

Vogel Fachbuch

Service-Fibel

Uwe Rokosch

# On-Board- Diagnose

und moderne  
Abgasnachbehandlung

Uwe Rokosch  
On-Board-Diagnose

---

Service-Fibel

Dipl.-Ing. Uwe Rokosch

# **On-Board-Diagnose**

und moderne Abgasnachbehandlung

Vogel Buchverlag

Dipl.-Ing. UWE ROKOSCH

Jahrgang 1959

Nach dem Maschinenbau-Studium mit Fachrichtung Kraftfahrzeugtechnik an der TU Dresden bis 1990 Tätigkeit als Ingenieur in den Bereichen Produktionsvorbereitung/Instandsetzungstechnologie und Rechentchnik im VE Verkehrskombinat Magdeburg.

Von 1990 bis 1993 Dozent für Kfz-Technik und Straßenverkehrsrecht, anschließend Studienleiter der Bildungsakademie Verkehr Sachsen-Anhalt e. V. Bis 1995 Seminarleiter und Dozent für Technik und Verkehr und seit 1995 Geschäftsführer und Dozent an der Fachakademie für Technik und Betriebswirtschaft gGmbH (FTB).

1994 Berufung durch das Regierungspräsidium Magdeburg als Mitglied des Meisterprüfungsausschusses der Handwerkskammer Magdeburg für das Kfz-Technikerhandwerk.

Seit 2000 stellv. Vorsitzender des Prüfungsausschusses Kfz-Service-Techniker der IHK Magdeburg.

---

**Weitere Informationen:**

[www.vogel-buchverlag.de](http://www.vogel-buchverlag.de)

---

ISBN-13: 978-3-8343-3002-4

ISBN-10: 3-8343-3002-7

1. Auflage. 2006

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.  
Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2006 by Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg

Herstellung: Claudia Wild, Stuttgart

---

# Vorwort

In den nächsten Jahren müssen der Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen der Kraftfahrzeuge drastisch gesenkt werden. Von der Europäischen Kommission wurde dazu das «**Auto/Öl-Programm**» verabschiedet. Vom Grundsatz her ist dieses Programm eine Abgasrichtlinie, eine Regelung der Typzulassung von Fahrzeugen und eine Richtlinie zur internen technischen Überprüfung der Abgasgrenzwerte der Fahrzeuge. Die Automobilindustrie hat sich im Rahmen dieses Programms verpflichtet, die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftfahrzeuge (Pkw) auf 140 g/km zu senken. Eine Verschärfung der Wartungs- und Kontrollvorschriften über die Lebensdauer der Fahrzeuge soll die Einhaltung der Vorgaben garantieren. Damit wurden von der EU wesentliche Voraussetzungen für die Einführung der **On-Board-Diagnose** geschaffen.

Seit 01. Januar 2000 müssen alle neuen Fahrzeuge mit Ottomotor mit OBD-Systemen ausgerüstet sein. Für Fahrzeuge mit Dieselmotor gilt die Forderung ab 2005. Dabei muss gesichert sein, dass eine genormte Schnittstelle am Fahrzeug vorhanden ist und alle Daten der Emissionsminderungssysteme jeder Werkstatt und allen anderen Nutzern zur Verfügung stehen. Die Hersteller sind verpflichtet, die technischen Informationen zur OBD ihrer Fahrzeuge jedem Nutzer zugänglich zu machen.

Die OBD-Systeme ermöglichen die permanente Überwachung der abgasrelevanten Bauteile und Systeme eines Fahrzeuges. Sie liefern aktuelle Daten über das Fahrzeug und die Software- und Steuergeräteversion. Um alle Forderungen zu erfüllen, sind eine Vielzahl von Sensoren zur Überwachung der Motorsteuerung und der verschiedenen Abgasreinigungssysteme notwendig. Eine ständige Selbstüberwachung und diverse Plausibilitätsprüfungen garantieren eine umfassende Systemkontrolle. Systemfehler und Fehlerumgebungsbedingungen werden nach einheitlichen Normen in einem Fehlerspeicher abgelegt und können mit passenden Datensichtgeräten ausgelesen werden.

Diese Servicefibel gibt Kfz-Meistern, Kfz-Servicetechnikern, Kfz-Mechatronikern und Auszubildenden einen Überblick über die gesetzlichen Vorschriften und Rahmenbedingungen zur Emissionsminderung, die Vorgänge der Schadstoffentwicklung in Verbrennungsmotoren, und es werden die aktuellen und künftigen Systeme zur Emissionsminderung vorgestellt. Komplizierte Vorgänge werden dem Leser einfach erklärt. Auf Basis dieser komplexen Zusammenhänge werden die OBD-Systeme und die Funktionsmechanismen der Fehlerbehandlung an abgasrelevanten Bauteilen erläutert. Eine Liste der genormten OBD-Fehlercodes ist im Anhang zusammengestellt. Der Leser erhält zusätzlich einen Ausblick auf interessante Entwicklungen künftiger Abgasreinigungssysteme und künftige Verbrennungsmotorentchnik.

In die vorliegende Servicefibel eingeflossen sind die langjährigen Erfahrungen des Autors aus der Ausbildung von Kfz-Technikermeistern und Kfz-Servicetechnikern

sowie aus der Durchführung von Abgasuntersuchungs-Prüfungslehrgängen, die an der Fachakademie für Technik und Betriebswirtschaft gGmbH (FTB) in Magdeburg mit Genehmigung der obersten Landesbehörde des Landes Sachsen-Anhalt durchgeführt werden.

Mein Dank gilt allen Herstellern und Unternehmen der Zulieferindustrie, die durch Bereitstellung von Bildmaterial und technischen Informationen zum Gelingen des interessanten Projektes beigetragen haben.

Magdeburg

Dipl.-Ing. Uwe Rokosch

---

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	5
Einleitung .....	13
<b>1 Entwicklungsbetrachtungen .....</b>	<b>15</b>
1.1 90 Jahre Motorentechnik – ein Vergleich .....	15
1.2 Leistungen moderner Motoren und ihrer Steuerungen .....	16
<b>2 Abgasgesetzgebung .....</b>	<b>21</b>
2.1 Die weltweite Abgasgesetzgebung .....	21
2.2 Die europäischen Abgasnormen .....	26
2.3 Zeitplan der Einführung EURO 4 und darüber hinaus .....	31
2.4 Europäischer Fahrzyklus NEDC für die Typprüfung .....	33
2.4.1 Ermittlung der Verdampfungsverluste .....	35
2.4.2 Abgasanalyseverfahren nach der CVS-Methode .....	36
Verfahrensbeschreibung der CVS-Methode .....	36
FID-Verfahren .....	38
NDIR-Verfahren .....	38
Elektronisches Messverfahren für Sauerstoff .....	39
Messung zur Bestimmung der Partikelmasse .....	39
2.5 Selbstverpflichtung der Automobilindustrie zur Kraftstoff- und CO <sub>2</sub> -Reduzierung .....	40
<b>3 Abgasbestandteile bei Verbrennungsmotoren .....</b>	<b>43</b>
3.1 Schadstoffe .....	43
3.2 Kohlenmonoxid CO .....	44
3.3 Kohlenwasserstoffe HC .....	44
3.4 Stickoxide NO <sub>x</sub> .....	44
3.5 Schwefeloxid SO <sub>x</sub> .....	45
3.6 Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S) .....	46
3.7 Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) .....	46



Der Onlineservice InfoClick bietet unter [www.vogel-buchverlag.de](http://www.vogel-buchverlag.de) nach Codeeingabe zusätzliche Informationen und Aktualisierungen.

3.8	Ruß und Partikel	46
3.9	Feinstaub	48
3.10	Blaurauch und Weißrauch	49
3.11	Kohlendioxid CO <sub>2</sub>	49
<b>4</b>	<b>Verbrennungsvorgang und Schadstoffemission bei Ottomotoren</b>	<b>53</b>
4.1	Allgemeine Anforderungen	53
4.2	Verbrennungsluftverhältnis	53
4.3	Verbrennungsluftverhältnis und Schadstoffemission bei Ottomotoren	54
4.4	Entwicklungen zur Schadstoffreduzierung bei Ottomotoren	56
<b>5</b>	<b>Verbrennungsvorgang und Schadstoffemission bei Dieselmotoren</b>	<b>61</b>
5.1	Dieselverbrennungsverfahren	61
5.2	Einlassdrallkanal und Luftrotation	63
5.3	Verbrennungsvorgang im Dieselmotor	64
5.3.1	Einflussfaktoren auf den Zündverzug	64
5.3.2	Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor	66
5.3.3	Piloteinspritzung bei moderner Dieselmotoren	68
5.3.4	Einspritzadaption bei modernen Dieselmotoren	71
5.4	Verbrennungsluftverhältnis und Schadstoffemission bei Dieselmotoren	72
5.5	Entwicklungen zur Schadstoffreduzierung und Rußvermeidung	74
5.6	Künftige Entwicklungen bei Verbrennungsmotoren	76
5.6.1	Piezo Direct Injection (PDI)	76
5.6.2	Neue Brennverfahren für die Benzindirekteinspritzung	78
5.6.3	Künftige Einspritzsysteme für Dieselmotoren	80
<b>6</b>	<b>Abgaskatalysatoren</b>	<b>83</b>
6.1	Grundarten der Katalysatoren	83
6.2	Aufbau der Katalysatoren	84
6.2.1	Vergleich Keramikkatalysator – Metallkatalysator	86
6.2.2	Ressourcen der Edelmetalle für Katalysatoren	86
6.2.3	Chemische Vorgänge im Katalysator	88
6.2.4	Konvertierungsverhalten eines neuwertigen Abgaskatalysators	88
6.3	Einsatzbedingungen für Katalysatoren	90
6.4	Katalysatoren für Ottomotoren	91
6.4.1	Oxidationskatalysator	91
6.4.2	Dreiwege-Katalysator	91
6.4.3	Anforderungen an neue Katalysatorkonzepte	92
6.4.4	Motornahe Katalysatoren	93
6.4.5	Bypass-System	95
6.4.6	Elektrisch beheizter Katalysator	95
6.4.7	Speicherkatalysator – SCR-Katalysator	96
6.4.8	Kontinuierlich arbeitende Reduktionskatalysatoren	97
6.4.9	Diskontinuierlich arbeitende Reduktionskatalysatoren	98
6.5	Katalysatoren für Dieselmotoren	99
6.5.1	Dieselmotorkatalysator	99
6.5.2	SCR-Katalysator (Selective Catalytic Reduction)	100
6.5.3	Weitere Katalysatorsysteme für Dieselmotoren	103

<b>7</b>	<b>Lambda-Regelung und Lambda-Sonden</b> . . . . .	107
7.1	Zirkoniumsonde oder Spannungssonde . . . . .	108
7.2	Titandioxidsonde oder Widerstandssonde . . . . .	109
7.3	Breitband-Lambda-Sonde oder Lambda-Sonde Universal (LSU) . . . . .	111
7.4	Stickoxidsensor oder Doppelkammersensor . . . . .	113
7.5	Diagnose der Lambda-Sonden . . . . .	114
<b>8</b>	<b>Partikelfiltersysteme</b> . . . . .	119
8.1	Partikelfiltersysteme für Pkw-Dieselmotoren . . . . .	121
8.1.1	Partikelfilter FAP von Peugeot . . . . .	122
8.1.2	Partikelfilter von Bosch (Taschenfilter) . . . . .	124
8.1.3	Partikelfiltersysteme von VW und Audi . . . . .	125
8.1.4	Partikelfilter von BMW . . . . .	127
8.1.5	D-CAT von Toyota . . . . .	128
8.2	Rußfiltersysteme für Nfz-Dieselmotoren . . . . .	130
8.2.1	CRT-System . . . . .	131
8.2.2	SCR-AC-Technik . . . . .	132
8.2.3	Künftige komplexe Diesel-Abgasreinigungssysteme . . . . .	133
8.3	Regenerationsbedingungen bei Partikelfiltern . . . . .	135
8.3.1	Vergleich erreichbarer Abgastemperaturen verschiedener Systeme . . . . .	135
8.3.2	Natürliche Regeneration im Filter . . . . .	136
8.3.3	Ermittlung der Rußbelastung des Partikelfilters . . . . .	136
8.3.4	Kontrolleuchte und Kurzstreckenbetrieb . . . . .	138
8.3.5	Besonderheiten beim Einsatz von Partikelfiltern . . . . .	139
8.3.6	Filternachrüstung und Partikelfilterförderung . . . . .	140
<b>9</b>	<b>On-Board-Diagnose</b> . . . . .	145
9.1	Geschichte der OBD I und OBD II . . . . .	145
9.2	Anforderungen an die OBD-Systeme . . . . .	146
9.2.1	Allgemeine Forderungen an die OBD . . . . .	148
9.2.2	Manipulationsschutz OBD . . . . .	150
9.2.3	Fehlerbehandlung bei der OBD . . . . .	150
9.2.4	Abschaltbedingungen für die OBD . . . . .	154
9.2.5	Standardisierte OBD-Schnittstelle . . . . .	154
9.2.6	Anschluss an die OBD-Schnittstelle . . . . .	156
9.3	Systematik der OBD-Fehlercodes . . . . .	158
9.3.1	Freeze-Frame-Daten . . . . .	160
9.3.2	Readinesscode . . . . .	161
9.4	Funktionsumfang der OBD-Prüfebene . . . . .	164
<b>10</b>	<b>OBD-System bei Ottomotoren</b> . . . . .	171
10.1	Grundaufbau eines OBD-Systems . . . . .	171
10.2	Erkennung von Zündaussetzern . . . . .	172
10.2.1	Laufunruheverfahren . . . . .	172
10.2.2	Moment-Analyseverfahren . . . . .	174
10.3	Überwachung der Katalysatorfunktion . . . . .	175

10.4	Überwachung der Lambda-Sonden	177
10.4.1	Diagnose der Regelsonde	177
10.4.2	Diagnose der Monitorsonde	177
10.4.3	Diagnose der Lambda-Sondenheizung	178
10.4.4	Diagnose der Breitband-Lambda-Sonde	179
10.5	Überwachung der Abgasrückführung	180
10.6	Überwachung der Tankentlüftung	181
10.7	Überwachung des Sekundärluftsystems	182
10.8	Überwachung des Kraftstoffsystems	183
10.9	Adaption der Gemischanpassung	185
10.10	Überwachung der E-Gas-Funktion	188
10.11	Thermostatdiagnose	190
10.12	Überwachung des CAN-Busses	190
10.13	Überwachung weiterer Systeme und einzelner Sensoren	191
10.13.1	Überwachung des Ladedruckes	192
10.13.2	Überwachung des Geschwindigkeitssignals	192
10.13.3	Überwachung des Luftmassenmessers	193
10.13.4	Überwachung des Bremslicht- und Kupplungspedalschalters	194
10.13.5	Überwachung der Nockenwellenposition	195
<b>11</b>	<b>OB-D-Systeme für Dieselmotoren (D-OB-D)</b>	<b>197</b>
11.1	Überwachte Systeme und Sensoren der D-OB-D	197
11.2	Aussetzererkennung bei der D-OB-D	199
11.3	Einspritzbeginn-Regelabweichung	199
11.4	Überwachung der Abgasrückführung	201
11.4.1	Regelabweichung Abgasrückführung (pneumatisch)	201
11.4.2	Lageregelung Abgasrückführung (elektrisch)	201
11.5	Ladedruckregelabweichung	202
11.6	Glühsystem	203
11.7	Überwachung weiterer Systeme und einzelner Sensoren	204
11.7.1	CAN-Datenbus-Diagnose	204
11.7.2	Geber für die Kühlmitteltemperatur	205
11.7.3	Geber für die Kraftstofftemperatur	205
11.7.4	Heißfilm-Luftmassenmesser	206
11.7.5	Lambda-Sonde und Lambda-Sonden-Heizungsregelung	206
11.7.6	Geschwindigkeitssignal	207
11.8	Partikelfilterüberwachung	207
11.8.1	Druck- und Temperatursensoren vor und hinter dem Filter	207
11.8.2	Temperaturgeber vor dem Turbolader	208
11.8.3	Lambda-Sonde und Luftmassenmesser	209
11.8.4	Kontrollleuchte für Dieselpartikelfilter	210
11.8.5	Überwachung der Partikelfiltersysteme mit Additiv	210
11.9	Rußsensoren zur Überwachung der Verbrennung oder der Partikelfilter	211
<b>12</b>	<b>Technische Herausforderungen bei der Umsetzung der vorgeschriebenen Diagnosefunktionen</b>	<b>213</b>
12.1	Zeitliche Organisation der Diagnosefunktionen	213
12.2	Berücksichtigung verschiedener Fahrzeugvarianten	215

12.3	Berücksichtigung künftiger Abgasreinigungstechnologien . . . . .	216
12.4	Anpassung an neue Motoren . . . . .	216
<b>13</b>	<b>Grundvoraussetzungen für die OBD-Fehlerdiagnose . . . . .</b>	<b>219</b>
<b>14</b>	<b>Abgasuntersuchungen bei OBD-Systemen . . . . .</b>	<b>223</b>
14.1	Sichtprüfung bei schadstoffrelevanten Bauteilen . . . . .	223
14.2	AU-Software für OBD . . . . .	224
14.3	AU an Fahrzeugen mit Ottomotor und OBD-System . . . . .	225
14.4	Muster eines OBD-Prüfberichtes . . . . .	227
14.5	Probleme bei OBD-Fahrzeugen mit Ottomotor . . . . .	227
	14.5.1 Probleme bei bestimmten Fahrzeugen . . . . .	229
	14.5.2 OBD-Ersatzverfahren für VW-Modelle . . . . .	233
14.6	AU an Fahrzeugen mit Dieselmotor und D-OBD-System . . . . .	233
14.7	Muster eines OBD-Prüfberichtes D-OBD . . . . .	235
<b>15</b>	<b>OBD 3, OBM und künftige Anforderungen . . . . .</b>	<b>237</b>
<b>16</b>	<b>Auszüge aus den EU-Verordnungen zur OBD . . . . .</b>	<b>241</b>
	Auszug aus der Richtlinie 98/69/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 1998 über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zu Änderung der Richtlinie 70/220/EWG des Rates . . . . .	241
	Richtlinie 1999/102/EG der Kommission vom 15. Dezember 1999 zur Anpassung der Richtlinie 70/220/EWG des Rates über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen an den technischen Fortschritt (Text von Bedeutung für den EWR) . . . . .	261
	<b>Anhang: Definierte OBD-Fehlercode-Liste nach SAE J2012 und ISO 15 031–6 . . . . .</b>	<b>265</b>
	<b>Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen . . . . .</b>	<b>291</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>295</b>
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>297</b>



---

# Einleitung

Alle Entwicklungsbereiche der Fahrzeug- und Motorenteknik haben in den letzten Jahren riesige Fortschritte gemacht. Der Zeitraum von der Idee eines Konzeptes bis zur Serieneinführung wird immer kürzer. Die finanziellen Aufwendungen für Forschung und Entwicklung steigen erheblich. Für die vollständige Neuentwicklung eines Motors vom ersten Federstrich bis zur Serienreife müssen die Hersteller zwischen 500 000 Mio. und 1 Mrd. € investieren. Die komplette Entwicklung eines Fahrzeuges kostet ein Vielfaches. Neben den Aspekten der Fahrzeugsicherheit und des Fahrkomforts stehen primär Maßnahmen zur Verbrauchsreduzierung und zur Minimierung der Schadstoffemission im Mittelpunkt der Entwicklungsaufwendungen. So konnte in den letzten 15 Jahren die Schadstoffemission moderner Motoren von EURO 1 bis EURO 4 um mehr als 90 % gesenkt werden. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch sank in den letzten 10 Jahren um rund 2 Liter pro 100 km. Die Partikelemission bei Dieselmotoren ist seit 1985 um mehr als 95 Prozent gesunken. Dies ist besonders unter dem Aspekt interessant, dass im gleichen Zeitraum die Fahrzeuggewichte aufgrund höherer Sicherheits- und Komfortanforderungen deutlich gestiegen sind. Letztlich geht es bei heutigen Motorenentwicklungen und neuen Systemen immer darum, für jeden möglichen Betriebspunkt die Kraftstoffzumessung im Bereich von wenigen Milligramm und den Zündzeitpunkt im Bereich von wenigen Millisekunden exakt zu steuern. Die bisher erreichten Erfolge konnten durch innermotorische Maßnahmen, wie

- Optimierung der Einspritzstrategien,
- Optimierung der Brennverfahren,
- Optimierung der Luftzufuhr,
- Verbesserung der Kraftstoffqualität,
- Optimierung der Katalysatortechnik,
- Optimierung der Partikelfiltertechnik,
- Entwicklung leistungsfähiger Sensoren,
- Verbesserungen der verwendeten Werkstoffe,
- Verbesserungen der Fertigungstechnologien,

realisiert werden.

Das geht natürlich nicht ohne Unterstützung von komplexen elektronischen Systemen. Ohne Elektronik wird künftig nichts mehr am Motor geregelt, überwacht oder gesteuert werden. Der Anteil der Elektronik eines Oberklassefahrzeuges macht schon heute bis zu 40 % der Wertschöpfung aus. Die Tendenz ist steigend. Moderne Motorsteuerungen sind in der Lage, mehrere Millionen Rechenoperationen pro Sekunde auszuführen. Ohne eine geeignete Systemüberwachung und Eigendiagnose der Sys-

teme würde blankes Chaos herrschen. Werkstätten und Dienstleister wären hoffnungslos überfordert. Bei neuen Motorsteuerungen werden rund 50 % der verfügbaren Prozessorkapazität für die Überwachung und Eigendiagnose des Systems genutzt. Notlauffunktionen heutiger Systeme verfügen über ein Mehrfaches der Leistungsfähigkeit älterer Hauptsysteme. Die in modernen Fahrzeugen eingebauten Prozessoren verfügen über mehr Rechnerleistung als das gesamte Rechenzentrum, das 1969 die Raumfähre Apollo 11 zur Mondlandung führte.

Um die komplexen Zusammenhänge in modernen Systemen und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten zu verstehen, ist ein umfangreiches technisches Wissen notwendig. Dabei spielt die Typenspezifika eine untergeordnete Rolle, da alle Systeme nach den gleichen chemischen und physikalischen Gesetzmäßigkeiten funktionieren. Um dem möglichen unübersichtlichen Chaos im Diagnosebereich vorzubeugen, hat der Gesetzgeber wenigstens im Bereich der schadstoffrelevanten Motordiagnose einheitliche Bedingungen und Standards festgelegt. Leider werden diese Standards nicht immer bei allen Fahrzeugtypen und von allen Herstellern hundertprozentig eingehalten.

In den folgenden Kapiteln werden neben den umfangreichen Erläuterungen und Darstellungen zu den OBD-Systemen alle mit der On-Board-Diagnose unmittelbar im Zusammenhang stehenden Themen behandelt. Das betrifft besonders die verschiedenen Systeme der Abgasnachbehandlung. Ausblicke auf künftige Entwicklungen der Motoren- und Abgastechnik sollen den Leser für die Komplexität der Prozesse und die erheblichen wissenschaftlich-technischen Anstrengungen der Automobilentwickler sensibilisieren. Leider verschleiern oftmals blinder Aktionismus und Populismus politischer Kreise den Blick für das Wesentliche. Mit dem vorliegenden Buch möchte ich auch eine Lanze für die Erfolge der Automobilindustrie im Ringen um niedrigere Emissionen und geringeren Kraftstoffverbrauch brechen.

---

# 1 Entwicklungsbetrachtungen

Um die Komplexität moderner Motoren und Steuersysteme zu verstehen, lohnt sich ein kurzer Rückblick in die Historie der Motorenentwicklung. Bei dem folgenden Vergleich muss auch beachtet werden, dass zwei Weltkriege mit ihren nachfolgenden Krisen- und Aufbaujahren keine Zeit für innovative technische Entwicklungen ließen. Viele Systeme, die als «neu» angeboten werden, wurden schon vor längerer Zeit von findigen Ingenieuren und Technikern erfunden. Oft waren Unzuverlässigkeiten aufgrund minderwertiger Werkstoffe oder zu hohe Produktionskosten die Bremsen der Neuentwicklung. Neue Werkstoffe und die rasanten Fortschritte der Elektronik eröffneten vielen Entwicklungen neue Perspektiven. Die Einführung neuer Techniken und Systeme erfolgt in immer kürzeren Intervallen. So ist es nur eine Frage der Zeit, bis beispielsweise die Nockenwellen aus den Pkw-Motoren verschwunden sind und die Betätigung der Ventile über sehr schnell schaltende hydraulische, elektrohydraulische, pneumatische oder elektrische Einrichtungen erfolgt. Dadurch wird eine völlige Variabilität der Gaswechselsteuerung möglich. Verschiedene Aufladungsverfahren werden bei kleinen Ottomotoren ebenso Standard werden wie die Turboaufladung bei Dieselmotoren. Der Begriff «Downsizing» wird Wirklichkeit. Es ist nicht ausgeschlossen, dass eines Tages nur noch geringe Unterschiede zwischen Otto- und Dieselmotoren existieren und die Art des gerade getankten Kraftstoffes das Verbrenungsverfahren des Motors bestimmt. Völlig neue, bisher nicht für möglich gehaltene Verbrenungsverfahren und Kraftstoffe werden mittel- und langfristig die Welt der Verbrennungsmotoren erobern.

## 1.1 90 Jahre Motorentechnik – ein Vergleich

In Tabelle 1.1 ist ein Vergleich zwischen einem Hochleistungsmotor (Rennmotor) aus dem Jahr 1913 und normalen Serienmotoren aus den Jahren 1992 und 2005 dargestellt. Zwischen den Motoren liegen rund 90 Jahre Motorenentwicklung. Der Vergleich bietet sich deshalb an, weil alle drei Motoren vom gleichen Hersteller stammen und alle nach demselben Verbrennungs- und Arbeitsverfahren arbeiten. Der in Bild 1.1 dargestellte Leistungs- und Druckverlauf der Motoren verdeutlicht die Fortschritte in der Motorenentwicklung. In den nächsten Jahren sind weitere innovative Fortschritte im Motorenbau zu erwarten. Besonders der Vergleich der Kraftstoffverbräuche und der erreichten Schadstoffnormen bei steigender Leistung und höherem Drehmoment machen die qualitativen Entwicklungen sichtbar. So waren die Schadstoffwerte des Motors von 1913 mit heutiger Abgasmesstechnik nicht mehr zu erfassen. Der zur Verfügung stehende Messbereich moderner Analysegeräte reichte dafür einfach nicht aus.

## 1.2 Leistungen moderner Motoren und ihrer Steuerungen

Motoren sind Hochtechnologie pur. Unter den Motorhauben moderner Fahrzeuge tobt ein höllisches Inferno. Läuft beispielsweise ein Achtzylinder mit  $5800 \text{ min}^{-1}$ , strömen 11 300 Liter Frischluft mit über 325 Stundenkilometern pro Minute durch die Ansaugkanäle. Die Wasserpumpe presst pro Sekunde 4,5 Liter Flüssigkeit durch das Kühlsystem. Über 23 000 Verbrennungen pro Minute beschleunigen die rund 535 Gramm schweren Kolben bei einer Temperatur von  $3000^\circ\text{C}$  und mit einem Druck von 5,7 Tonnen in zwei tausendstel Sekunden auf über 100 Stundenkilometer. Jeder der 32 Nocken hämmert 48-mal pro Sekunde mit 140 kg auf einen der 32 Stößel ein, während das  $960^\circ\text{C}$  heiße Abgas mit Schallgeschwindigkeit in Richtung Katalysatorsystem strömt.

Ungeheure Gewalten mit kaum vorstellbaren Kräften sind in den Zylindern am Werk – gebändigt, gesteuert und kontrolliert von einem kleinen unscheinbaren Rechner. Die Motorelektronik registriert unter anderem Menge, Dichte und Temperatur der angesaugten Luft. Sie vermischt die Luft im optimalen Verhältnis mit dem Kraftstoff, den sie pro Verbrennungsvorgang auf ein Milligramm oder ein tausendstel Milliliter genau dosiert. Sie regelt die Auslösung des 30 000 V starken Zündfunken auf das Hundertstel einer Tausendstelsekunde. Um ihre Aufgabe perfekt erfüllen zu können, erhält die Elektronik von anderen elektronischen Systemen und zahlreichen Sensoren über einen CAN-Bus bis zu tausend Informationen pro Sekunde, die sie mit zehn bis zwanzig Millionen Rechenoperationen pro Sekunde verarbeitet. Ständige Überprüfung der gemessenen Werte, Vergleiche mit programmierten Sollwerten und selbstständig lernende (adaptive) Anpassung an die optimalen Betriebsbedingungen

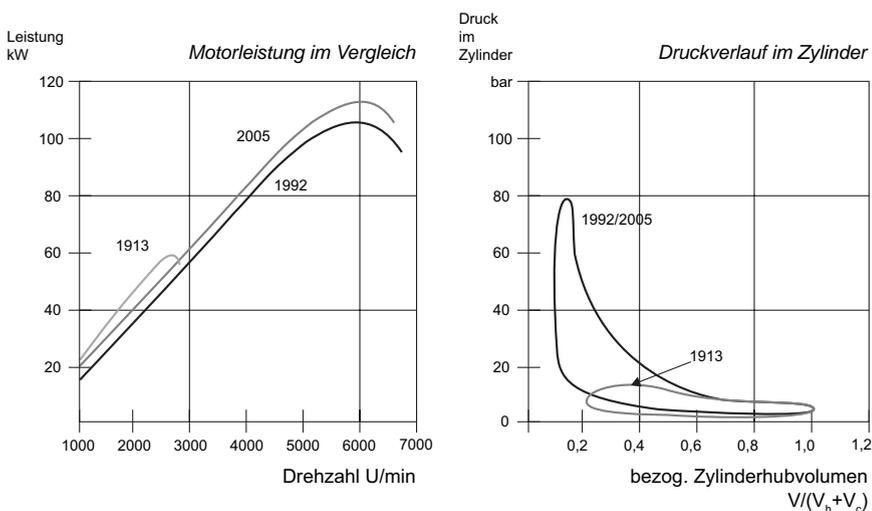


Bild 1.1  
Vergleich von Leistungskurve und Druckniveau im Zylinder der Motoren

erfüllt das elektronische System wie selbstverständlich. Nach einer Grundprogrammierung sind die Systeme selbstständig in der Lage, sich auf den jeweiligen Motor optimal anzupassen und Veränderungen zu kompensieren. Durch die Verwendung von Hunderten Kennfeldern, Kennlinien und Konstanten lassen sich für alle Betriebszustände schnelle und genaue Anpassungen vornehmen.

Ohne Elektronik würden die Motoren heute 25 % bis 30 % mehr Kraftstoff benötigen, die gute Laufkultur wäre ebenso illusorisch wie die Einhaltung der vorgeschriebenen Abgasgrenzwerte. Die Lebenserwartung der Aggregate würde deutlich niedriger ausfallen. Elektronik galt früher als teuer, störanfällig und kaum reparierbar. Die Mechanik aber stieß an die Grenzen ihrer Möglichkeiten. Eine Weiterentwicklung des Motormanagements war auf herkömmliche Weise nicht machbar. Doppel- oder Dreifachvergaser zur Aufbereitung des Kraftstoff-Luft-Gemisches waren extrem aufwendig und kompliziert, so dass viele Werkstätten mit Wartung und Ein-

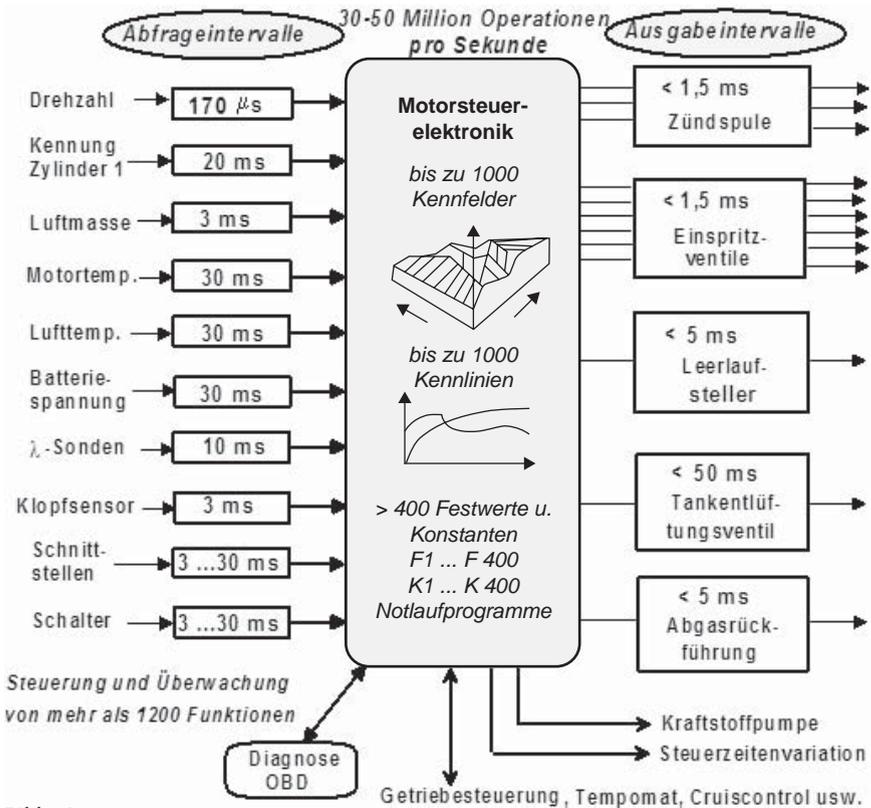


Bild 1.2  
Leistungsfähigkeit einer modernen Motorsteuerung

stellung überfordert waren. Eine exakte Erfassung der aktuellen Betriebsbedingungen war nicht möglich. Auswege bot allein der Einsatz der Elektronik.

Im Motorraum eines Autos muss die Elektronik sowohl  $-40^{\circ}\text{C}$  wie  $+150^{\circ}\text{C}$  verkraften. Dazu kommen Schmutz, Staub und Feuchtigkeit sowie Stöße und Erschütterungen auf Schlaglochstrecken. Es wirken kurzzeitige Beschleunigungskräfte bis zum Hundertfachen der Erdbeschleunigung. Die neuesten Generationen der Motorsteuerelektronik können bis zu zwanzig Millionen Informationen pro Sekunde verarbeiten. Innerhalb der nächsten Jahre werden 30 bis 50 Millionen Rechenoperationen pro Sekunde normal sein.

Durch den Einsatz selbstlernender Verfahren werden die Systeme noch komplexer. Sie können auf Umweltbedingungen ebenso schnell reagieren wie auf Veränderungen am Motor. Innerhalb bestimmter Grenzen können die Systeme Fehlfunktionen erkennen, ausgleichen und Fehler und Betriebsbedingungen speichern. Eine individuelle Anpassung an den konkreten Motor ist möglich.

Bei der Aufnahme von Kennfeldern für neue Motoren werden in aufwendigen Prüfstandsversuchen die optimalen Daten ermittelt. Dabei werden täglich im 0,1-Sekunden-Takt über 6500 Messwerte ermittelt, gespeichert und verarbeitet. Danach erfolgt die Anpassung der auf dem Prüfstand ermittelten Daten hinsichtlich ihrer Fahrbarkeit und Nutzerfreundlichkeit im realen Fahrversuch.

Motronic-Systeme teilen sich in die Teilsysteme für die elektronische Benzineinspritzung und die elektronische Zündungssteuerung. Sie sind die historische Basis moderner OBD-Systeme. Der Unterschied der Motronic-Systeme zu herkömmlichen Benzineinspritzsystemen liegt in der Leistungsfähigkeit der elektronischen Steuereinheit und der Verwendung zahlreicher Kennfelder, Kennlinien und Konstanten. In den Steuereinheiten werden neben den Informationen zur Steuerung der Benzineinspritzung alle notwendigen Informationen zur Zündungssteuerung verarbeitet. Moderne Systeme arbeiten adaptiv. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass bestimmte Einstell- und Wartungsarbeiten entfallen. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Speicherbausteine und Prozessoren können immer mehr Kennfelder, Kennlinien, Festwerte, Konstanten und Zusatzfunktionen gespeichert werden (Bild 1.2). Die idealen Werte werden für die Soll-Ist-Vergleiche herangezogen und für adaptive Steuervorgänge genutzt. Die Notlaufprogramme und Hilfsfunktionen werden umfangreicher. Teilweise sind die Notlaufprogramme so leistungsfähig, dass der Fahrer keine Fehlfunktionen spürt und Defekte am Motor nicht rechtzeitig bemerkt werden. Der Datenaustausch mit anderen Elektroniksystemen des Fahrzeuges wie Getriebesteuerung, Fahrdynamikregelung und dgl. über CAN-Bus wird komplexer. Erst mit Einsatz dieser Systeme konnte die OBD zuverlässig eingeführt werden.

### **Hinweis**

Die angegebenen Zahlenwerte und Größen stellen nur Richtwerte dar und können von einzelnen Systemen über- oder unterschritten werden. Dabei ist in den nächsten Jahren mit einer weiteren Steigerung der Leistungsfähigkeit der Elektronik zu rechnen. Die Leistungsfähigkeit der elektronischen Bauteile und die Prozessorleistungen verdoppeln sich etwa alle 18 Monate.

Tabelle 1.1 Vergleich 90 Jahre Motorentechnik

Bewertungsgröße	Rennwagenmotor 1913	Serienmotor 1992	Serienmotor 2005
Motorart	4-Zylinder-Viertakt-OM	4-Zylinder-Viertakt-OM	4-Zylinder-Viertakt-OM
Gemischbildung	Vergaser	Multipointeinspritzung	Direkteinspritzung
Ventile pro Zylinder	4 Ventile	4 Ventile	4 Ventile
Hub (H) und Bohrung (B)	H = 160 mm B = 94 mm	H = 86 mm B = 86 mm	H = 94,6 mm B = 86 mm
Hub/Bohrung	1,7	1	1,1
Hubvolumen	4441 ccm	1998 ccm	2198 ccm
Verdichtung $\epsilon$	1: 5,1	1: 10,5	1: 12
max. Leistung kW/PS bei Drehzahl	60 kW/82 PS bei 2800 min <sup>-1</sup>	110 kW/150 PS bei 6000 min <sup>-1</sup>	114 kW/155 PS bei 6000 min <sup>-1</sup>
max. Moment bei Drehzahl	240 Nm bei 1700 min <sup>-1</sup>	196 Nm bei 4800 min <sup>-1</sup>	220 Nm bei 3800 min <sup>-1</sup>
min. spezifischer KSV $b_e$	400 g/kWh	232 g/kWh	< 220 g/kWh
max. Verbrauch	ca. 30...40 l/100 km	ca. 12...14 l/100 km	ca. 6,5...10,9 l/100 km
effektiver Mitteldruck $p_e$	7,2 bar	13,4 bar	13,7 bar
Verbrennungsspitzen- druck $p_{max}$	16 bar	77,1 bar	80 bar
Abgasnormerfüllung	nach oben offene Skala	US 93 Norm, Euro 2	EURO 4
Motorgewicht (trocken)	220 kg	120 kg	115 kg
Beschleunigung 0...100 km/h *	20 Sekunden	8,5 Sekunden	9,8 Sekunden
Höchstgeschwindigkeit *	150 km/h	223 km/h	210 km/h

\* Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit hängen auch von der Getriebeauslegung und den Übersetzungen im Kraftübertragungsstrang ab.



---

## 2 Abgasgesetzgebung

### 2.1 Die weltweite Abgasgesetzgebung

Bereits mit dem Auftauchen der ersten Fahrzeugen stellte man fest, dass die Abgase der Fahrzeuge einen unangenehmen Geruch verbreiteten. Um diesen Geruch zu vermindern, setzte man dem Abgas Parfüm und Duftstoffe zu. Im Jahr 1942 wurde in Kalifornien (damals 7 Million Einwohner und 3 Millionen Fahrzeuge) erstmals Smog nachgewiesen. Aber erst im Jahr 1952 konnte der Nachweis erbracht werden, dass es Zusammenhänge zwischen dem Stickoxid- und Kohlenwasserstoffausstoß von Fahrzeugen und der Einwirkung von UV-Strahlung des Sonnenlichtes gibt, die zu einer fotochemischen Reaktion führen. Seither hat sich viel auf dem Gebiet der Schadstoffreduzierung getan. Heute stoßen 20 Fahrzeuge weniger Schadstoffe aus als vor vierzig Jahren ein einziges Fahrzeug. Bei einem Fahrzeug mit EURO 4 ist das Abgas teilweise sauberer als die angesaugte Luft. Weitere Absenkungen des Schadstoffausstoßes der Fahrzeuge sind bereits beschlossene Sache.

Die weltweit wichtigsten Behörden für die Festlegung von Abgasgrenzwerten sind in Europa die «European Commission» (EC), in den USA die «Environmental Protection Agency» (EPA), in Kalifornien der «California Air Resources Board» (CARB) und in Japan das «Ministry of Transport» (MIT). Die anderen Staaten der Welt lehnen sich bei ihrer Abgasgesetzgebung meist an die Vorgaben dieser Staaten an oder übernehmen sie komplett. Dabei wird in einigen Ländern (z. B. in China die ECE 1504) auf recht alte Abgasgrenzwerte aus den Anfangsjahren der Abgasgesetzgebung zurückgegriffen.

#### Abgasgesetzgebung in Europa

Mit der ECE 15/01 wurden in Westeuropa im Jahr 1972 erstmals Grenzwerte für Abgasemissionen von Kraftfahrzeugen auf Basis eines Stadtfahrzyklus festgelegt. Die Grenzwerte wurden bis zur 1982 in Kraft getretenen ECE 1504 stufenweise verschärft. Die Katalysatorpflicht gilt seit 1992 mit Einführung der Stufe EURO 1. Gleichzeitig trat auch der neue europäische Fahrzyklus (NEFZ) für Pkw in Kraft. Der europäische Fahrzyklus besteht aus einem städtisch und einem außerstädtisch Zyklus. Die EURO 3 verschärfte die Schadstoffgrenzwerte und die Testanforderungen. Die bis dahin gültige 40-sekündige Leerlaufphase fiel weg. Das Abgas wird sofort ab Motorstart entnommen und gemessen. Die EURO 4 ist seit 01.01.2005 für die Typzulassung und ab 01.01.2006 für die Neuzulassung gültig. Sie schreibt eine faktische Halbierung des Schadstoffausstoßes gegenüber der EURO 3 vor. Es gibt unterschiedliche Grenzwerte für die verschiedenen Fahrzeugklassen. Über die Lebensdauer des Fahrzeuges ist ein Verschlechterungsfaktor, nach Schadstoffart unterschiedlich, von 1,1 bzw. 1,2 erlaubt. Bei der CO<sub>2</sub>-Messung wird berücksichtigt,

dass ein neues Fahrzeug mehr Kraftstoff verbraucht als ein eingefahrenes. Dafür wird ein Einlauffaktor von 0,92 berücksichtigt. Die noch schärferen Abgasnormen EURO 5 und EURO 6 stehen bereits auf der Tagesordnung. In den osteuropäischen Ländern spielten Schadstoffnormen bis Anfang der 90er-Jahre keine Rolle. Die Fahrzeugtechnik und die wirtschaftlichen Bedingungen in den Ländern ließen keinen Spielraum für anspruchsvolle Abgasnormen. Mit dem Beitritt vieler osteuropäischer Länder zur Europäischen Gemeinschaft gelten nach Übergangsfristen die jeweiligen aktuellen EU-Normen.

### **Abgasgesetzgebung in den USA und Kalifornien**

Erst im Jahr 1966 wurden die weltweit ersten Abgaslimits für Kraftfahrzeuge in Kalifornien wirksam. Der Gehalt an Kohlenwasserstoffen lag um den Faktor 20, der von Kohlenmonoxid um den Faktor 30 und der von Stickoxiden um den Faktor 5 über den heutigen Abgaslimits. Im Jahr 1975 wurden sie dahingehend verschärft, dass der Einsatz von Zweiweg-Katalysatoren unbedingt erforderlich war. Dafür war bleifreier Kraftstoff eine zwingende Voraussetzung. Seit 1978 sind Dreiweg-Katalysatoren für die Einhaltung der stufenweisen Verschärfung der Abgasgesetzgebung unumgänglich. Die Abgasgesetzgebung im Bundesstaat Kalifornien eilt mit verschärften Abgasgrenzwerten den anderen Staaten stets um ein paar Jahre voraus. Bundesstaaten, die besondere Probleme mit der Luftqualität haben, ziehen dann schnell mit. Derzeit wird in den USA der EPA-Test angewendet. Dabei handelt es sich um den seit 1975 üblichen FTP-75-Zyklus (Federal Test Procedure), der aus einem City-Test und einem Highway-Test besteht. Stufenweise wird ein separater Belastungstest und ein Test für Fahrzeuge mit Klimaanlage hinzugefügt (SFTP – Supplemental Federal Test Procedure). Weitere zusätzliche Tests werden für Hybridfahrzeuge, für CARB-OBDFahrzeuge und zur Messung der Verdunstungsemission durchgeführt.

Seit 2004 gelten nochmals verschärfte Abgasgrenzwerte. Zahlreiche zusätzliche Vorschriften werden stufenweise eingeführt und beziehen sich auf einen bestimmten Prozentsatz der Fahrzeugflotte eines Herstellers. Damit wird die amerikanische Abgasgesetzgebung teilweise undurchschaubar. Noch komplizierter wird der Sachverhalt durch die speziellen kalifornischen Regelungen. Dort treten zukünftig sechs Abgasstufen in Kraft, die zu späteren Zeitpunkten auch von anderen Bundesstaaten übernommen werden. Die US-Abgasgesetzgebung ist nicht einheitlich und durch verschiedene, sich teilweise zeitlich und inhaltlich überschneidende Bestimmungen gekennzeichnet. Eine Einheitlichkeit wie in Europa ist derzeit nicht absehbar.

So sollen z. B. die NO<sub>x</sub>-Grenzwerte für Ottomotoren auf 0,0125 g/km und HC auf 0,0062 g/km gesenkt werden. Bei Dieselmotoren werden Partikelgrenzwerte von 0,0025 g/km und NO<sub>x</sub> von 0,08 g/km gefordert. Nachfolgend sind die verschiedenen gängigen Abkürzungen der amerikanischen Abgasforderungen erläutert.

□ TLEV (Transient Low Emission Vehicles)  
*Zulassungsstufe für Fahrzeuge mit weniger als 0,125 g/mi \*) HC (g/mi = Gramm pro Miles).*

□ LEV (Low Emission Vehicles)  
*Zulassungsstufe für Fahrzeuge mit weniger als 0,075 g/mi HC.*

□ ULEV (Ultra Low Emission Vehicles)

*Zulassungsstufe für Fahrzeuge mit weniger als 0,04 g/mi HC.*

□ SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicles)

*Weitere Verschärfung der Zulassungsstufe ULEV. SULEV wird als Ersatz ZEV vom US-Gesetzgeber anerkannt.*

*Zulassungsstufe für Fahrzeuge mit weniger als 0,01 g/mi HC und 0,02 g/mi NO<sub>x</sub>*

□ EZEV (Equivalent Zero Emission Vehicles)

*Zulassungsstufe für Fahrzeuge, die fast keine Schadstoffe ausstoßen.*

*Die Fahrzeuge dürfen nicht mehr Schadstoffe produzieren als ZEV und der dazugehörige Energielieferant.*

□ ZEV (Zero Emission Vehicles)

*Zulassungsstufe für Fahrzeuge, die keine Schadstoffe ausstoßen.*

Immer mehr Fahrzeugmodelle eines Herstellers müssen die schärfer werdenden Abgasgrenzwerte einhalten. Sondervereinbarungen zwischen einzelnen Bundesstaaten und der Automobilindustrie machen die Situation in den USA sehr kompliziert. Dabei spielt auch die Anzahl der verkauften Fahrzeuge eine Rolle. Eine laufende Kontrolle der Fahrzeuge im Verkehr, wie die Kontrolle nach § 47a StVZO in Deutschland, gibt es in den USA nicht. Dort werden stichprobenartig Fahrzeuge aus dem Verkehr gezogen und untersucht. So wird beispielsweise die Gewährleistung zur Einhaltung der SULEV vom Gesetzgeber auf 150 000 Meilen oder 15 Jahre festgelegt.

Seit Modelljahr 1999 müssen durch Flottenbetreiber in 22 Städten, die besonders abgasbelastet sind (Ozon und Kohlenmonoxid), zunehmend Teile der angebotenen Fahrzeugflotte als so genannte Clean Fuel Vehicles eingesetzt werden. Der Anteil dieser Fahrzeuge musste von 30 % 1999 über 50 % 2000 auf 70 % 2001 steigen. Seit Modelljahr 2003 müssen in Kalifornien 10 % der verkauften Fahrzeuge eines Herstellers oder Importeurs ZEV-Fahrzeuge sein.

### **Abgasgesetzgebung in Japan**

Abgasgrenzwerte, die einen Katalysator erfordern, gibt es seit 1978 in Japan. Sie entsprechen den derzeitigen Grenzwerten in Europa und den USA. Eine drastische Verschärfung auf den 2000er-Standard wurde am 01.09.2002 für Neuzulassungen festgesetzt. In Vorbereitung ist ein neuer Standard, der noch genau definiert werden muss. Für Dieselfahrzeuge gelten seit 01.09.2004 verschärfte Grenzwerte. Die nächste Verschärfung der Grenzwerte erfolgt 2007 und 2009. Der Nachweis der Dauerhaltbarkeit der Systeme wird für 80 000 km gefordert. Gemessen wird nach verschiedenen Testzyklen, von denen der so genannte 10+15-Modus (Heißstart) und der 11-Modus (Kaltstart) wichtig sind. Zusätzlich werden verschiedene Rauchgastests durchgeführt. Der 10+15-Modus ist ein Fahrzyklus, der dem europäischen Fahrzyklus ähnlich ist, aber entsprechend den japanischen Fahrgewohnheiten mit geringeren Höchstgeschwindigkeiten (maximal 70 km/h) abläuft. Für bestimmte Ballungsgebiete wie Tokio oder Osaka müssen zusätzlich verschärfte NO<sub>x</sub>-Grenzwerte nach einem speziellen NO<sub>x</sub>-Kontroll-Gesetz erfüllt werden.

### Abgasgesetzgebung in den übrigen Staaten der Welt

Die meisten anderen Staaten der Welt lehnen sich in ihrer nationalen Abgasgesetzgebung an die Normen der USA, Europas oder Japans an. So gelten in Australien und Neuseeland die EURO-Normen mit fast identischen Einführungsterminen. Einige Staaten erkennen die Zertifikate nach den Vorschriften dieser Länder direkt an. Das hängt von den wirtschaftlichen und politischen Beziehungen zu den jeweiligen Märkten ab. Auffällige Ausnahmen bilden z. B. Saudi-Arabien und China. Dort gelten teilweise noch Grenzwerte aus der Vor-Katalysator-Zeit oder der EURO 2. Nur dort, wo die Schadstoffemission am größten ist (z. B. Peking oder Shanghai), werden zeitnah verschärfte Abgasnormen eingeführt. Ab 2007 soll die EURO 3 und ab 2010 die EURO 4 in China wirksam werden. Für Fahrzeuge mit Ottomotor wird dann auch die OBD gefordert. Diese Normen fordern dann eine Katalysatorpflicht. Da damit bleifreier Kraftstoff notwendig wird, muss die Infrastruktur des Landes entsprechend angepasst werden. Ab 2010 sollen die EURO 4 und auch die OBD für Dieselfahrzeuge Pflicht werden.

Brasilien lehnt sich stark an die US-Vorschriften an. Brasilien ist allerdings derzeit das einzige Land, in dem Dieselfahrzeuge, ausgenommen Geländefahrzeuge, mit weniger als 1000 kg Nutzlast (z. B. Diesel-Pkw) generell keine Zulassung erhalten.

In Russland ist geplant, ab 2008 die EURO 3 und ab 2010 die EURO 4 für Neufahrzeuge einführen. Selbst Länder wie Vietnam oder Thailand führen in den nächsten Jahren international anerkannte Abgasnormen für Neufahrzeuge ein. Das zeigt, dass die Schadstoffproblematik der Fahrzeuge nicht mehr allein ein nationales Anliegen der Industrieländer ist. Die Luftverschmutzung durch Autoabgase wird zunehmend als globales Problem erkannt, und es werden gemeinsam Strategien zur Schad-

Tabelle 2.1 Internationale Termine zur Einführung von Abgasnormen (Auszug)

Land/Region	Termin	Bemerkung
China allgemein	01.07.07	EURO 3 OBD Benzin/EURO 3 o. OBD Diesel
	01.10.10	EURO 4 inkl. OBD (Dauerhaltbarkeit 80 000 km)
nur Peking	01.07.08	EURO 4 inkl. OBD für alle Fahrzeuge
Argentinien	01.01.06	EURO 3
Südkorea	01.01.2006	Otto FTP 75/Diesel EURO 4
Indien	01.04.2005	EURO 2/ab 2010 EURO 3 und EURO 4 in Metropolen
Australien	01.01.2006	EURO 4
Russland	01.01.2008	EURO 3/01.01.2010 EURO 4 (Entwurf)
Türkei		EURO 1 Diesel und EURO 3 ohne OBD Benzin
Saudi-Arabien		EURO 1 und EURO 2
Bulgarien	01.01.2004	EURO 3
Mexiko	seit 2003	FTP 75/2006–2009 EURO 4 oder US Tier 2
Brasilien	01.01.2007	FTP 75 und OBD-Forderungen
EU-Beitrittsländer	01.01.2006	EURO 4

Tabelle 2.2 Beispiele für den weltweiten Schwefelgehalt im Dieselkraftstoff

Land/Region	Schwefelgehalt [ppm]	Bemerkung
EU	50	seit 01.01.2005 (kleiner 10 ppm spätestens ab 01.01.2009)
USA	15	ab 01.09.2006 (für 20 % des Dieselkraftstoffes bis 2010 noch 500 ppm zulässig)
Japan	50	ab 01.01.2005 (2005–2008 max. 10 ppm)
Australien	50	seit 01.01.2006 gültig
Südkorea	50	Entwurf ab 2006 maximal 30 ppm
Indien	500	4 Metropolen 350 ppm (ab 2010 50 ppm)
China	2000	Aa 01.07.2005 in Peking 350 ppm
Russland	2000–5000	an internationalen Straßen 350–500 ppm (ab 2010 sind 10 ppm geplant)
Kroatien	350	auch in Bosnien, Bulgarien, Rumänien
Türkei	7 000	Derzeit sind keine Verringerungen oder Veränderungen bekannt oder geplant.
Afrika allgemein	10 000	
Ägypten	12 000	
Mittlerer Osten	5000–12 000	
Mazedonien	5000	

stoffminderung umgesetzt. Dabei nutzen viele Länder die guten Erfahrungen der führenden Automobilhersteller aus Europa, Japan oder den USA.

In Tabelle 2.1 sind einige Termine zur Einführung von schärferen Abgasnormen in ausgewählten Ländern zusammen gestellt.

Tabelle 2.2 zeigt den Schwefelgehalt in Diesel-Kraftstoff in einigen Ländern.

### Schwefelgehalt im Kraftstoff

Ein großes Problem zur weltweiten Einhaltung der geforderten Normen ist die Bereitstellung von qualitativ hochwertigen Kraftstoffen. Besonders der Schwefelgehalt der Kraftstoffe spielt dabei eine große Rolle. Ohne schwefelarmen Kraftstoff können neue Abgasreinigungssysteme nicht wirkungsvoll funktionieren oder die geforderten Langzeitstabilitäten und Zuverlässigkeiten erreichen. Während in Europa, Australien und Japan der Schwefelgehalt maximal 50 ppm oder weniger betragen darf, werden in anderen Ländern wie z. B. Ägypten oder Marokko bis zu 12 000 ppm erreicht. In den meisten Nicht-EU-Staaten Europas liegt der Schwefelgehalt bei 350 bis 500 ppm. In der Türkei sind es bis zu 7000 ppm. Viele Länder planen für den Zeitraum 2007 bis 2009, den Schwefelgehalt der Kraftstoffe auf maximal 50 ppm oder weniger (10...15 ppm) zu begrenzen. Probleme entstehen dann, wenn mit Fahrzeugen mit modernster Abgasreinigungstechnik in solche Länder gefahren wird, in denen ein sehr hoher Schwefelgehalt im Kraftstoff vorhanden ist. Eine Verringerung der Schadstoffkonvertierung oder sogar ein Ausfall der Systeme ist möglich.

## 2.2 Die europäischen Abgasnormen

Die Bilder 2.1 und 2.2 zeigen die grundsätzliche Entwicklungstendenz der Pkw-Abgasgrenzwerte für Ottomotoren und Dieselmotoren in den vergangenen und künftigen Jahren in Europa. Eine eigene deutsche Norm (D3 oder D4) gibt es nicht mehr. Die zunehmende Verschärfung der vom Gesetzgeber vorgegebenen Abgasgrenzwerte macht die Bedeutung der Einführung der OBD und der Abgasuntersuchungspflicht für Fahrzeuge deutlich. Die Grenzwerte gelten für Fahrzeuge mit Otto- oder Dieselmotor, maximal sechs Sitzplätzen und einem zulässigen Gesamtgewicht bis 2500 kg.

Mit der 22. Verordnung zur Durchführung des Bundesemissionsschutzgesetzes vom 11.09.2002 hat Deutschland die Umsetzung der europäischen Richtlinie über die Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickoxide, Partikel und Blei in der Luft geregelt. Seit dem 01. Januar 2005 gilt ortsunabhängig ein Immissionsgrenzwert für Partikel  $PM_{10}$  von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  Luft als 24-Stunden Mittelwert. Der Wert darf im Kalenderjahr maximal 35-mal überschritten werden. Der Jahresdurchschnittswert darf bei  $PM_{10}$  den Wert von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht überschreiten.

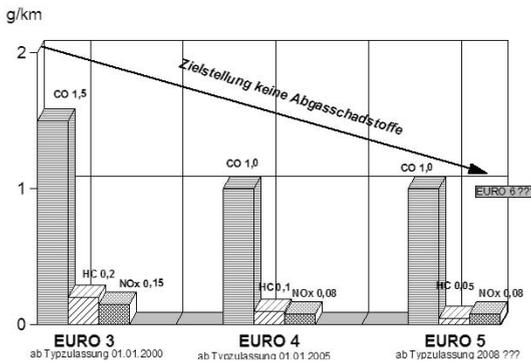


Bild 2.1  
Abgasgrenzwerte für Pkw mit Ottomotor

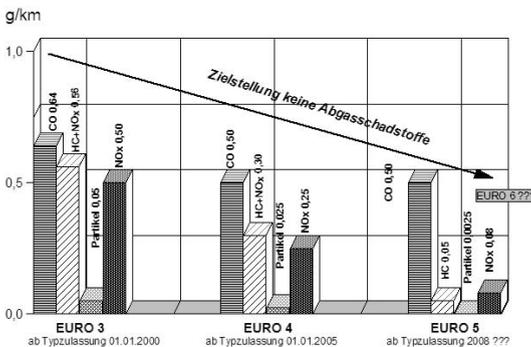


Bild 2.2  
Abgasgrenzwerte für Pkw mit Dieselmotor

Untersuchungen der Automobilindustrie haben ergeben, dass der Anteil der Diesel-Pkw-Emissionen an der gesamten Feinstaubbelastung bei etwa 5 Prozent liegt. Hochrechnungen gehen davon aus, dass mögliche drohende Fahrverbote keine spürbaren Entlastungen der Feinstaubimmissionen bringen werden.

In den Tabellen 2.3 bis 2.6 sind die in EU-Richtlinien festgelegten Abgasgrenzwerte für Pkw, leichte Nfz und schwere Nfz dargestellt. Die Abgasgrenzwerte für EURO 5 und EURO 6 sind noch keine beschlossenen Grenzwerte. Es sind die derzeit realistischen Vorschläge für die künftigen Abgasgrenzwerte. In Tabelle 2.5 ist der aktuelle EU-Vorschlag vom 15.07.2005 dargestellt, der bei Annahme durch das europäische Parlament mit einer Übergangsfrist von 18 Monaten für Neuwagen umgesetzt werden soll. Es ist davon auszugehen, dass die gesetzlich festgelegten Abgasgrenzwerte in den angegebenen Bereichen liegen werden. Dabei ist eher eine Unterschreitung als eine Überschreitung der dargestellten Grenzwerte zu erwarten. Bei den Normen für Dieselmotoren werden die zulässigen Partikelgrenzwerte fast unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze heutiger Analysetechniken liegen. Neue Messverfahren für die Abgasanalyse zur Typprüfung der Fahrzeuge werden notwendig werden. Auch die Stickoxide werden drastisch gesenkt. Ohne den Einbau sehr teurer Speicherkatalysatoren oder SCR-Katalysatoren und Partikelfiltersystemen sind die Grenzwerte nicht einzuhalten. Die Fahrzeuge werden deutlich teurer. Mehrkosten von ca. 2000 € bei Dieselfahrzeugen sind im Gespräch, wodurch die Kundenakzeptanz für die erfolgreichen und verbrauchsarmen Dieselfahrzeuge erheblich sinken kann.

Teilweise stehen die technischen Maßnahmen zur Senkung von Partikelemission und Stickoxidemission in einem komplizierten Zielkonflikt zwischen technisch Notwendigem und ökonomisch Sinnvollem. Spätestens bei der Einführung der EURO 6 ist davon auszugehen, dass bei den Abgasgrenzwerten für Pkw keine Unterscheidung mehr nach der Antriebsart Ottomotor oder Dieselmotor erfolgt. Es wird nur noch eine Pkw-Abgasnorm geben.

Mit der Umsetzung der europäischen Richtlinien wurden gleichzeitig verbindliche Festlegungen für die Kraftstoffqualität, besonders den Blei- und Schwefelgehalt der Kraftstoffe, getroffen und in die DIN EN 228 für Ottokraftstoffe und die DIN EN 590 für Dieseldieselkraftstoffe übernommen.

Ergänzend zu den für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge gültigen Abgasvorschriften hat die EU für schwere Nfz ebenfalls entsprechende Verschärfungen der Abgasgrenzwerte eingeführt. Hierzu hat die EU bereits im Februar 2000 die Richtlinie 1999/96/EG veröffentlicht. Diese sieht für schwere Nutzfahrzeuge auf Basis der Grundrichtlinie 88/77/EG in der Fassung 96/1/EG (EURO 2) eine Verschärfung in 3 Stufen vor. Weiterhin wird durch diese Richtlinie ab dem Jahr 2005 (EURO 4) auch für schwere Nutzfahrzeuge eine OBD gefordert.

Tabelle 2.3 EURO 3 (EU-Richtlinie 98/69/EG)

ab	Fahrzeugklasse/-gruppe		Bezugs- masse RW (kg)	CO (g/km)		HC (g/km)		NO <sub>x</sub> (g/km)		HC + NO <sub>x</sub> (g/km)		PM (g/km)
	Klasse	Gruppe		Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	
01.01.00	Pkw		alle	2,3	0,64	0,20	-	0,15	0,50	-	0,56	0,05
01.01.00	leichte Nfz	I	RW<1305	2,3	0,64	0,20	-	0,15	0,50	-	0,56	0,05
01.01.01		II	1305<RW- <1760	4,17	0,80	0,25	-	0,18	0,65	-	0,72	0,07
		III	1760<RW	5,22	0,95	0,29	-	0,21	0,78	-	0,86	0,10

Tabelle 2.4 EURO 4 (EU-Richtlinie 98/69/EG)

ab	Fahrzeugklasse/-gruppe		Bezugs- masse RW (kg)	CO (g/km)		HC (g/km)		NO <sub>x</sub> (g/km)		HC + NO <sub>x</sub> (g/km)		PM (g/km)
	Klasse	Gruppe		Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	
01.01.05	Pkw		alle	1,0	0,50	0,10	-	0,08	0,25	-	0,30	0,025
01.01.05	leichte Nfz	I	RW<1305	1,0	0,50	0,10	-	0,08	0,25	-	0,30	0,025
01.01.06		II	1305<RW- <1760	1,81	0,63	0,13	-	0,10	0,33	-	0,39	0,04
		III	1760<RW	2,27	0,74	0,16	-	0,11	0,39	-	0,46	0,06

Tabelle 2.5

ab	Fahrzeugklasse/- gruppe		Bezugs- masse RW (kg)	CO (g/km)		HC (g/km)		NO <sub>x</sub> (g/km)		HC + NO <sub>x</sub> (g/km)	PM (g/km)	
	Klasse	Gruppe		Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel		BDE	Diesel
01.01.08	Pkw		alle	1,0	0,50	0,075	-	0,06	0,20	0,250	0,005	0,005
01.01.08	leichte Nfz	I	RW<1305	1,0	0,50	0,075	-	0,06	0,20	0,250	0,005	0,005
			1305<RW- <1760	1,81	0,63	0,10	-	0,075	0,26	0,320	0,005	0,008
		III	1760<RW	2,27	0,74	0,12	-	0,082	0,31	0,380	0,005	0,012

Tabelle 2.6 Abgasgrenzwerte für schwere Nfz und Busse (Grenzwerte für die Serienproduktion)

	EURO 0	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4/5	EURO 6
	88/77/EWG	91/542/EWG	1999/96/EG			gegenwärtiger Vorschlag
	seit 88/90	ab 92/93	ab 95/96	ab 2000	ab 2005/2006 bzw. 2008/2009	ab 2010
		1. Stufe	2. Stufe	ESC-ELR-Test 1)	ETC-Test 2) 3)	ESC-ELR-Test
g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
CO	12,30	4,9	4,0	2,1	5,45	4,00
HC	2,60	1,23	1,10	0,66	–	–
NMHC	–	–	–	–	0,78	–
Methan	–	–	–	–	1,60 <sup>4)</sup>	–
NOx	15,80	9,00	7,0	5,0	2,5/2,0 <sup>*</sup> )	3,5/2,0 <sup>*</sup> )
Partikel	–	0,40	0,15	0,10	0,16 <sup>5)</sup>	0,03 <sup>5)</sup>
Ruß	–	–	–	0,8 m <sup>-1</sup>	–	0,5 m <sup>-1</sup>

1) geändertes/verschärftes Prüfverfahren für alle Dieselmotoren

2) zusätzlicher Transienten-Test für Dieselmotoren mit Abgasnachbehandlungssystem

3) für Gasmotoren nur Transienten-Test

4) nur für Erdgasmotoren

5) nur für Dieselmotoren

\*) Bei EURO 5 (ab 2008/09) wird nur der NO<sub>x</sub>-Grenzwert von 3,5 auf 2,0 g/km herabgesetzt

Partikelgrenzwerte massenbezogen

ESC = European Stationary Cycle (stationärer Test)

ETC = European Transient Cycle (dynamischer Test)

ELR = European Load Response Test (wird künftig entfallen, da nur dynamische Ergänzung zum stationären ESC)