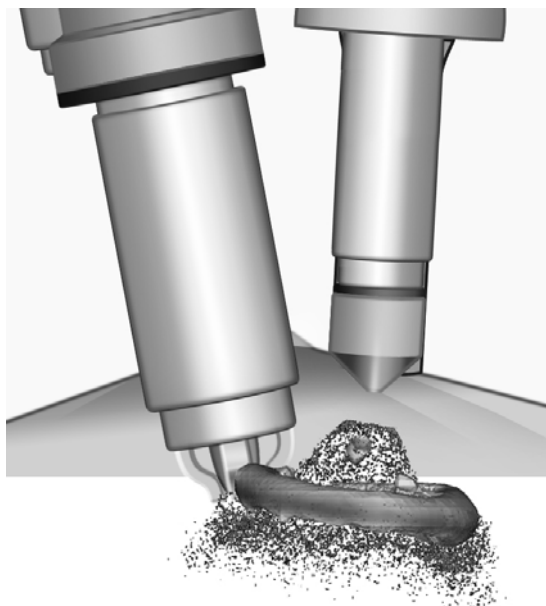


Bild 8: Anordnungen Injektor und Kerze für spraygeführte Brennverfahren *Figure 8: injector / spark plug configuration for spray guided combustion process*

Wegen der engen Verzahnung der Brennverfahrensentwicklung mit der Bauteilentwicklung des Injektors wurden in einem engen Verbund mit dem Injektorhersteller unter anderem die folgenden Methoden eingesetzt und weiterentwickelt (Bild 9):

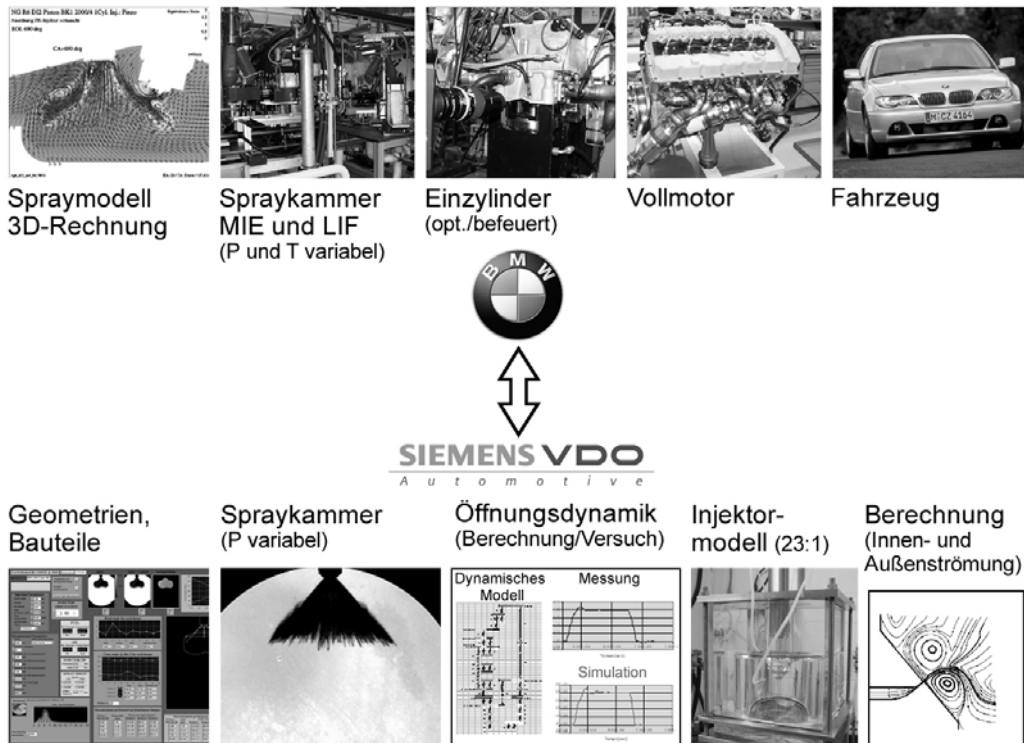


Bild 9: Methodeneinsatz bei der Injektorentwicklung *Figure 9: applied methods for the injector development*

- Berechnung der Injektorinnenströmung: Sie ermöglicht ein besseres Verständnis der Startbedingungen des Sprays und des Einflusses der Innengeometrien wie zum Beispiel der Nadelführung auf die Sprayausbreitung
- Validierung dieser Berechnungen durch ein Großmodell der Injektorspitze
- Berechnung der Zylinderinnenströmung und des Sprays. Durch die gute Gemischaufbereitung haben schon geringe Strömungsgeschwindigkeiten signifikanten Einfluss auf den Spray. Außerdem waren in den Spraymodellen u. a. die Verdampfungsansätze und die Zerfallsannahmen weiterzuentwickeln
- Validierung in der BMW-Spraykammer mit den variablen Größen Druck und Temperatur: Mittels MIE, LIF und PDA konnte unter den für den Schichtbetrieb relevanten Umgebungsbedingungen das Verständnis des Sprays deutlich verbessert werden
- Optischer Motor: Neben der Validierung der Berechnungsergebnisse der Zylinderinnenströmung wurde am optischen Motor ebenfalls der Einfluss gezielter Anregungen auf die Spraystabilität und die Wiederholgenauigkeit (shot to shot) untersucht. Zur Bewertung der Wiederholgenauigkeit wurde eine optische Auswerteprozedur entwickelt, die für jede Sprayaufnahme eine Winkelbestimmung durchführt und in einem Histogramm ausgibt (Bild 10)
- Der gefeuerte Einzylindermotor diente neben der Auslegung der Brennraumgeometrie auch der Untersuchung von Betriebsstrategien wie zum Beispiel des Einsatzes von Mehrfacheinspritzungen für die Abgasnachbehandlung oder für die Aufladung
- Vollmotor und Fahrzeug waren die Basis für Untersuchungen am Gesamtsystem. Es wurde zum Beispiel betrachtet, ob Themen wie die Zylindergleichstellung oder die Robustheit der Gemischbildung durch Bauteiloptimierungen – hauptsächlich am Injektor – zu lösen sind oder ob dazu Funktionalitäten oder Betriebsstrategien in der Motorsteuerung zu entwickeln sind.

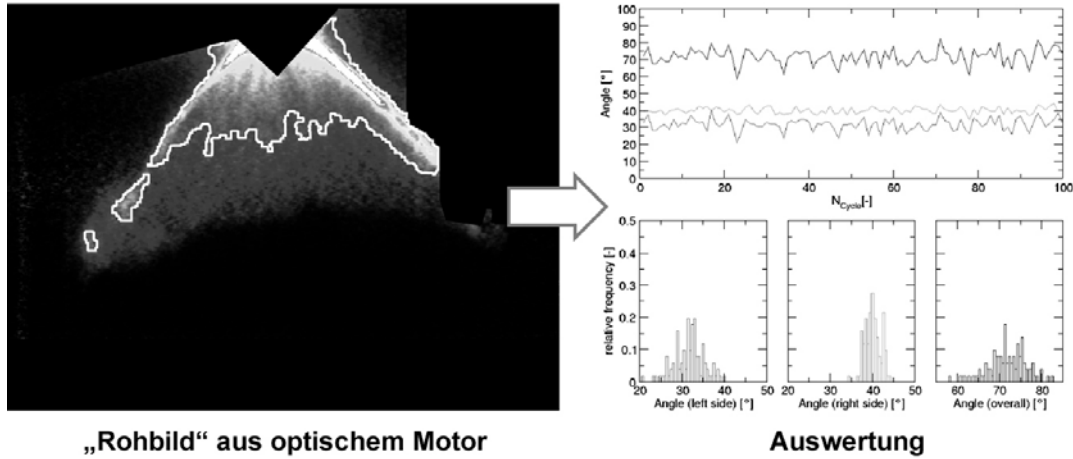


Bild 10: Auswerteprozedur für den Spraywinkel *Figure 10: calculation procedure for cone angle analysis*

Die Wirksamkeit dieses Methodeneinsatzes demonstriert ein Fallbeispiel zur Spraystabilität, das während der Entwicklung auftrat. Der Injektor zeigte in der Spraykammer bei hohen Gegendrücken und Temperaturen einen glockenförmig gekrümmten Spray. Im optischen Motor trat zusätzlich das Phänomen auf, dass der Spraywinkel von Einspritzung zu Einspritzung stark schwankte. In Summe ergab sich ein zu kleiner Stabilitätsbereich über Zündwinkel und Einspritzende (Bild 11).

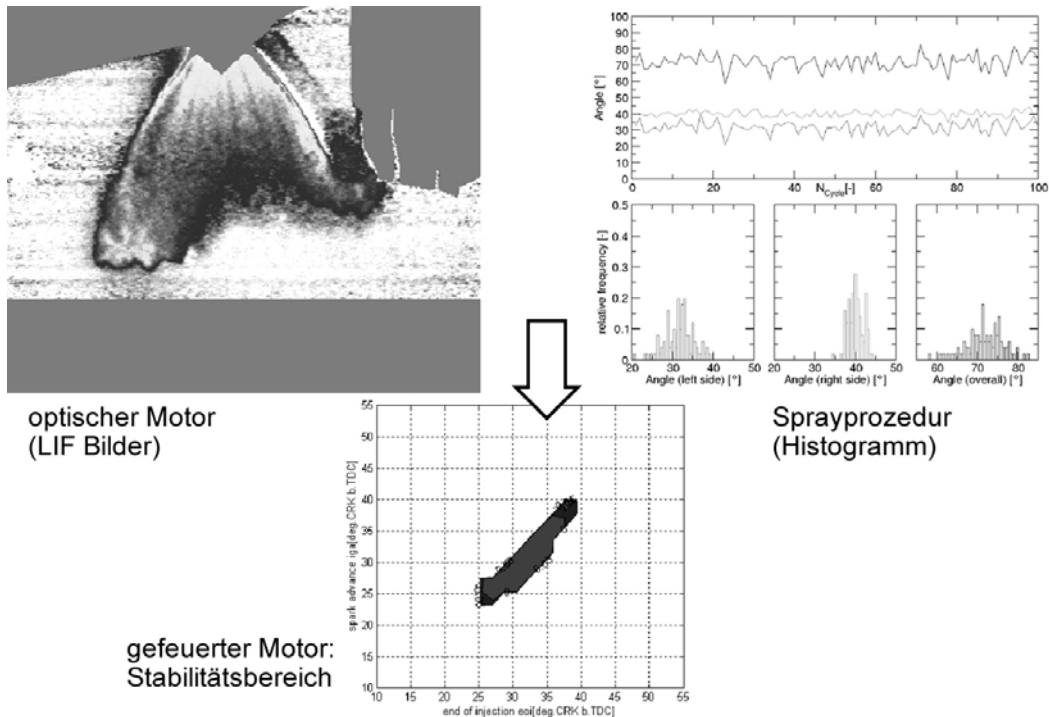


Bild 11: Ausgangssituation Spraystabilität *Figure 11: spray stability without optimisation*

In einer Parametervariation mit besonderem Fokus auf der Nadelgruppe konnte der Einfluss von Geometrie- und Strömungsparametern auf die Sprayeigenschaften nachgewiesen werden (Bild 12).



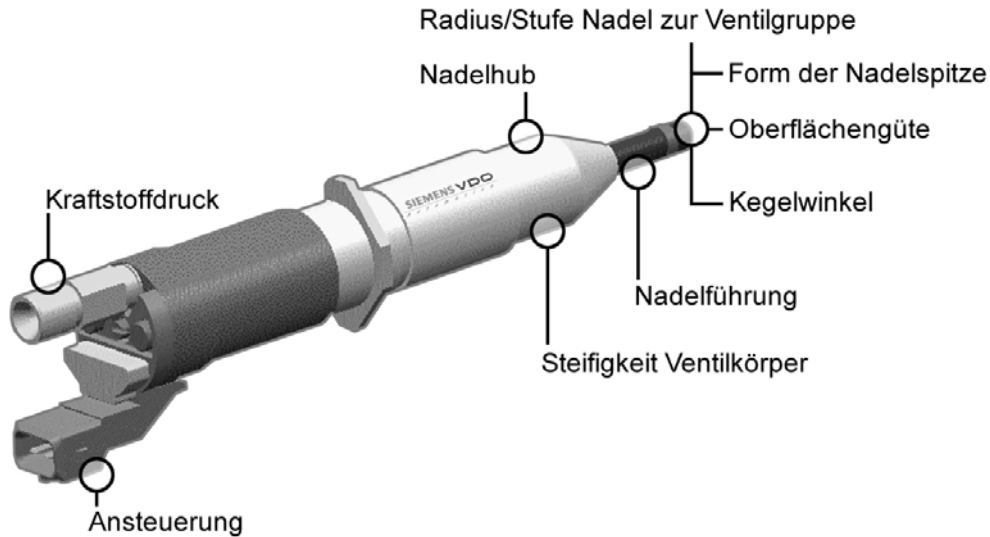


Bild 12: Parametervariation zur Spraystabilisierung *Figure 12: parameter variation for spray stability*

Dabei zeigte sich, dass die Spraygeometrie von den Randwirbeln beeinflusst wird. Die Entwicklung und Wechselwirkung dieser Wirbel entscheiden darüber, ob sich in der motorischen Verbrennung – unbeeinflusst von einer gewissen Stochastik zum Beispiel durch das Strömungsfeld – ein stabiler Spray ausbildet.

Dies konnte durch Maßnahmen am Injektor sichergestellt werden. In Bild 13 sind die Ergebnisse des optimierten Injektors dargestellt.

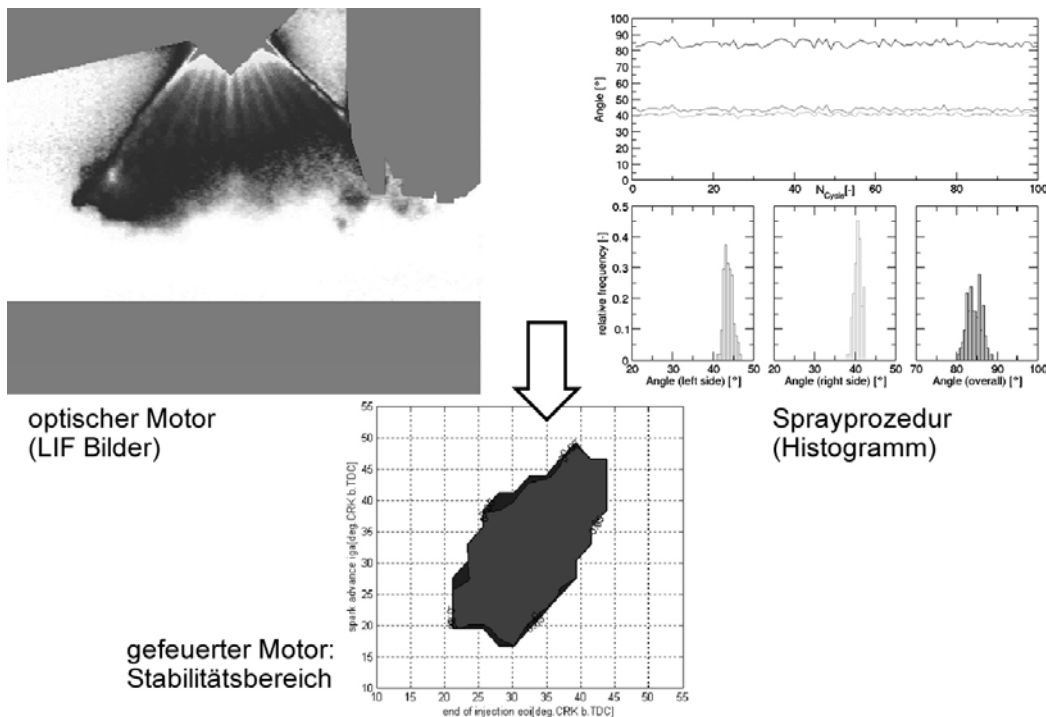


Bild 13: Spraystabilität des optimierten Injektors *Figure 13: spray stability after optimisation*

Die verbesserte Wiederholgenauigkeit des Sprays führt zu einer deutlichen Ausweitung des aussetzerfreien Betriebes über Zündzeitpunkt und Einspritzende.

Neben der Verbesserung der Thermodynamik erlaubt diese Injektorentwicklung auch eine Rückziehung der Zündkerze aus der Brennraummitte. Damit wird sowohl eine Reduzierung der Elektrodentemperaturen als auch der Flüssigkeitsbenetzung erreicht.

## Wärmemanagement des Grundmotors und der Abgasanlage:

Die Verbrauchsvorteile des spraygeführten Brennverfahrens sind nur in den Zeitintervallen des Fahrbetriebes nutzbar, in denen die motorischen und emissionsseitigen Voraussetzungen für den Schichtbetrieb mit erheblichem Luftüberschuss gegeben sind.

Nach Motorstart sind nicht nur die brennraumseitigen Temperaturen, sondern auch der sehr geringe Wärmeeintrag in Kühlwasser und Motoröl nach Umschaltung in den Schichtbetrieb zu berücksichtigen. Deshalb haben für dieses Brennverfahren Maßnahmen wie Variabilitäten im Bereich der Wasserpumpe oder auch deutliche Reibungsreduzierungen wie die Rollreibung im Zylinderkopf oder mengengeregelte Pumpen für Öl und Kraftstoff ein größeres Potenzial und eine höhere Attraktivität als bei konventionellen Motoren.

Für die Abgasnachbehandlung ermöglichen direkteinspritzende Ottomotoren durch die Freiheitsgrade in der Betriebsstrategie (Anzahl und Zeitpunkt der Einspritzungen) ein schnelles Aufheizen des Katalysators bei niedrigen Rohemissionen. Das bei BMW entwickelte Brennverfahren ermöglicht darüber hinaus weitere Verbesserungen. So können auch sehr extreme Zündzeitpunkte – bis zu  $50^\circ$  KW nach OT – mit hohen Wärmeströmen umgesetzt werden, weil die Laufunruhwerte weiterhin auf einem sehr niedrigen Niveau bleiben (Bild 14).

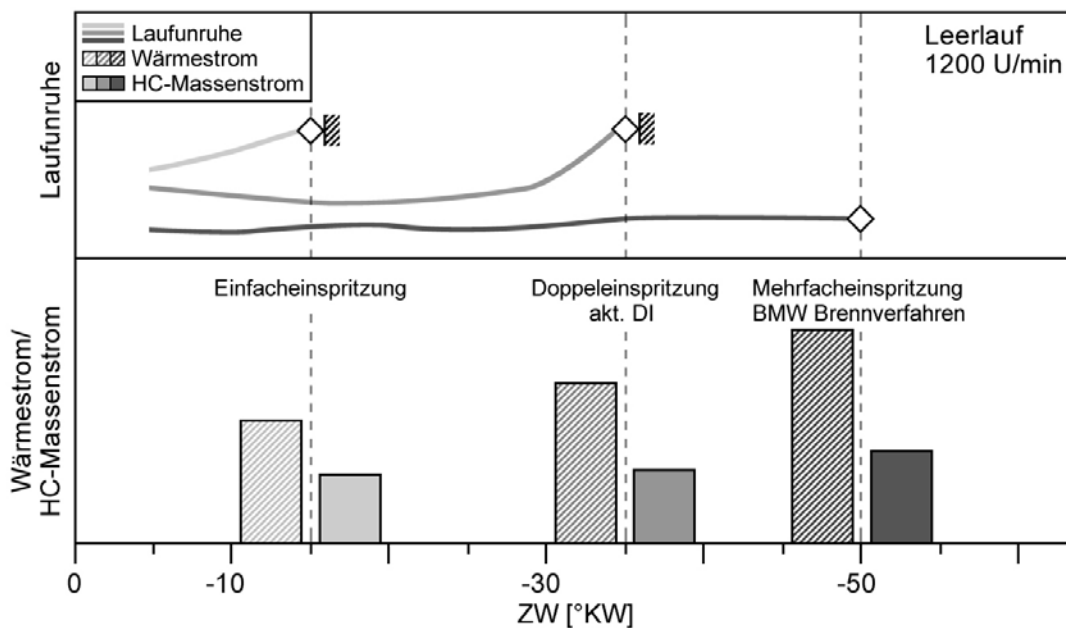


Bild 14: Vergleich: Katalysatorheizen *Figure 14: comparison: catalyst heating*

Bei der Betrachtung des gesamten Abgastemperaturkennfeldes (Bild 15) wird aber deutlich, dass mit dem heutigen Stand der NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysatortechnologie noch nicht alle Anforderungen erfüllt werden:

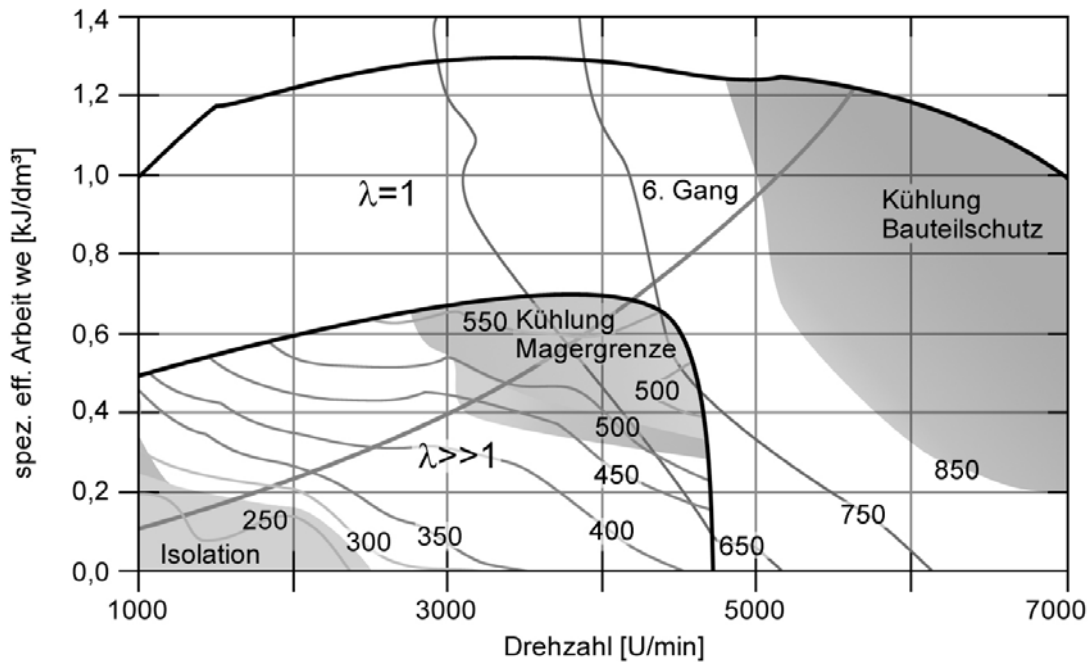


Bild 15:

Abgastemperatur des Konzeptmotors *Figure 15: exhaust gas temperature of concept engine*

- Im Leerlaufbereich liegen die Abgastemperaturen mit zum Teil weniger als 200°C unterhalb der Light Off Temperatur der aktuellen Beschichtungen.
- Im mittleren Last-/Drehzahlbereich überschreiten die Temperaturen mit ca. 550°C den oberen Bereich des Konvertierungsfensters. Außerdem ist dort die Performance heutiger Beschichtungen bzgl. Speicherkapazität und Regenerierbarkeit / Regenerationsmittelbedarf bei den für dieses Brennverfahren typischen hohen NOx-Massenströmen und Raumgeschwindigkeiten noch verbesserungswürdig.
- Im Hochgeschwindigkeitsbereich ist schließlich die NOx-Speicherkatbeschichtung vor thermischer Alterung zu schützen.

Deshalb wird in Zusammenarbeit mit der Beschichtungsindustrie an spezifischen Weiterentwicklungen gearbeitet. Hier eröffnet zum Beispiel das geringe HC-Rohemissionsniveau dieses Brennverfahrens die Möglichkeit, die HC-Umsetzung weitestgehend bereits in einem relativ kleinen motornahen Katalysator sicherzustellen. Der Unterbodenkatalysator kann deshalb für die NOx-Reduktion optimiert werden.

Daneben wird aber auch ein fahrzeugseitiges Wärmemanagement der Abgasanlage als sinnvoll angesehen. Dies bedingt jedoch bereits in einer frühen Phase der Fahrzeugentwicklung den Packagevorhalt für solche Systeme. Beispielhaft ist die Motorraumdurchströmung mit einer Kühlluftbeaufschlagung des Abgaskrümmers dargestellt ([Bild 16](#)). Damit können hohe Wärmeübergangskoeffizienten realisiert werden. Weitere Potenziale ergeben sich durch eine gezielte Heranführung der Unterbodenströmung an den Vorrohrbereich vor den NOx-Speicherkatalysatoren. Die Berechnungsergebnisse wurden mit Fahrzeugmessungen validiert. Bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten wird eine signifikante Abkühlung des Abgases erreicht. Bauteilschutzfunktionen werden deshalb erst bei deutlich über 200 km/h erforderlich. Durch die Abgaskühlmaßnahmen konnte auch der Schichtbetrieb bis zu Geschwindigkeiten von mehr als 130 km/h im Fahrzeug ausgeweitet werden.

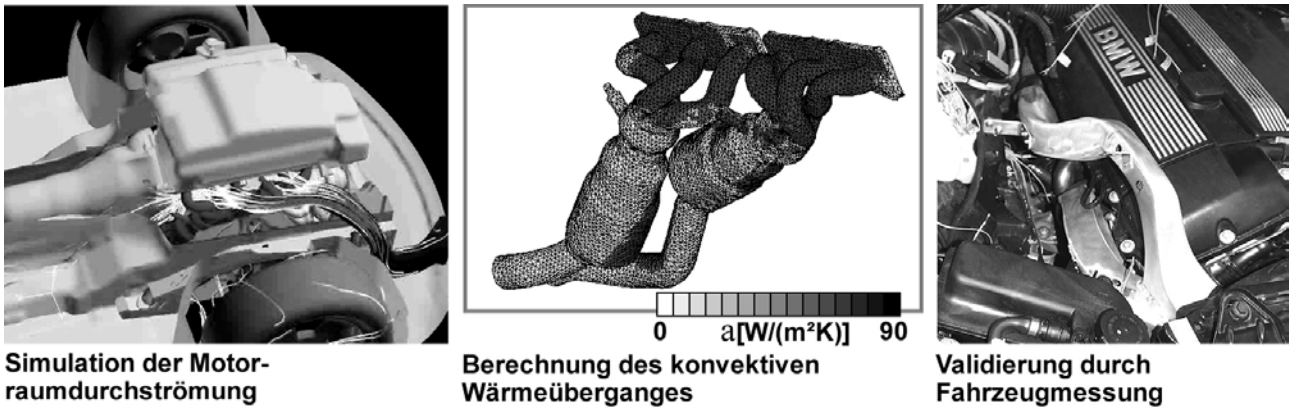


Bild 16: Beispiele aus der Entwicklung des Abgasanlagenwärmemanagements *Figure 16: examples for the development of exhaust system thermal management*

Allerdings ergibt sich auch hier auf der Motorsteuerungsseite ein erheblicher Mehraufwand. So ist trotz des Abgastemperatursensors für den Erhalt des Verbrauchspotenziales die exakte Modellierung der Abgastemperatur von größter Wichtigkeit. Die erheblichen Funktionsmehrun gen führen deshalb auch zu einem Ausbau der automatischen Bedatung mittels DoE, einer Erhöhung der Prozessorleistung und des Speicherplatzbedarfes sowie zum Teil neuen modularen Softwareansätzen mit einer intelligenten Verknüpfung mehrerer Koordinatoren. Diese bearbeiten jeweils Teilgebiete wie zum Beispiel Strategien für die Betriebsarten, Emissionserfüllung oder Anforderungen des Gesamtfahrzeuges.

#### 4. Ergebnisse

Die Motoren mit dem bei BMW entwickelten Brennverfahren erreichen spezifische Voll lastwerte von deutlich über  $60 \text{ kW/dm}^3$  und  $100 \text{ Nm/dm}^3$ .

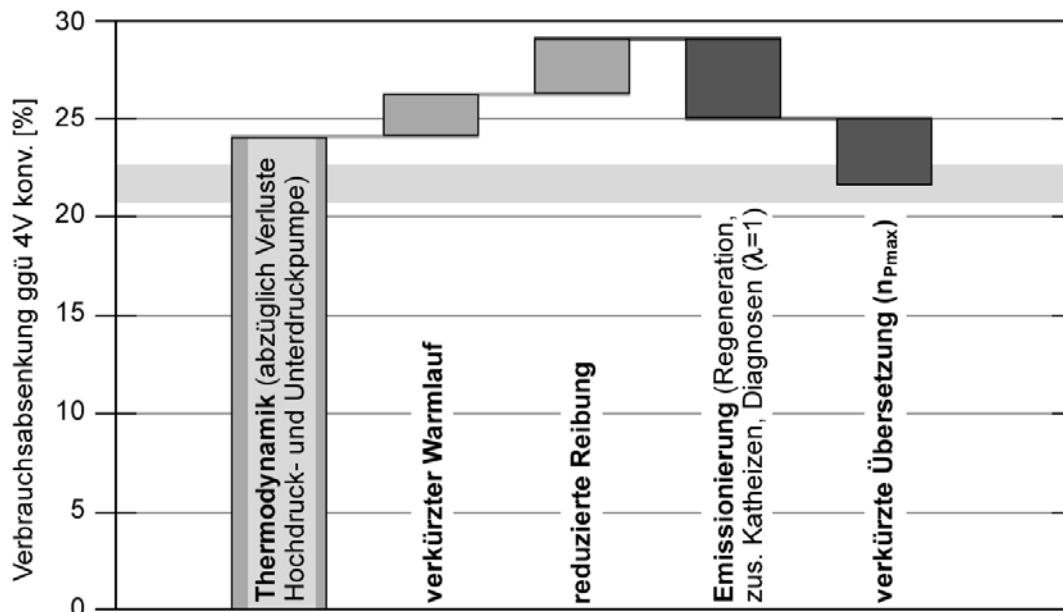


Bild 17: Verbrauchsergebnisse der Konzeptfahrzeuge im EU Fahrzyklus *Figure 17: fuel consumption results of the concept vehicles in European drive cycle*

Das Potenzial für eine Verbrauchsabsenkung von mindestens 20% gegenüber einem konventionellen Vierventilmotor im europäischen Fahrzyklus wird in einer Fahrzeugappli kation nachgewiesen (Bild 17). Darüber hinaus zeigen die Konzeptfahrzeuge im Gegen-

satz zu derzeit verfügbaren DI-Anwendungen erhebliche Verbrauchsvorteile auch bei dynamischen, kundenrelevanten Fahrprofilen.

Die sichere Erfüllung der EU4-Gesetzgebung wurde nachgewiesen, besonders die HC-Rohemissionen können gegenüber wand- oder luftgeführten Verfahren signifikant reduziert werden. Die Anforderungen der ULEV II - Gesetzgebung (u. a. 0,05 g NO<sub>x</sub>/mile) sind auch unter Beachtung der in den USA verfügbaren Kraftstoffqualitäten dagegen nach heutiger Einschätzung nicht erreichbar.

Die Motoren zeigen für den frühen Entwicklungsstand eine exzellente Aussetzerfreiheit; allerdings ist sie wegen des Schichtbetriebes auch bei hohen Energieumsetzungen, Lasten und Drehzahlen unabdingbar. Das Brennverfahren gestattet eine Ausweitung des Schichtbetriebes bis zu Lasten von über 0,7 kJ/dm<sup>3</sup> und Drehzahlen bis 4500 U/min; darüber schließt sich ein Bereich mit hybrider Verbrennung an.

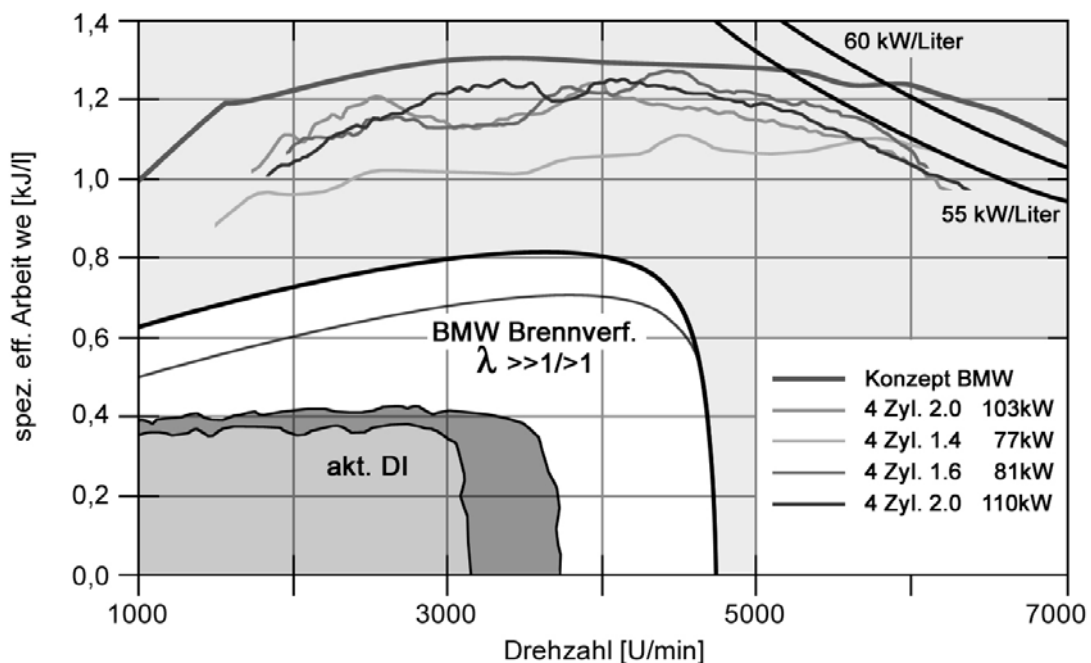


Bild 18: Vollast und Schichtbereich: Vergleich mit europ. DI Wettbewerb

Figure 18: performance and stratified engine map area: comparison with European DI competition

Im Bild 18 sind die Volllastwerte und die Größe des Schichtbereiches im Vergleich zu im Markt verfügbaren DI-Motoren aus europäischer Fertigung dargestellt. Für BMW-typische Motor-/Fahrzeugkombinationen ermöglicht das BMW Brennverfahren den Schichtbetrieb auch über die im Test maximal vorkommenden 120 km/h hinaus und den reinen stöchiometrischen Betrieb erst bei sehr hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten. Die Nutzung dieser Bereiche wird somit nicht vom Brennverfahren, sondern vom Entwicklungsfortschritt der NO<sub>x</sub>-Speicherkatbeschichtungen bestimmt.

Zu berücksichtigen ist allerdings auch die Kostensituation. Gegenüber dem heutigen Stand der Ottomotorentechnik entstehen erhebliche Mehrkosten (Injektor mit Piezoantrieb, mengengeregelter 200 bar Pumpe, Maßnahmen zum Wärmemanagement, NO<sub>x</sub>-Speicherkat und Sensorik). Diese werden voraussichtlich die Anwendung dieser Technik vorrangig auf das Premiumsegment und Motoren mit einem Hubraum von mindestens 2 Litern beschränken.

Die Verfügbarkeit dieser Technologie ist eher mittelfristig. Die notwendigen Weiterentwicklungen bei den Einspritzkomponenten (Robustheit, Toleranzen und Kosten), den NO<sub>x</sub>-Speicherkatbeschichtungen (Robustheit, Anspringen bei niedrigen Temperaturen, NO<sub>x</sub>-Einspeicherung/Regeneration bei hohen NO<sub>x</sub>-Massenströmen, Kostenreduzierung) und den Zusatzfunktionen lassen mögliche Serieneinsätze erst ab 2006 erwarten. Damit wäre dies eine relevante Technologie zur Erfüllung der CO<sub>2</sub>-Anforderungen in Europa (2008) und Japan (2010).

Die Auswirkungen auf die Fertigung sind erheblich. Das Brennverfahren stellt mit der zentralen Unterbringung von Injektor und Zündkerze besondere Anforderungen an das Zylinderkopflayout. Darüber hinaus ist durch alternative Motortechnologien zu berücksichtigen, dass Magerkonzepte eventuell auch langfristig nicht weltweit einsetzbar sind. Deshalb ist die Einführung dieser Technologie voraussichtlich erst bei Motorneuentwicklungen oder bei größeren Fertigungsänderungen umzusetzen.

## **5. Zusammenfassung**

Aufbauend auf dem Stand der Motorentchnik bei BMW - der unter anderem mit der VALVETRONIC bereits weitgehend die Potenziale des stöchiometrisch betriebenen Ottomotors ausschöpft – wurden weiterreichende Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung für den Zeitraum bis 2008 (ACEA Zusage in Europa) bzw. 2010 (Japan) bewertet.

Für die nächsten Jahre wird BMW wegen gravierender Nachteile des aktuellen Standes der DI Technologie (Kosten, Kundenverbrauch, Robustheit Brennverfahren / Abgasnachbehandlung) weltweit und in allen Motorfamilien VALVETRONIC einsetzen.

Mittelfristig zeigt vorrangig ein bei BMW entwickeltes Brennverfahren (spraygeführt, mit zentraler Kraftstoffhochdruckeinspritzung) ein weiteres Verbrauchspotenzial, das im Fahrzeugkonzept nachgewiesen werden konnte. Darüber hinaus erfüllt es auch die BMW spezifischen Leistungs- und Verbrauchsanforderungen im oberen Last- und Drehzahlbereich.

Den Vorteilen sind die hohen Gesamtsystemkosten, die Komplexität und die noch notwendige Entwicklung der Komponenten zur Serienreife gegenüberzustellen. BMW kann sich den Einsatz dieser Technologie in Europa und Japan für den Zeitraum ab 2006 vorstellen. Für andere Märkte – zum Beispiel die USA – werden parallel alternative Technologien zu entwickeln und anzubieten sein – bei BMW ist dies langfristig die VALVETRONIC.