



Modul Verbrennungsmotoren IV

Abgasmesstechnik für Verbrennungsmotoren

Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz

Dr.-Ing. Volker Wichmann

Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren
Universität Rostock



1. Einleitung und Zielstellung der Abgasmessungen
2. Messwert und Messverfahren
3. Kohlenwasserstoffe (THC)
4. Stickoxide (NO_2 , NO , N_2O)
5. Kohlenstoffoxide CO und CO_2
6. Restsauerstoff O_2
7. FTIR Messverfahren für Forschungszwecke
8. Abgasmessungen nicht gasförmiger Abgasbestandteile
 - 8.1 Partikel
 - 8.2 Rauchmessung – Lichtreflexionsverfahren (FSN)
 - 8.3 Trübungsmessung – Lichtabsorptions Opazimeter
 - 8.4 Partikel
 - 8.5 Staub (TA Luft)
 - 8.6 NH_3
 - 8.7 Partikelanzahl und Partikelkonzentration
9. Messvorschriften Motoren, ohne PKW und LKW Anwendung
10. Messvorschriften PKW-Motoren
11. Messvorschriften LKW-Motoren



1. Einleitung und Zielstellung der Abgasmessungen

**Um etwas zu verändern
sollte man es messen (erfassen) können**

Zur Beurteilung eines Messwertes

- Kenntnisse des Messverfahrens notwendig
- Angabe des Messverfahrens (Norm) notwendig

Für gleiche Messgröße kann es verschiedene Verfahren geben

- Ergebnisse nur sehr bedingt vergleichbar

Mit der Verschärfung der Abgasgrenzwerte

- Bedarf an Messverfahren für geringste Schadstoffmengen
- deutlich steigende Kosten
- daher das Ziel: weltweit gleiche Messmethoden



2. Messwert und Messverfahren

Jede Messung bedarf einer Messvorschrift !

Diese beschreibt :

- die notwendigen Geräte und Einrichtungen
- die notwendige Kalibrierung der Geräte und Einrichtungen
- den Messablauf
- die Darstellung des Ergebnisses



2. Messwert und Messverfahrensdefinition

Allgemeine Definition für Messung gasförmiger Emissionen

Justierung mit Gas

- z.B. die geeignete Zufuhr von Null- und Kalibriergasen und die Eingabe der Konzentrationen der Gasbestandteile am Analysegerät. Die Justierung kann automatisch oder durch den Benutzer erfolgen.

Nullgas

- Besteht aus synthetischer Luft mit typischerweise 791 mmol/mol Stickstoff (N_2) und 209 mmol/mol Sauerstoff (O_2) oder aus gleichwertig aufbereiteter Umgebungsluft.

Kalibriergas

- Stabiles Gasgemisch oder ein Satz stabiler Gasgemische zertifizierter Konzentration. Es wird für die Justierung und Kalibrierung von Geräten sowie für Funktionsprüfungen verwendet.

Querempfindlichkeit (Selektivität)

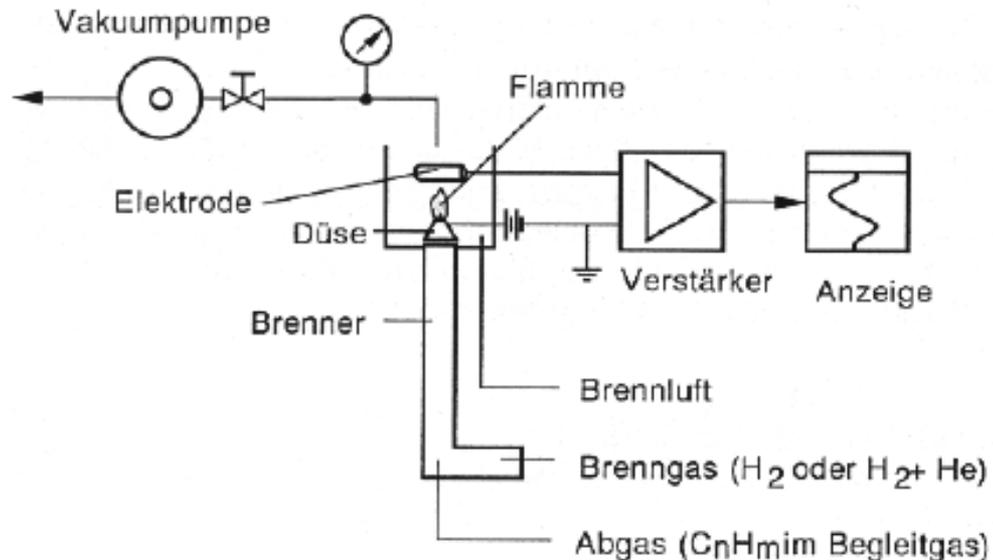
- Beeinflussung der Messung von Gaskomponenten durch Störgase. Maßnahmen gegen die Querempfindlichkeit können eine Abminderung der Messempfindlichkeit verursachen.



3. Kohlenwasserstoffmessung (THC)

Messung mittels Flammenionisationsdetektor (FID)

- Kohlenwasserstoffmoleküle werden in einer Wasserstoffflamme ionisiert
- Anzahl der Ionen entspricht der Anzahl der C-Atome in den HC-Molekülen
- Messgröße ist der sich ergebende Ionenstrom
- An Sauerstoff gebundene Kohlenstoffe werden nicht erfasst (CO ; CO_2)



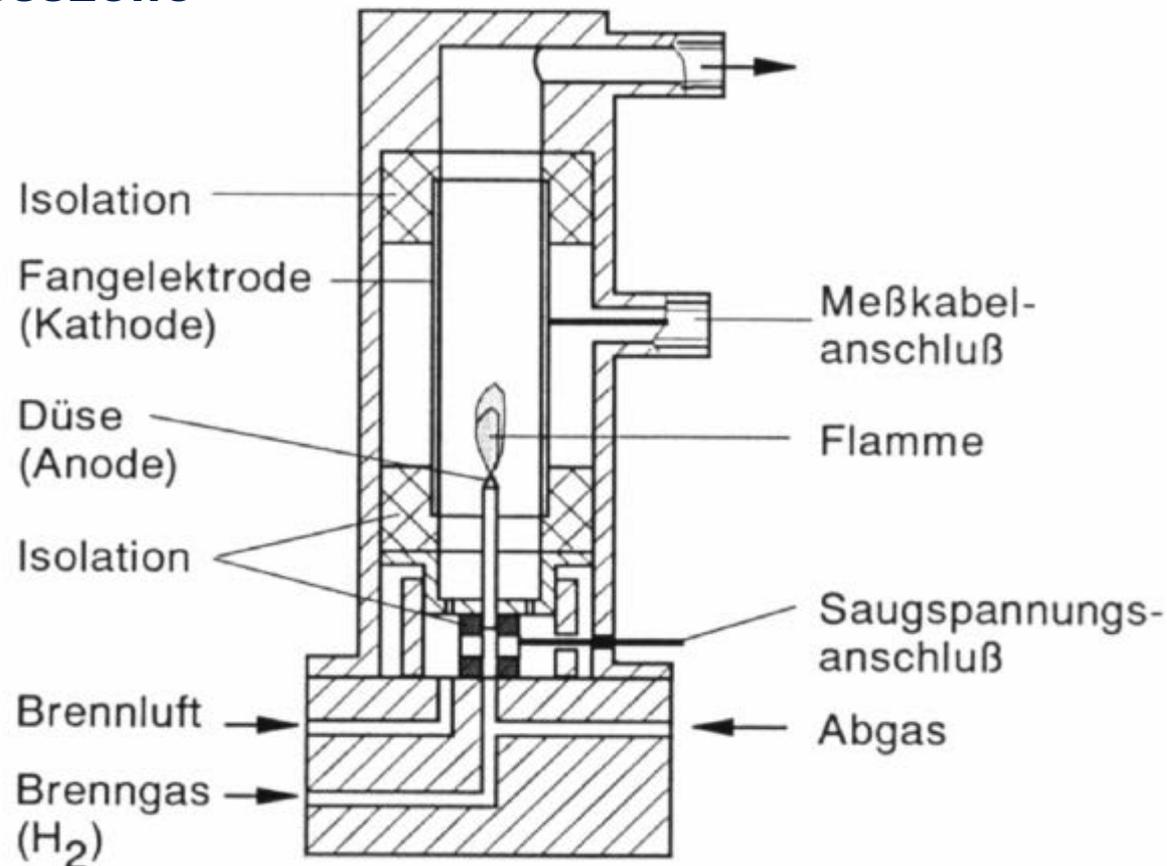


3. Kohlenwasserstoffmessung (THC)

Die Kohlenwasserstoffe (HC) im Abgas lassen sich mit Hilfe eines Flammenionisationsdetektors (FID) bestimmen. Dabei wird die Summe aller Kohlenwasserstoffe abhängig von den im Abgas enthaltenen Kohlenstoffatomen berechnet. Einer kontinuierlichen Diffusionsflamme aus externer Brennluft (O_2) und Brenngas (H_2) wird das zu analysierende Abgas beigemischt. Die Flamme brennt zwischen zwei Elektroden, an denen eine Spannung anliegt. Der durch die Flamme ionisierende Kohlenwasserstoffanteil des Abgases wird durch die angelegte Spannung von der Katode angezogen, und sorgt so für einen Ladungstransport. Der daraus resultierende, messbare Strom ist proportional zum Kohlenstoffgehalt des Abgases welches zum Brenner geführt wurde. Unter Voraussetzung konstanter Volumenströme von Brennluft, Brenngas und Abgas ist der gemessene Strom den C-Gehalt im Abgas direkt proportional. Eine Unterscheidung einzelner HC-Verbindungen ist nicht möglich, da nur die Konzentration der Summe aller im Abgas enthaltener Kohlenwasserstoffe bestimmt wird.

3. Kohlenwasserstoffmessung (THC)

Aufbau der Messzelle





3. Kohlenwasserstoffmessung (THC)

Ablauf

Kalibrierung – FID

Nullpunktkalibrierung



Synthetische Luft

Endpunktkalibrierung



Propan C_3H_8 in synthetischer Luft

Brenngas



Wasserstoff oder Gemisch aus Wasserstoff/Helium

Verbrennungsluft



Kohlenstofffreie Luft aus Gasflasche oder
gereinigte Umgebungsluft



4. Stickoxidmessung

● Messungsprinzip mit Chemolumineszenzdetektor (CLD)

- Messprinzip basiert auf der Spontanreaktion zwischen Stickstoffmonoxid und Ozon

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 + 205 \text{ kJ/mol}$$
- Etwa 10% des so gebildeten NO_2 befinden sich nach der Reaktion in einem angeregten Elektronenzustand
- Diese angeregten NO_2 Moleküle geben ihren Energieüberschuss spontan als Lichtquanten in Form von Fluoreszenzstrahlung ab und fallen in den energieärmeren Grundzustand zurück

$$NO_2 \rightarrow NO + h\nu$$
- Über eine Messkapillare wird der Mess-Gasstrom konstant gehalten, um eine der NO-Konzentration proportionale Lichtausbeute zu erhalten
- Zur Messung von NO_x muss das Messgas vorher über einen $NO_2 \rightarrow NO$ Konverter geführt werden

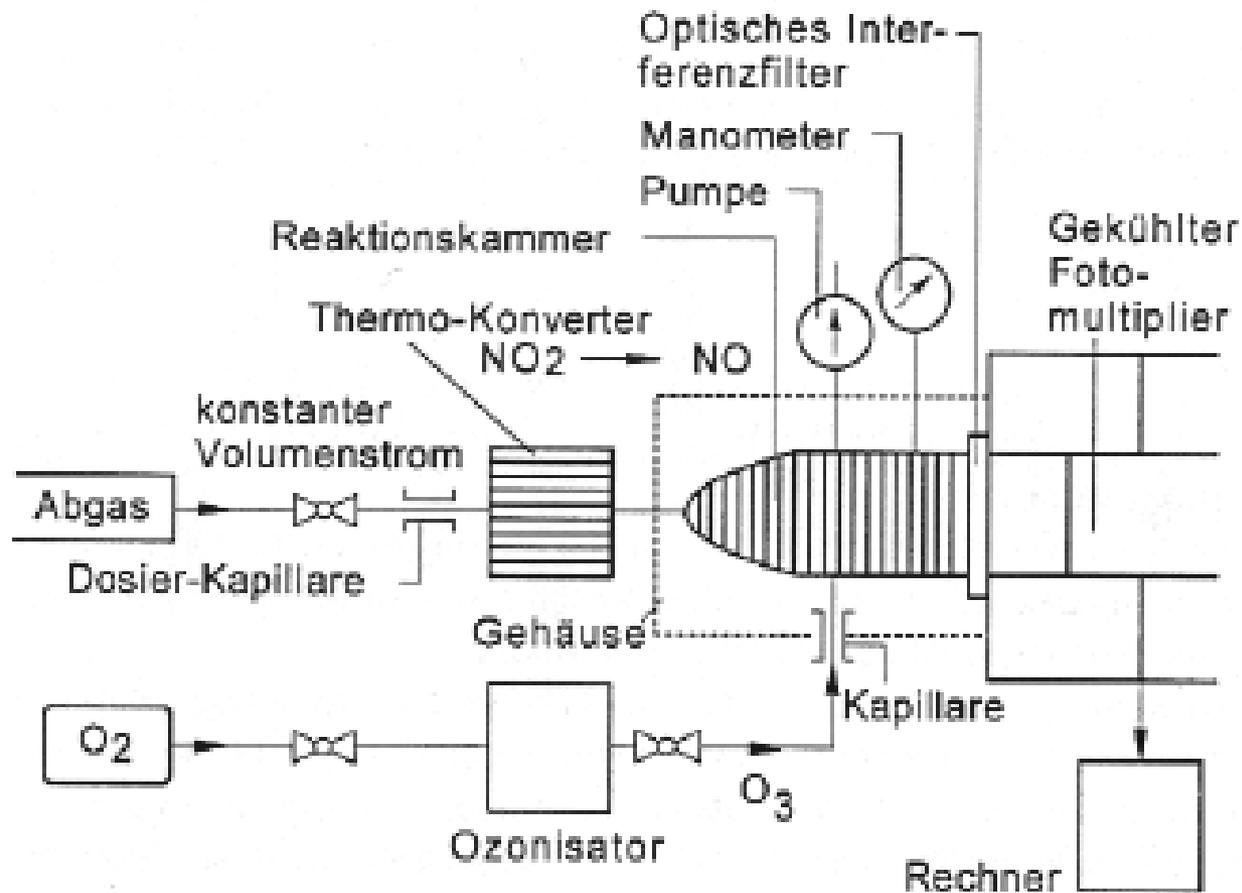


4. Stickoxidmessung

Randbedingungen Chemolumineszenzdetektor (CLD)

- Die Gasprobe strömt über einen Druckregler, einen Partikelfilter sowie durch eine Dosier-Kapillare und den Konverter in die Reaktionskammer
- Aus der Umgebungsluft wird der Ozonisator versorgt, der Ozon aus Sauerstoff erzeugt und der ebenfalls in die Messkammer führt
- Die in der Reaktionskammer entstehende Strahlung gelangt durch ein schmalbändiges optisches Interferenzfilter auf einen Fotomultiplier, dessen Ausgangssignal verarbeitet werden kann
- Um bei niedrigen Konzentrationen den Signal-Rauschabstand anzuheben, wird der Absolutdruck in der Reaktionskammer auf 10 mbar abgesenkt
- Nach Verlassen der Messkammer passiert das Abgas eine Ozonfalle damit kein Ozon in die Umgebung gelangt

4. Stickoxidmessung





4. Stickoxidmessung

Ablauf

Nullpunktkalibrierung



Stickstoff (N_2)

Endpunktkalibrierung



Stickstoffmonoxid (NO) in Stickstoff (N_2)

Kontrollmessung

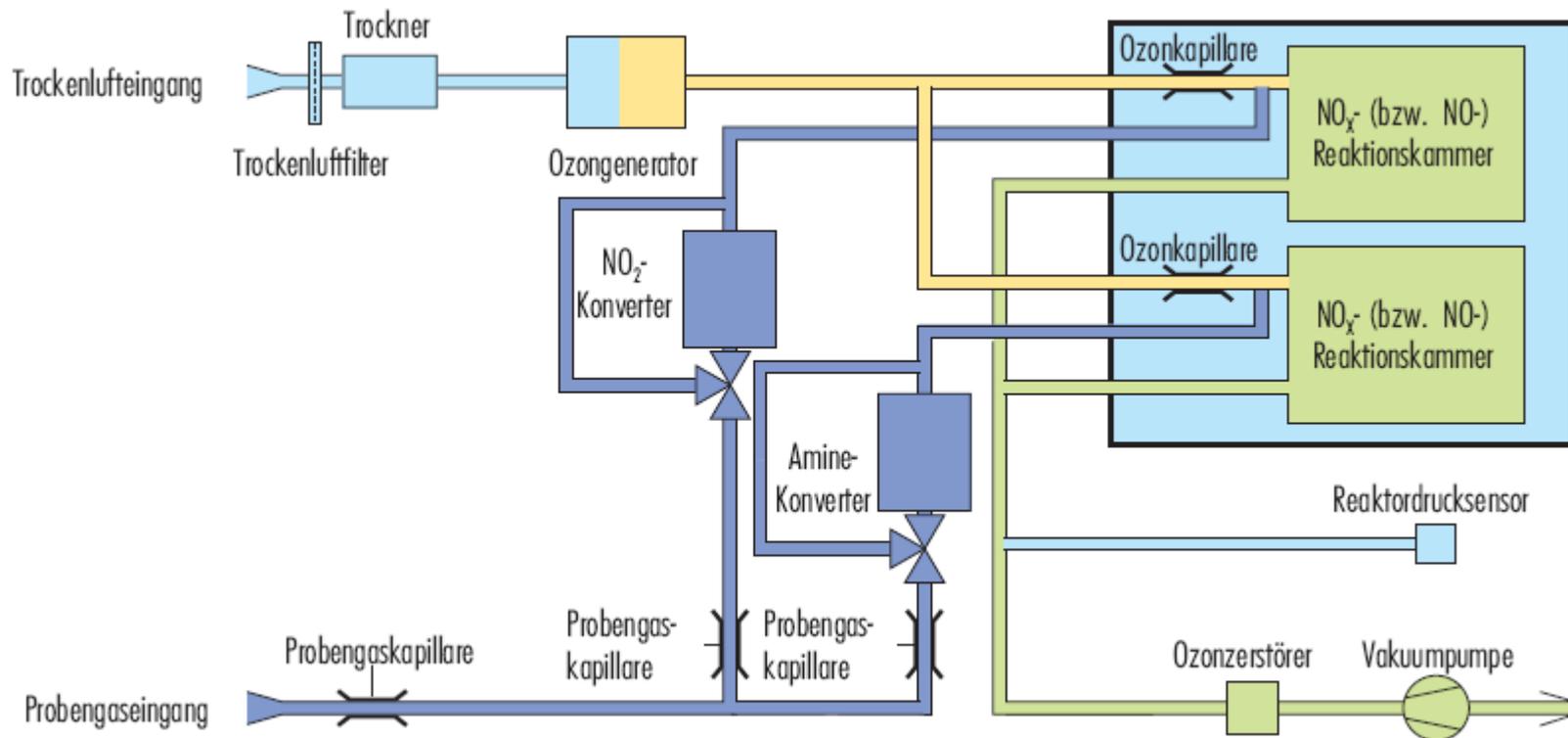


Stickstoffdioxid wird in synthetischer Luft (NO_2/SL) über den Analysator geführt:

- Bei Messung auf NO darf ohne Konvertierung keine Anzeige erfolgen
- Bei der Messung auf NO_x wird der NO_2 Wert angezeigt

4. Stickoxidmessung

Messung von NO , NO_2 , NO_x durch 2 Linien



Quelle: ECO-Physiks CLD 844 CM



5. Messung von CO und CO₂

Messung mit Nichtdispersivem Infrarot-Analysator (NDIR)

Grundlagen

- Nicht dispersiv = nicht spektral auflösend
- Messverfahren nutzt die Eigenschaft mehratomiger, nichtelementarer Gase, Strahlung im infraroten Spektralbereich (2,5 – 12 mm) zu absorbieren
- Absorption wird in einer Wechselsicht-Photometer-Anordnung mit zwei parallelen Strahlgängen und einem selektiv mitwirkenden, gasgefüllten Strahlungsempfänger gemessen

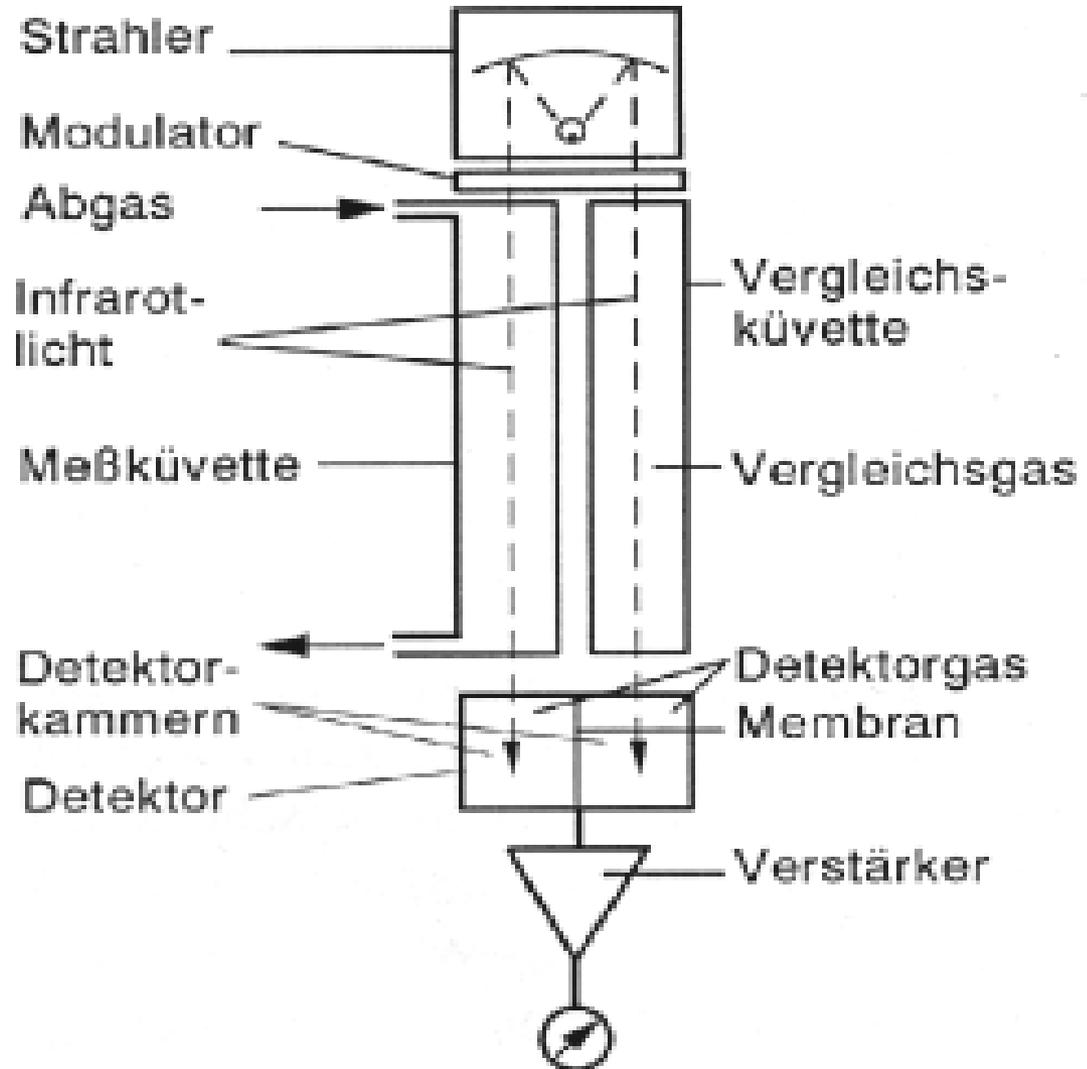


5. Messung von CO und CO₂

Messprinzip – Nichtdispertiver Infrarot-Analysator (NDIR)

- Der von der NDIR-Lichtquelle emittierte Lichtstrahl wird geteilt und durch eine Mess- und eine Vergleichszelle geleitet
- Die Messkammer ist vom Abgas durchflossen
- Die Vergleichszelle ist mit einem Gas gefüllt, das die Strahlung im interessierenden Spektralbereich nicht absorbiert (z.B. N₂)
- Das Licht durchläuft beide Zellen und fällt auf den Detektor
- Die Detektorkammern sind mit jenem Gas gefüllt, das gemessen werden soll (CO, CO₂)
- In den Messzellen wird Strahlung (Wärme) entsprechend der Konzentration absorbiert
- Die beiden (geschlossenen) Messkammern erwärmen sich unterschiedlich
- Der Druckunterschied zwischen den beiden Kammern wird als Maß für die Konzentration des Messgases gemessen

5. Messung von CO und CO₂





5. Messung von CO und CO₂

Messablauf

Nullpunktkalibrierung



Stickstoff (N₂)

Endpunktkalibrierung



CO ; CO₂ in Stickstoff (N₂)

Kontrollmessung



CO ; CO₂ in Stickstoff (N₂) nach Messende



6. Sauerstoffmessung

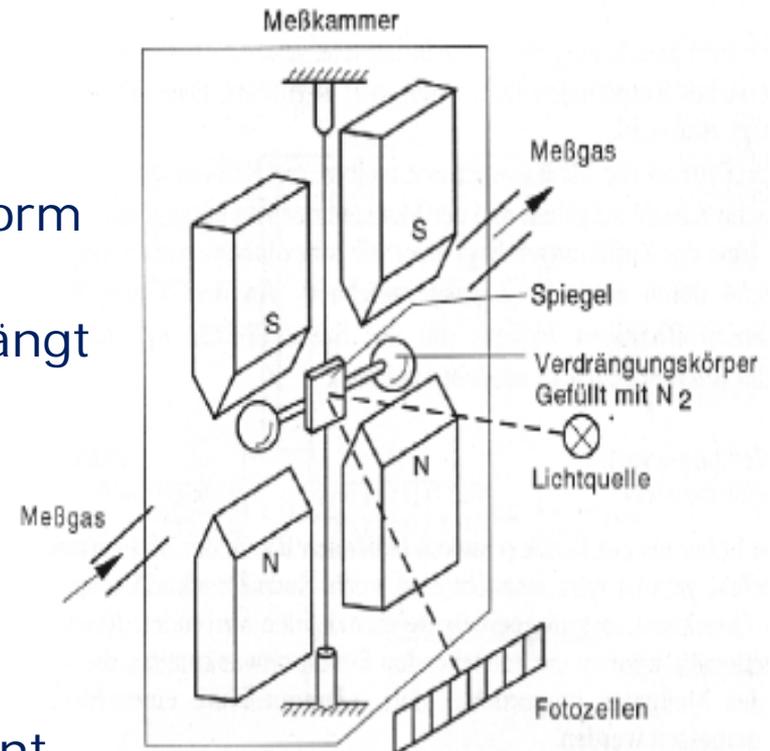
Messung mit paramagnetischem Sauerstoffanalysator

- Messprinzip nutzt das paramagnetische Verhalten von Sauerstoff
- Sauerstoffmoleküle werden von einem Magnetfeld angezogen
- Aber auch NO und NO₂ sind paramagnetische Gase (Querempfindlichkeit)
- Häufige Messverfahren sind
 - Magnetomechanische Drehwaage
 - Magnetopneumatisches Druckdifferenzverfahren

6. Sauerstoffmessung

Messprinzip – paramagnetischer Sauerstoffanalysator

- Zwei Permanentmagnete erzeugen ein inhomogenes Magnetfeld
- Zweiteiliger Verdrängungskörper aus diamagnetischem Material in Form einer Hantel
- Der Drehkörper ist drehbar aufgehängt
- Messgas wird in das Magnetfeld gezogen
- Lokale Verdichtung des Gases drängt die Verdrängungskörper aus dem Feld heraus
- Auf die Hantel wirkt ein Drehmoment
- Messung der Auslenkung der Waage z.B. mit Hilfe eines Lichtstrahls gemessen





6. Messung von Sauerstoff

Messablauf

Nullpunktkalibrierung



Stickstoff (N_2)

Endpunktkalibrierung



20 % Sauerstoff in Stickstoff (N_2)

Kontrollmessung



20 % Sauerstoff in Stickstoff (N_2)



7. SESAM-FTIR optische Abgasmesstechnik

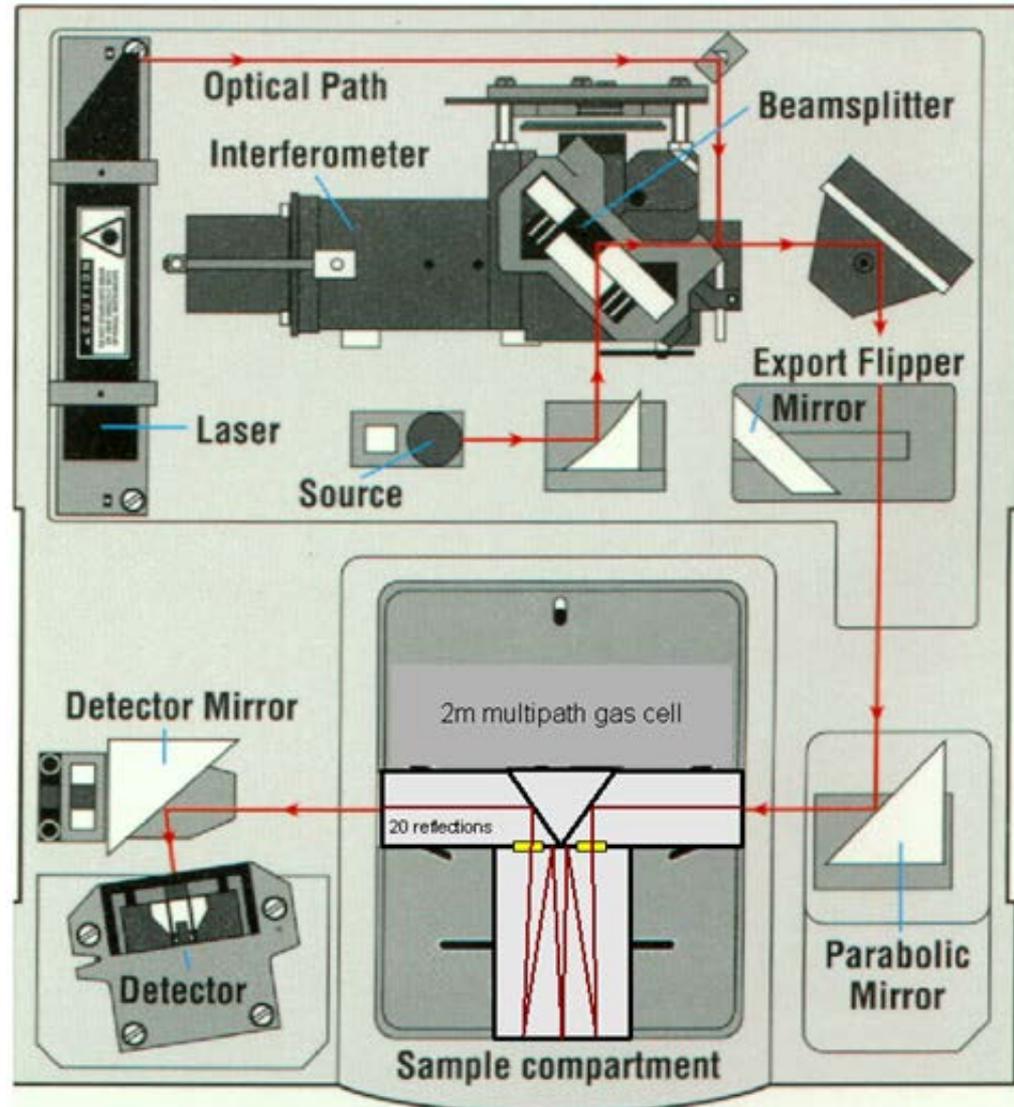
SESAM-FTIR arbeiten nach dem Prinzip der Fourier-Transformations-Infrarot- Spektroskopie.

Dieses beruht auf der Teilung eines Infrarotstrahls.

Messung von

- CO, CO₂,
- NO, NO₂, Addition ergibt NO_x,
- H₂O, CH₄, SO₂, N₂O, NH₃, COS, C₂H₂, N-Pentan,
- aromatische - HC, C₃H₆, CH₂O, C₂H₄,
- Iso-Pentan, C₂H₆, C₄H₆,
- Summe der HC durch gewichtet Addition der HC
- **Sauerstoff kann nicht gemessen werden (Wasserspektrum)**

7. SESAM-FTIR optische Abgasmesstechnik





SESAM-FTIR arbeiten nach dem Prinzip der Fourier-Transformations-Infrarot- Spektroskopie. Dieses beruht auf der Teilung eines Infrarotstrahls. Der Strahl wird durch einen Strahlteiler in zwei Teilstrahle aufgeteilt. Beide Strahlen treffen auf zwei senkrecht zueinander angeordnete Spiegel, von denen einer fest installiert, der andere auf einer Achse verschiebbar ist. Nachdem die geteilte Strahlung durch die Spiegel reflektiert wird, wird sie mittels des Strahlteilers wieder zusammengeführt. Nun läuft der Strahl durch die Messgaskammer, in der der Strahlenweg durch Mehrfachreflexion verlängert wird. Abhängig von der Gaszusammensetzung in der Messgaskammer verliert der Strahl in Teilen seines Wellenlängenbereichs an Intensität und trifft dann auf einen Detektor. Durch das Hin- und Herbewegen des beweglichen Spiegels wird am Detektor ein Interferogramm erzeugt, welches ein Strahlungsspektrum in Abhängigkeit von der Wellenlänge darstellt. Mittels eines Computers und vor der Messung angefertigten Referenzmessungen mit den zu bestimmenden Gasen in Reinform können nun über die spezifischen **Strahlungsabsorptionseigenschaften der Einzelgase** die Konzentrationen der einzelnen Abgasbestandteile berechnet werden. Die zeitliche Auflösung des SESAM beträgt 1 Hz bei einer T90-Zeit von etwa 1 Sekunde.



8. Abgasmessungen „nicht gasförmiger“ Bestandteile

Definitionen

Partikel gemäß der EPA-Definition: (Environmental Protection Agency)

Partikel sind all jene Stoffe, die an einem Teflon-beschichteten Glasfaserfilter oder an einem Teflon-Membranfilter abgeschieden werden, das von verdünntem Abgas mit einer Temperatur unter 52°C durchströmt wird

Unterscheidung der Partikel zwischen

➤ **Primär-Partikel**

Vom Motor direkt emittierte Partikel

➤ **Sekundär-Partikel**

Partikel die in der Atmosphäre aufgrund verschiedenen Reaktionen der Abgaskomponenten miteinander entstehen

Zwei Möglichkeiten den Abgasstrom auf die Temperatur von 52°C ($51,7^{\circ}\text{C}$) zu senken

➤ **Vollstromverdünnung**

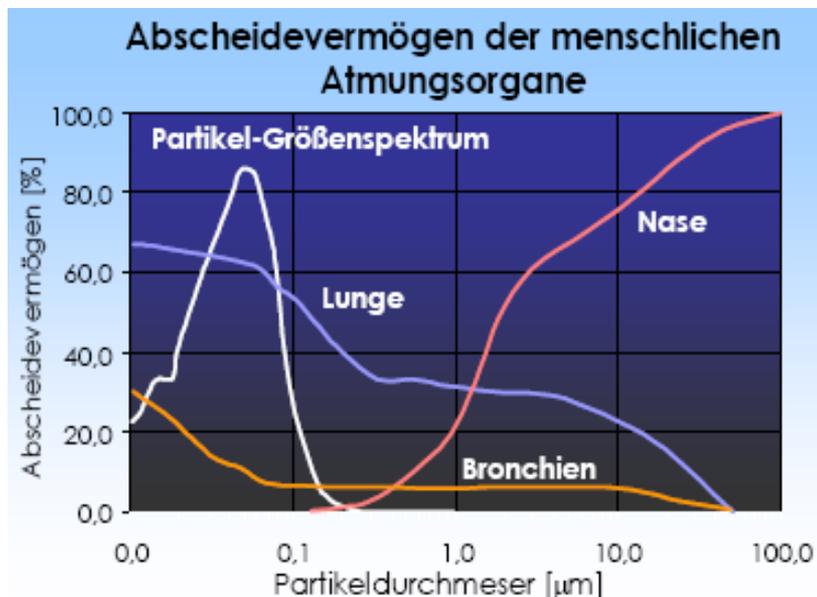
Gesamter Abgasstrom wird mit Frischluft verdünnt

➤ **Teilstromverdünnung**

Nur ein definierter Teil des Abgasstromes wird zur Verdünnung aus dem Gesamtabgasstrom abgezogen

8. Humantoxische Auswirkungen von Dieselruß

- Durch Lungengängigkeit des Rußes und angelagerte HC wird Kanzerogenität vermutet
- Angelagerte Kondensate bestehen größtenteils aus Polycyclic-Aromatic-Hydrocarbons (PAH)



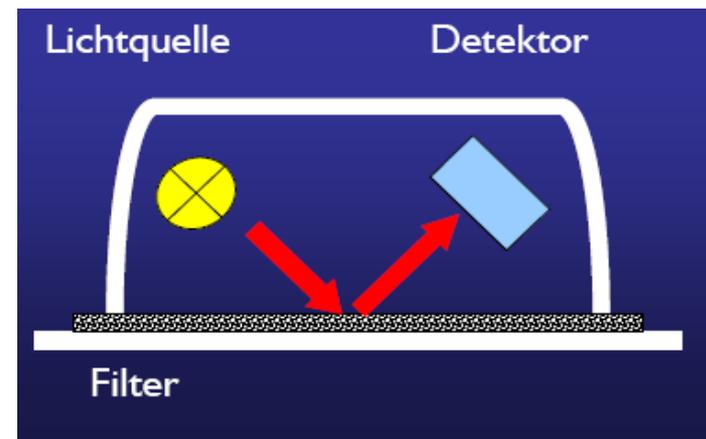
Ablagerung von Feinpartikeln im menschlichen Atemtrakt



Angriffsorte	Luftschadstoffe
Nasen-Rachenraum	5 - 10 μm
Luftröhre	3 - 5 μm
Bronchien	2 - 3 μm
Bronchiolen	1 - 2 μm
Alveolen (Lungenbläschen)	0.1 - 1 μm

8.1 Rauchmessung - Lichtreflexionsverfahren

- Rauchwert des Motorabgases wird mittels Filterpapiermethode gemessen
- Definiertes Abgasvolumen wird über ein Filterpapier abgesaugt und die Schwärzung mittels Lichtreflexionsmessung beurteilt
- Die über den optischen Messkopf bewertete Papierschwärzung liegt zwischen 0 (weißer Filter) und 10 (schwarzer Filter)





8.2 Rauchmessung - Lichtreflexionsverfahren

Berechnung der Schwärzungszahl (BOSCH-Zahl)

$$PS = 10 \cdot \left(1 - \frac{R_G}{R_W} \right) \quad [FSN]$$

PS	Papierschwärzung
R _G	Reflexionsvermögen
des	geschwärzten Filters
R _W	Reflexionsvermögen
des	weißen Filters
FS _N	Filter Smoke Number

MIRA-Korrelation (Motor Industry Research Association)

Aus dem Rauchwert kann die Rußkonzentration berechnet werden
(Bezugszustand 1 bar, 25°C)

$$K_C = 982 \cdot PS \cdot 10^{(PS \cdot 0.1272 - 1.66)} \left[\frac{mg}{m^3} \right]$$

AVL-Korrelation für AVL Smokemeter 415 SE

$$C \left[\frac{mg}{m^3} \right] = \frac{1}{0.405} \times 5.32 \times FSN \times e^{FSN * 0.3062} \quad]$$

8.3 Trübungsmessung - Lichtreflektionsverfahren

Messprinzip

- Erfassung der Schwächung des Lichtstrahls, der das unverdünnte Motorabgas durchläuft
- Die Schwächung wird durch Lichtextinktion hervorgerufen, die sich aus Absorption und Streuung des Strahls zusammensetzt

Opazitätsberechnung

$$\text{Opazität} = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \cdot 100 = 100 \cdot (1 - e^{-KL}) [\%]$$

- Nachdem die Opazität immer noch von der Lichtpfadlänge abhängig ist, verwendet man die Lichtextinktion als Maßstab

$$K = -\frac{1}{L} \cdot \ln \left(1 - \frac{\text{Opazität}}{100}\right) [m^{-1}]$$

Quelle: AVL [2]



- I Lichtintensität nach Durchlaufen der Messstrecke
- I_0 Reflexionsvermögen des weißen Filters
- K Lichtintensität der Quelle
- L Lichtpfadlänge [m]



8. 4 Partikelmessung

Messung der Partikelgrößenverteilung, Anzahl

2 Schritte

- 1** Bestimmung der Partikelgröße bzw. Trennung nach der Partikelgröße
- 2** Zählung der Partikel im Fluidstrom



- Getrennte Messgeräte
- Integrierte Messgeräte

Messgeräte:

- Partikelgröße
 - Aerodynamic Particle Sizer (APS)
- Partikelanzahl
 - Condensation Particle Counter (CPC)
- Partikelgröße + Anzahl
 - Electrical Low Pressure Impactor (ELPI)
 - Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)



8.4 Partikelmessung - Methoden der Abgasmessung

Wiederspiegelung der Praxis:

Das Autoabgas wird durch den Fahrtluftstrom sehr schnell stark verdünnt und damit abgekühlt

- keine Kondenswasserbildung - Abbruch aller chem. Reaktionen

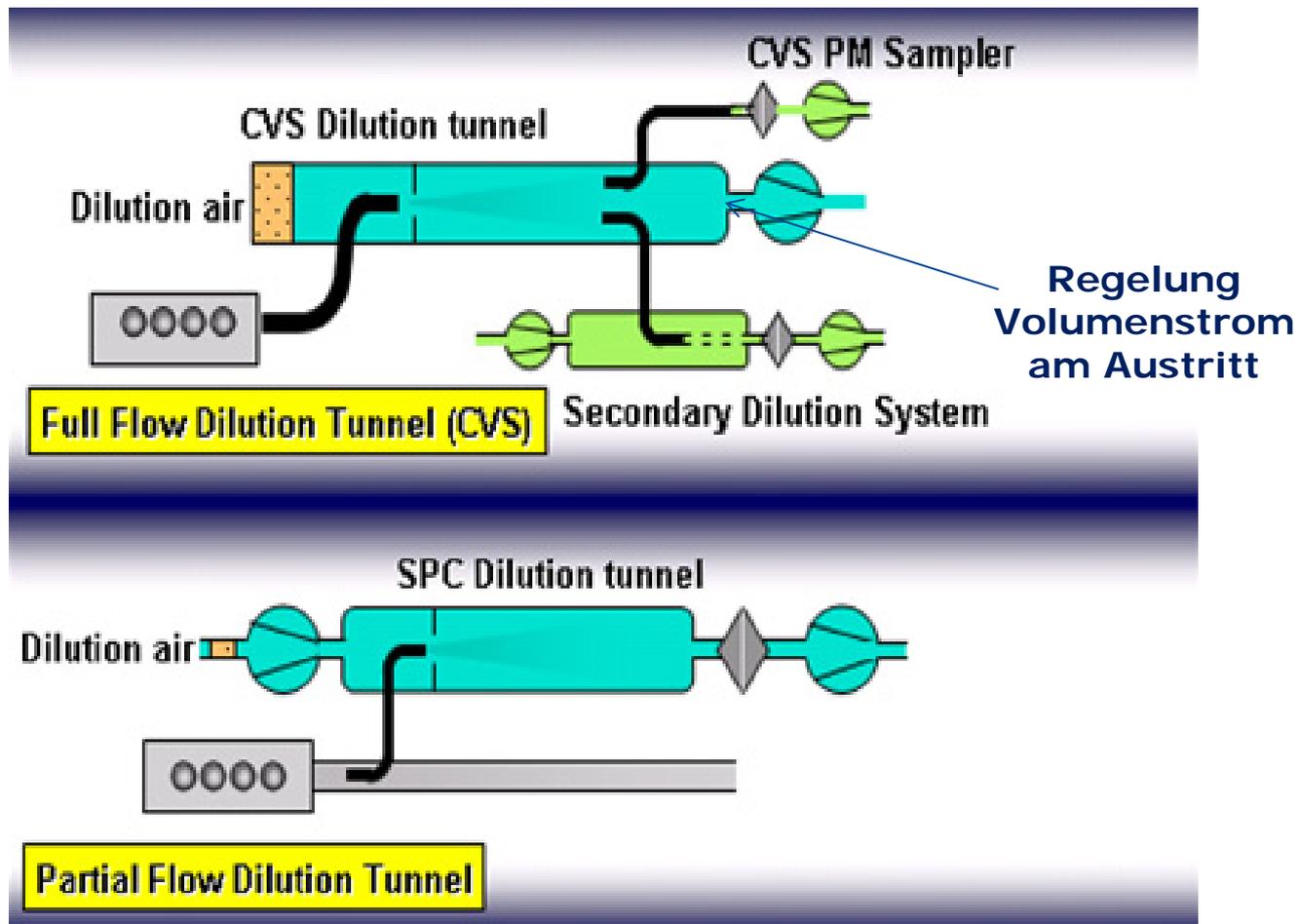
Daher:

Partikel sind all jene Stoffe, die an einem teflonbeschichteten Glasfaserfilter oder an einem Teflon-Membranfilter abgeschieden werden, das von verdünntem Abgas mit einer Temperatur unter 52°C durchströmt wird

Lösung 1: Vollstromverdünnung mit CVS Constant Volume Sampling aus dem Messgasstrom (keine Motorangaben erforderlich)

Lösung 2: Teilstromverdünnung (Messung Abgasstrom notwendig)

8.4 Partikelmessung - Methoden der Abgasmessung





8.4 Partikelmessung - Methoden der Abgasmessung

Vollstrom-Verdünnungssystem CVS

- Gesamter emittierter Abgasstrom wird mit Frischluft verdünnt (CVS-Anlage)
- Bedingt große Baugröße der Anlage
- Für PKW, Motorräder, kleine LKW

Teilstrom-Verdünnungssystem

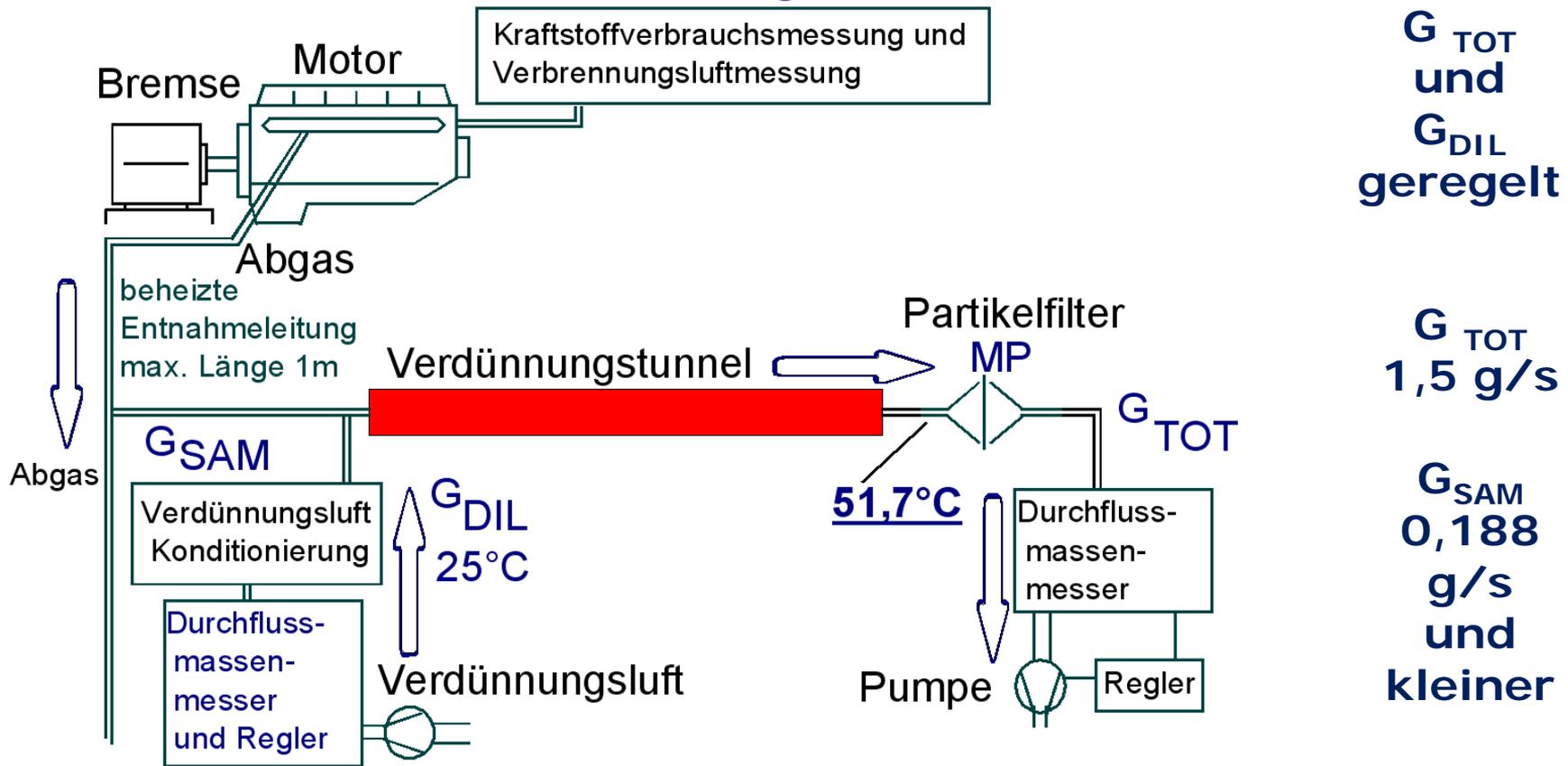
- Nur ein kleiner Teil des Abgases ($< 1\%$) wird entnommen und mit Frischluft verdünnt
- Beheizter Messtunnel, um gleiche Verhältnisse wie für Vollstromtunnel zu schaffen
- Für schwere LKW und alle großen Motoren

Rohabgasmessung

- Gasförmige Komponenten von schweren LKW und allen großen Motoren

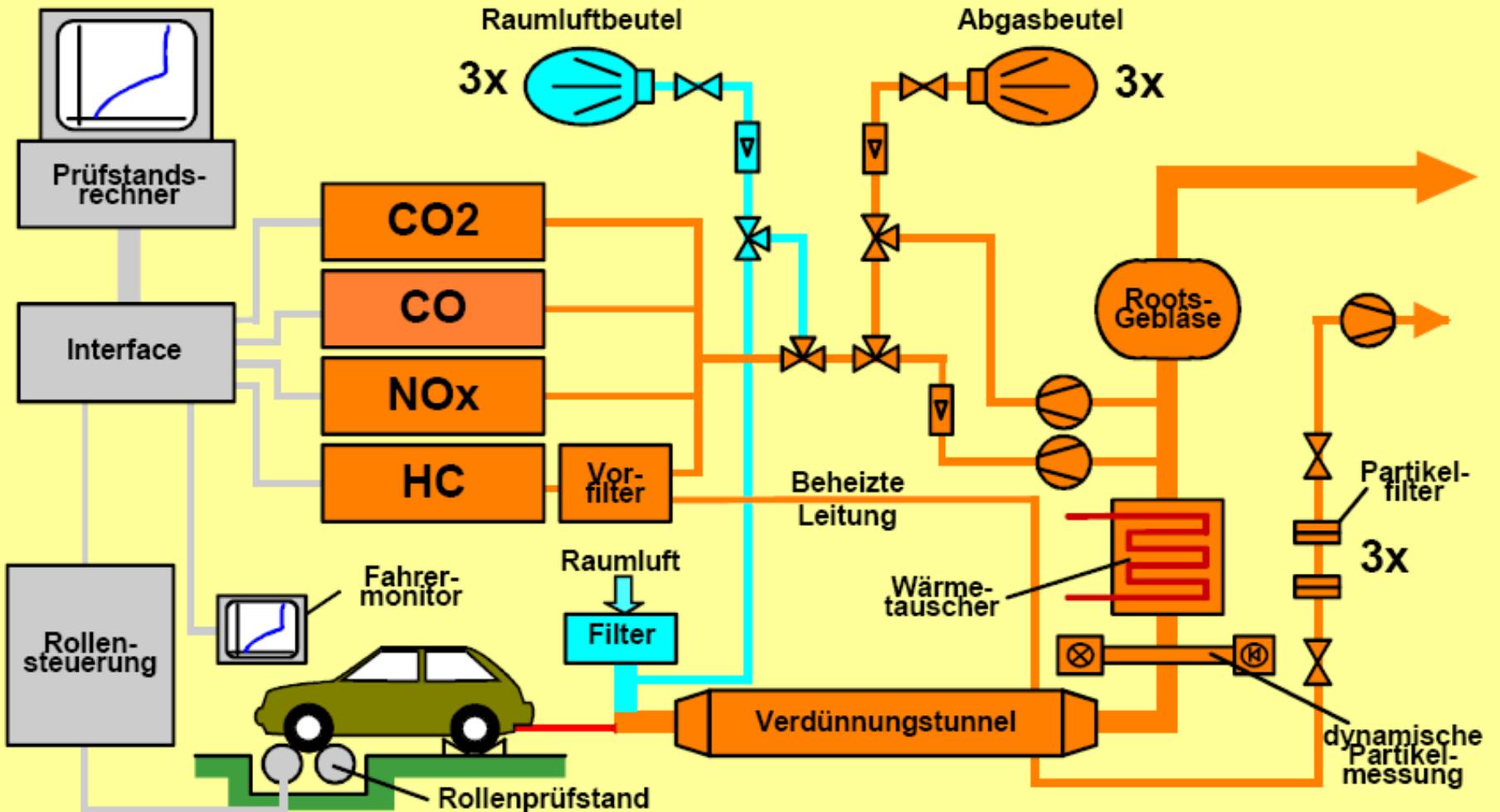


Teilstromverdünnungstunnel



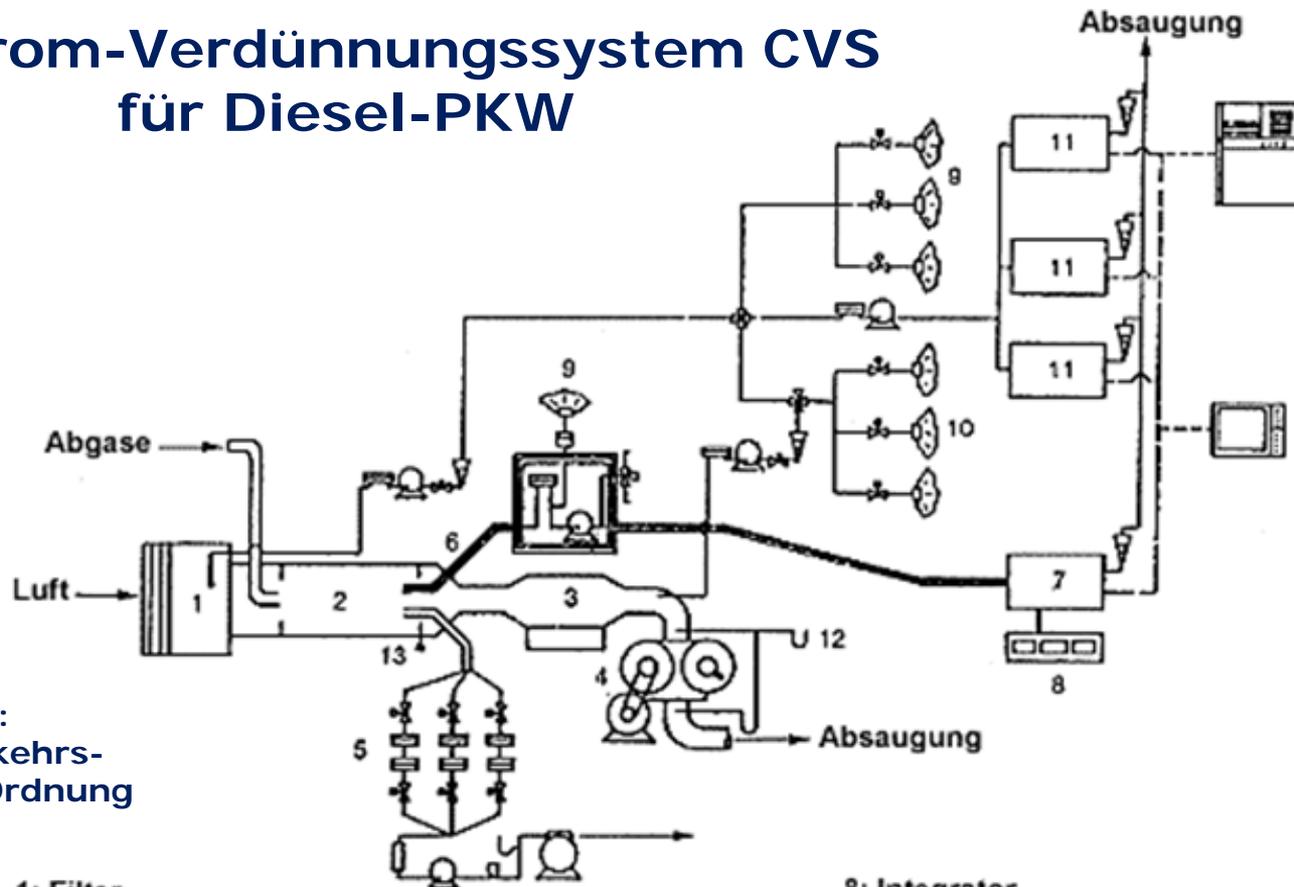
Verdünnung mindestens Faktor 8 verhindert Kondenswasserbildung
 Messdauer 600 sek. → 112 g Probe → Ziel 2 mg Partikel

Vollstrom-Verdünnungssystem CVS



Quelle: Eichseder [3]

Vollstrom-Verdünnungssystem CVS für Diesel-PKW



Quelle:
Straßenverkehrs-
Zulassungs-
Ordnung

- 1: Filter
- 2: Verdünnungstunnel
- 3: Wärmetauscher
- 4: Roots-Gebläse
- 5: Partikel-Entnahmesystem
- 6: Beheiztes Kohlenwasserstoff-Entnahmesystem
- 7: Beheizter Flammen Ionisations-Detektor

- 8: Integrator
- 9: Raumluft-Sammelbeutel
- 10: Abgas-Sammelbeutel
- 11: Analysator
- 12: Druckmeßstelle
- 13: Temperaturmeßstelle

8.5 Staub (TA Luft)

Anlehnung an Kraftwerke- altes Messverfahren (1970)

Messung bei 190°C

Auswertung über
Auswiegen der Filter

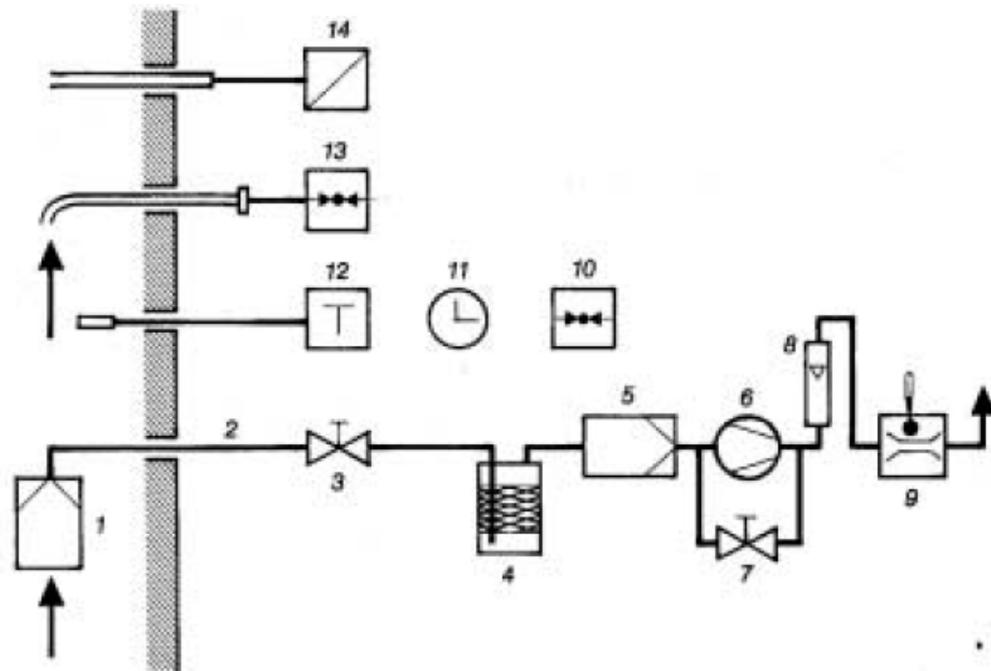


Abb. 1 Aufbauschema einer Probenahmeeinrichtung nach VDI 2066 (Prinzipschema)

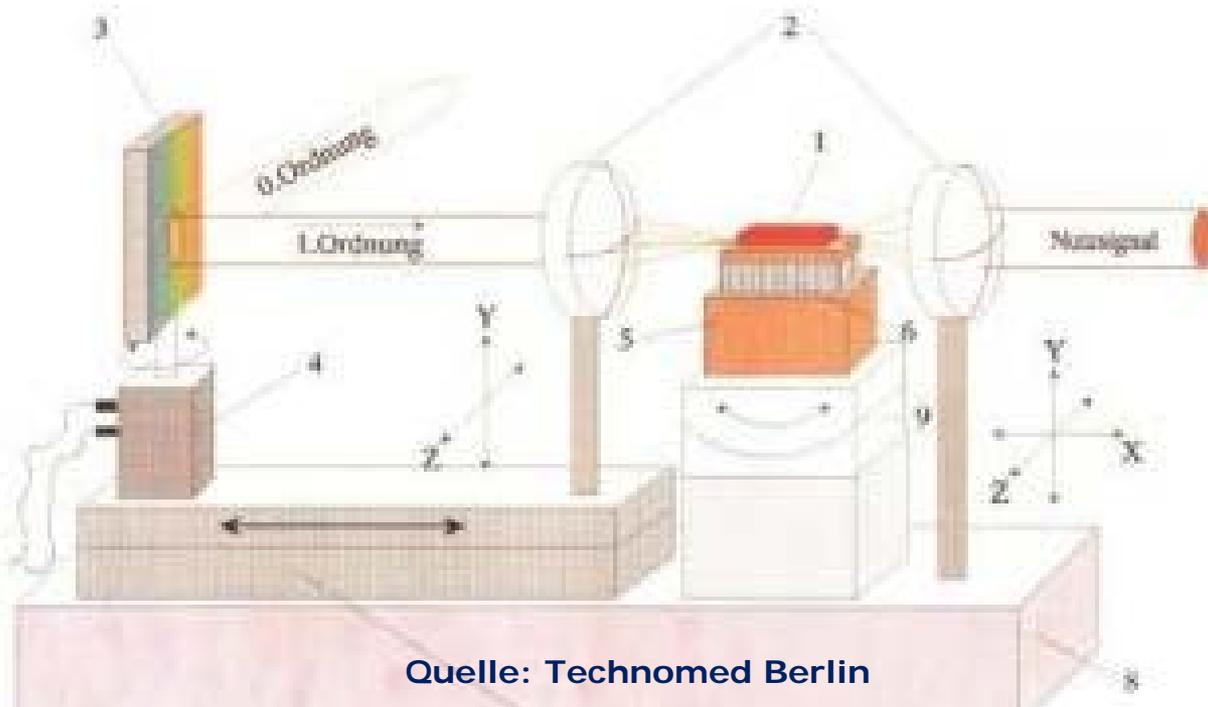
1 Filterkopf mit Sonde und Diffusor
2 Absaugerohr
3 Absperrventil
4 ggf. Trockenturm
5 Schutzfilter für Absaugeaggregat
6 Absaugeaggregat (gasdicht)
7 Regelbypass

8 Schwwebkörperdurchflussmesser
9 Gasmengenzähler mit Thermometer
10 Barometer
11 Zeitmesser
12 Temperaturfühler mit Anzeigeeinstrument
13 Prandtl-Staurohr mit Mikromanometer oder Anemometer
14 ggf. Gasmessgerät

8.6 Ammoniak NH_3

Messprinzip: Laser Dioden Spektroskopie

Aufnahme von Absorptionskennlinie in
infraroten NH_3 -typischen Spektren



1 - Laserdiode

2 - Optiken

3 - Gitter

4 - Galvanoscanner

5 - Kupferblock

6 - Peltierelement

7 - Piezo - Schieberisch

8 - Laborplatte

9 - Wippe

Quelle: Technomed Berlin

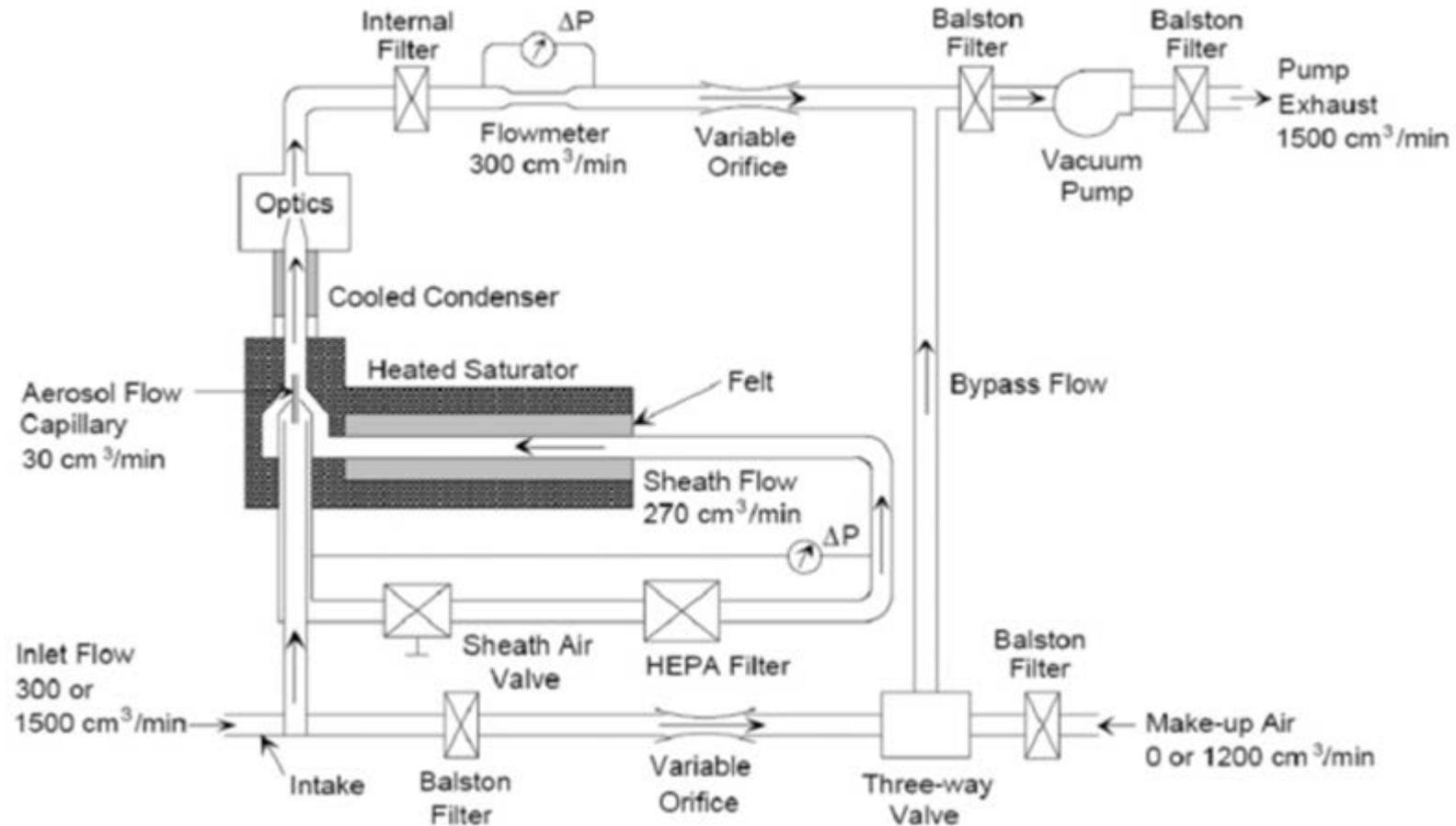


8.7 Bestimmung Partikelanzahl

Kondensationspartikelzähler (CPC) zur Partikelanzahlkonzentration im Abgas (Aerosol) bestimmen

Der Sensor besteht aus einem beheizten Sättiger, einem gekühlten Kondensierer und einem optischen Detektor. Das in das Instrument eintretende Abgas enthält Partikelkerne, auf die das vorher verdampfte Butanol aufkondensiert. Die so entstehenden Tröpfchen mit einem Partikelkern verlassen den Kondensierer durch eine Nadel in den optischen Detektor. Der optische Sensor besteht aus einer Laserdiode, Bündelungslinsen und zylinderförmigen Linsen. Auf diese Art wird ein horizontales Band aus Laserlicht über dem Aerosolaustritt des Kondensierers erzeugt, mit dem Tropfen der Größe von $10\ \mu\text{m}$ bis $2\ \text{mm}$ detektiert werden können. Die Linsen fokussieren das Streulicht auf eine Photodiode. Der Hauptstrahl wird in einer Lichtfalle am Ende der Messzelle absorbiert. Eine Referenzphotodiode an der Rückwand der Lichtfalle kontrolliert die Intensität des einfallenden Strahles. Auf diese Art wird jedes Partikel einzeln gezählt.

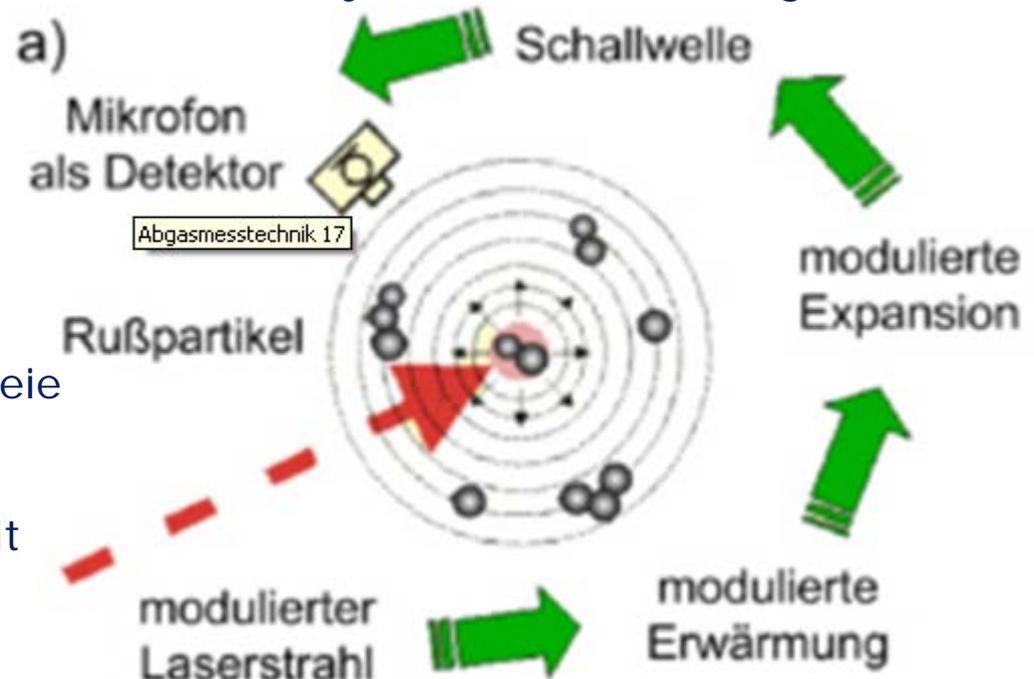
8.7 Bestimmung Partikelanzahl



Quelle: Firma TSI Dokumentation CPC 3025A

8.7 Bestimmung Partikelkonzentration

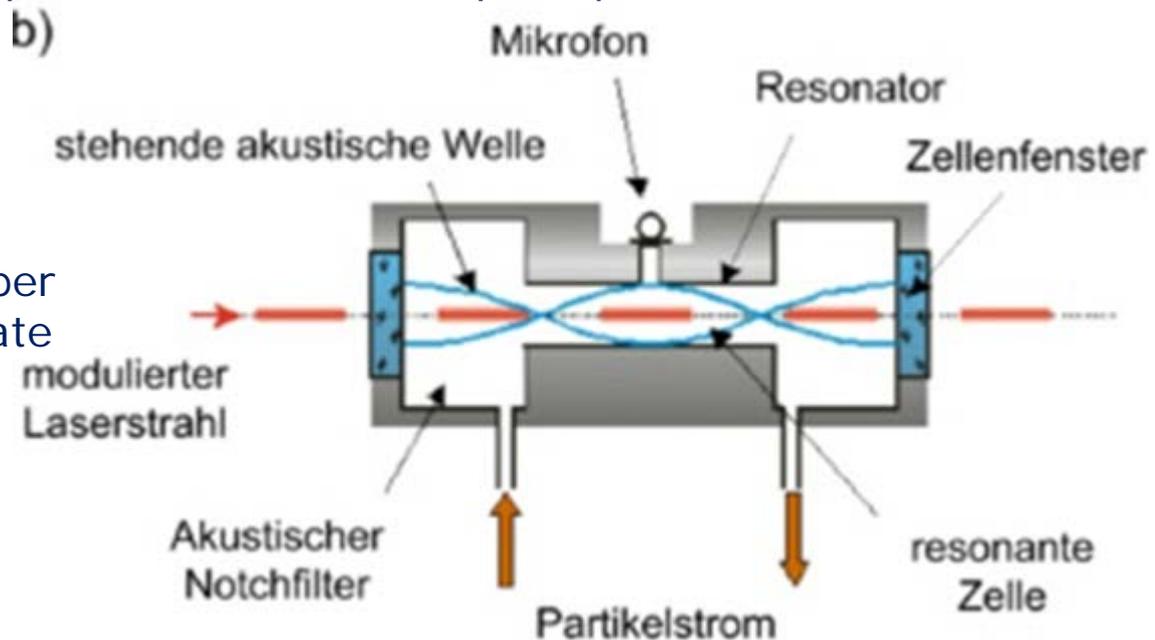
Der Micro Soot Sensor der Firma AVL (MSS), auch als Photoacoustic Soot Sensor (PASS) bekannt, basiert auf dem photoakustischen Messprinzip. Die Aerosolprobe aus dem Abgas wird mit einem modulierten Laserstrahl beleuchtet. Die im Abgas enthaltenen schwarzen Rußpartikel absorbieren den Laserstrahl und es kommt zu einer Erwärmung der Rußteilchen. Aufgrund der periodischen Modulation des Lichtstrahls kommt es zu einer zyklischen Erwärmung und Abkühlung der Rußpartikel. Aus der periodischen Rußerwärmung resultiert eine Ausdehnung und Kontraktion des Trägergases. Durch diese Gasschwingungen wird eine Schallwelle gebildet, die mittels Mikrofon detektiert werden kann. Saubere partikelfreie Luft produziert kein Signal. Bei rußbeladener Luft bzw. Abgas steigt das Signal proportional mit der Konzentration des Rußes im Messgasvolumen.



Quelle: AVL MSS 483

8.7 Bestimmung Partikelkonzentration

Das Mikrofon detektiert als primäres Signal eine Druckschwingung. Das Nullsignal wird durch eine Referenzmessung mit gefilterter, absolut partikelfreier Luft in der Messzelle durchgeführt. In darauffolgenden Messungen mit rußbeladenem Abgas wird das Nutzsignal und damit die Rußkonzentration bestimmt, indem vom Messsignal das Nullsignal vektoriell abgezogen wird. Das photoakustische Messprinzip erlaubt instationäre Messungen mit einer sehr hohen Zeitauflösung von 10 Hz. Jedoch ist eine Abgasverdünnung unbedingt erforderlich, da die Temperatur am Messgeräteeingang nicht über 43 °C liegen darf und Kondensate das Mikrofon zerstören könnten. Je nach Verstärkung sind Rußkonzentrationen von bis zu 50 mg/m³ messbar. Die Untere Detektionsgrenze des Sensors liegt bei 0,005 mg/m³.



Quelle: AVL MSS 483



9. Messvorschriften Motoren, ohne PKW und LKW Anwendung

Blockheizkraftwerke nach TA Luft

Besonderheit 1: Messung Staub statt Partikel

Besonderheit 2: Messung von Konzentrationen [ppm]
statt spezifischer Werte – Normierung über
Restsauerstoffgehalt von 5% im Abgas

Motoren in Baumaschinen, Lokomotiven, Booten, Landwirtschaft usw.

nach Richtlinie der EG 97/68/EG

weitergeführt durch Richtlinie der EG 2004/26/EG

Landwirtschaft Richtlinie der EG 2000/25/EG

weitergeführt durch Richtlinie der EG 2005/13/EG

final: VERORDNUNG (EU) 2016/1628

Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. September 2016 über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur Änderung und Aufhebung der Richtlinie 97/68/EG

USA: EPA Non road Vorschrift 40 CFR 89; 40 CFR1068



Messung gasförmige Bestandteile aus dem unverdünnten Abgas

- In der europäischen Abgasgesetzgebung für Motoren, außer leichte LKW und PKW, ist diese Form der Messung vorgeschrieben
- Messung im unverdünnten Abgasstrom
- Zur Umrechnung der Volumenkonzentrationen der einzelnen Abgaskomponenten in Massenemissionswerte ist auch die Messung der angesaugten Luftmasse und des Kraftstoffverbrauchs notwendig

Umrechnung von Volumen- in Massenkonzentration

$$HC_{mass} = HC_{roh} \cdot m_{Abgas} \cdot 0.479 \cdot 10^{-3} \left[\frac{g}{h} \right]$$

$$NOx_{mass} = NOx_{roh} \cdot m_{Abgas} \cdot KF \cdot 1.589 \cdot 10^{-3} \left[\frac{g}{h} \right]$$

$$CO_{mass} = CO_{roh} \cdot m_{Abgas} \cdot 0.9671 \cdot 10^{-3} \left[\frac{g}{h} \right]$$

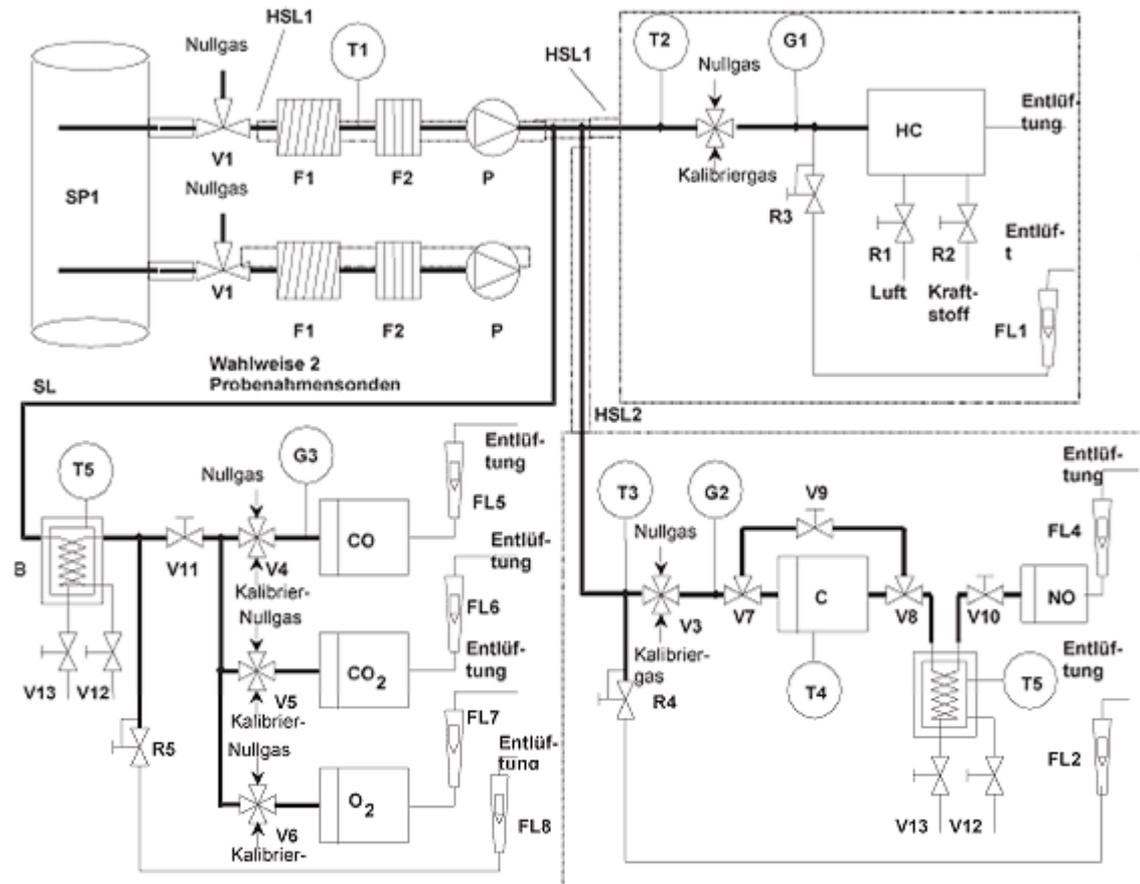
mit $HC_{roh}, NOx_{roh}, CO_{roh}$ in [ppm]

$$m_{Abgas} = m_{Luft} + m_{Kraftstoff} \left[\frac{kg}{h} \right]$$

KF - Korrekturfaktor

9. Messvorschriften Motoren, ohne PKW und LKW Anwendung

Prüfstands Aufbau

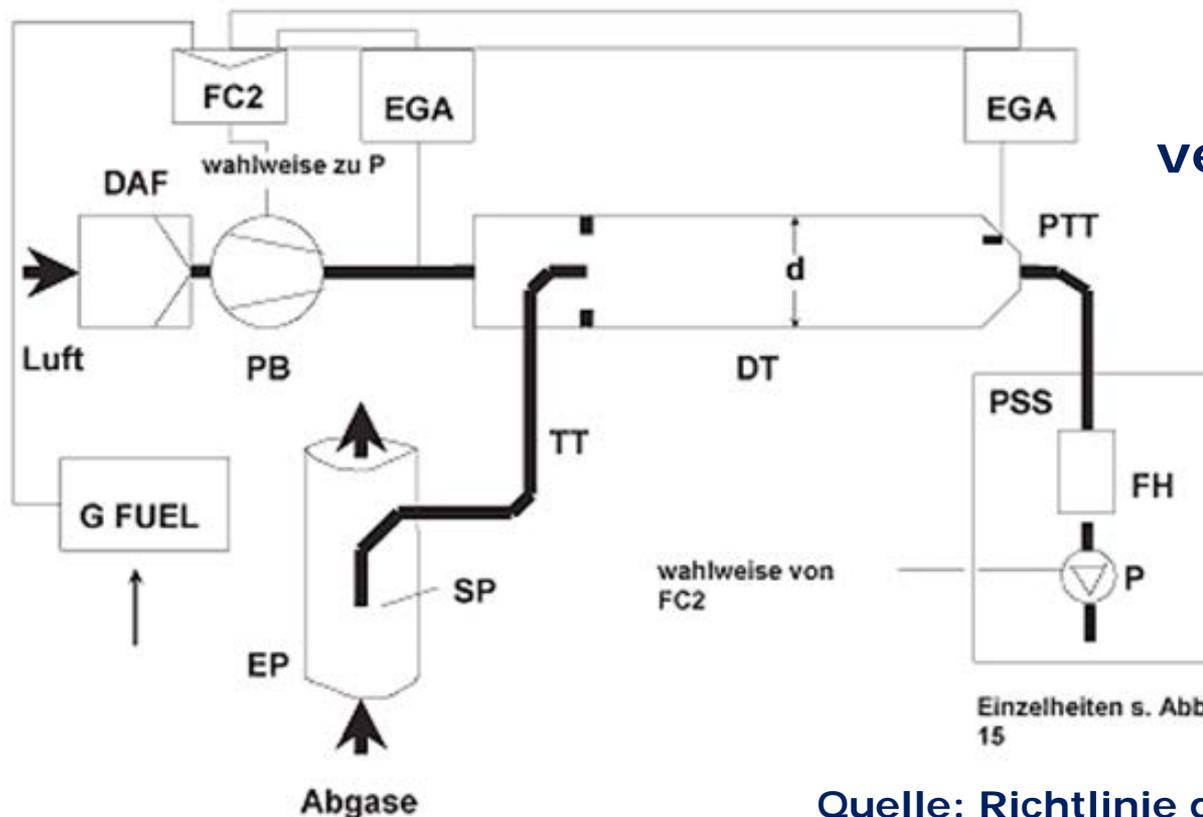


Quelle: Richtlinie der EG 97/68/EG

9. Messvorschriften Motoren, ohne PKW und LKW Anwendung

Partikelmessung: Bestimmung des Verdünnungsverhältnisses über zwei CO_2 Messungen; Quelle: Richtlinie der EG 97/68/EG

Abgasmassenstrom: Bestimmung über Ansaugluft und Kraftstoff



**Teilstrom-
verdünnungs-
tunnel**

Quelle: Richtlinie der EG 97/68/EG



9. Messvorschriften Motoren, ohne PKW und LKW Anwendung

Non-Road Steady Cycle - NRSC-Ablaufplan

Mode No	Engine Speed	Load	Weighting Factor
1	Rated or Reference (2)	100	0,15
2	Rated or Reference (2)	75	0,15
3	Rated or Reference (2)	50	0,15
4	Rated or Reference (2)	10	0,10
5	Intermediate	100	0,10
6	Intermediate	75	0,10
7	Intermediate	50	0,10
8	Idle	0	0,15

Basis: ISO 8178, GTR und U.S.-EPA Part 1039/1065

(1) Identical with C1 cycle as described in paragraph 8.3.1.1. of the ISO 8178-4:2007(E) standard (corrected version 2008-07-01)

(2) Definition Referenzdrehzahl,
Reference speed is defined in Annex III section 4.3.1; nächste Seite

9. Messvorschriften Motoren, ohne PKW und LKW Anwendung

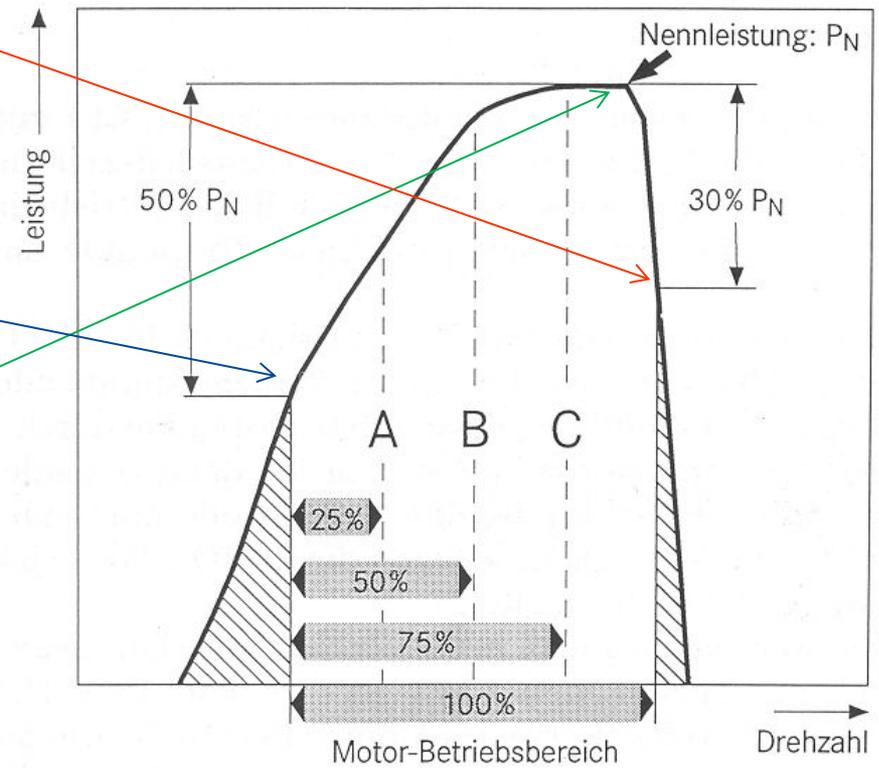
Definition Referenzdrehzahl, Entnormierung des NRSC und NRTC

a) $n_{ref} = \text{low speed} + 0,95 \times (\text{high speed} - \text{low speed})$

(the high speed is the highest engine speed where 70 % of the rated power is delivered,

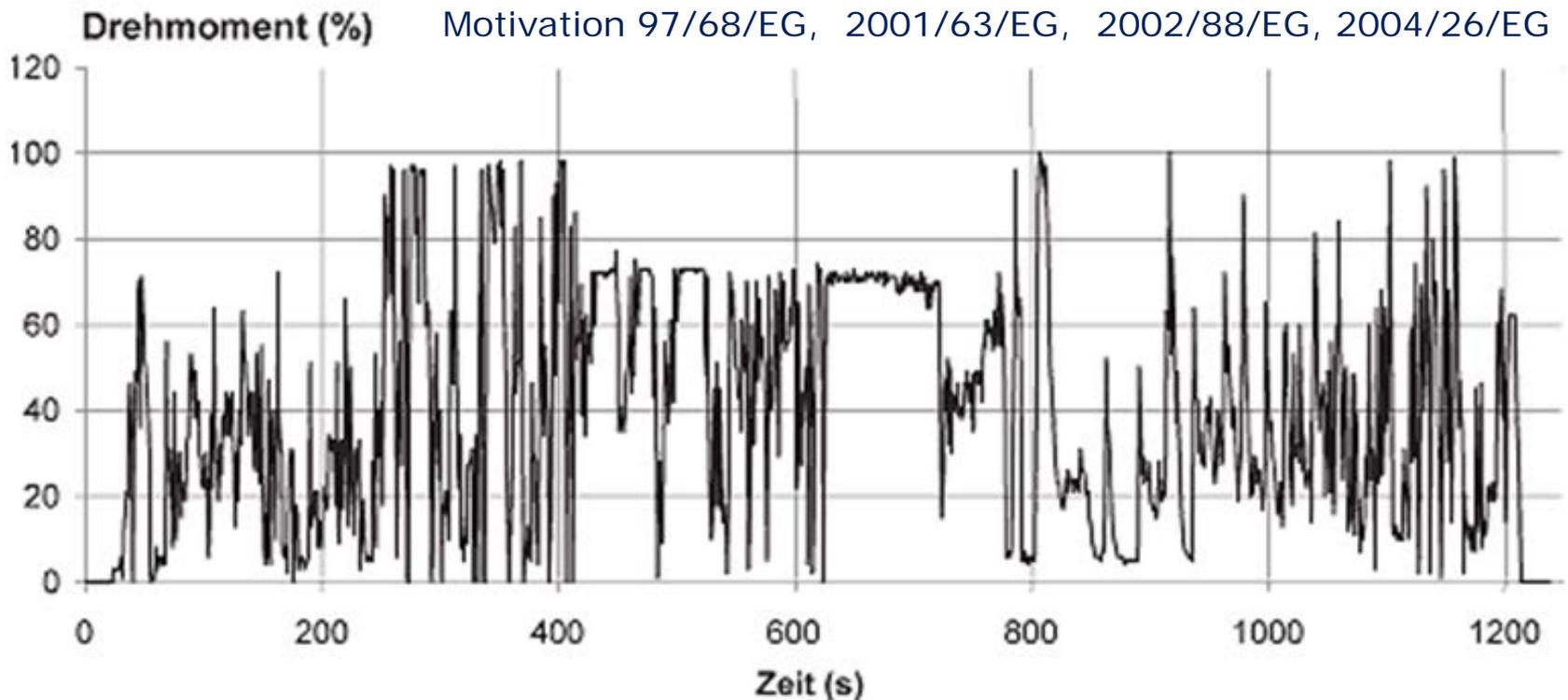
while the low speed is the lowest engine speed where 50 % of the rated power is delivered).

b) rated speed shall mean the maximum full load speed allowed by the governor as specified by the manufacturer;



9. Messvorschriften Motoren, ohne PKW und LKW Anwendung

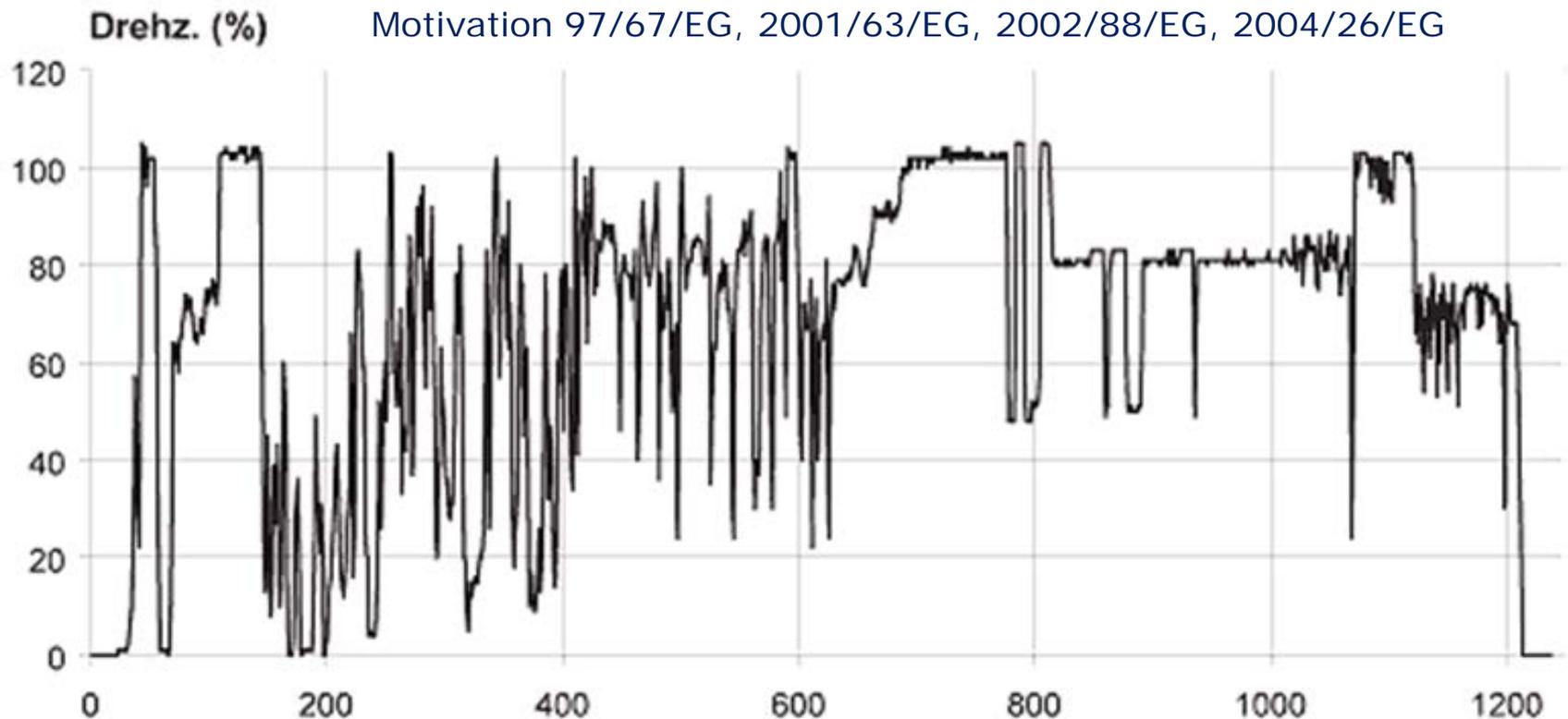
non-road transient cycle (NRTC-Ablaufplan)
Einzusetzen an Abgasstufe IIIB oder TIER 4 interim





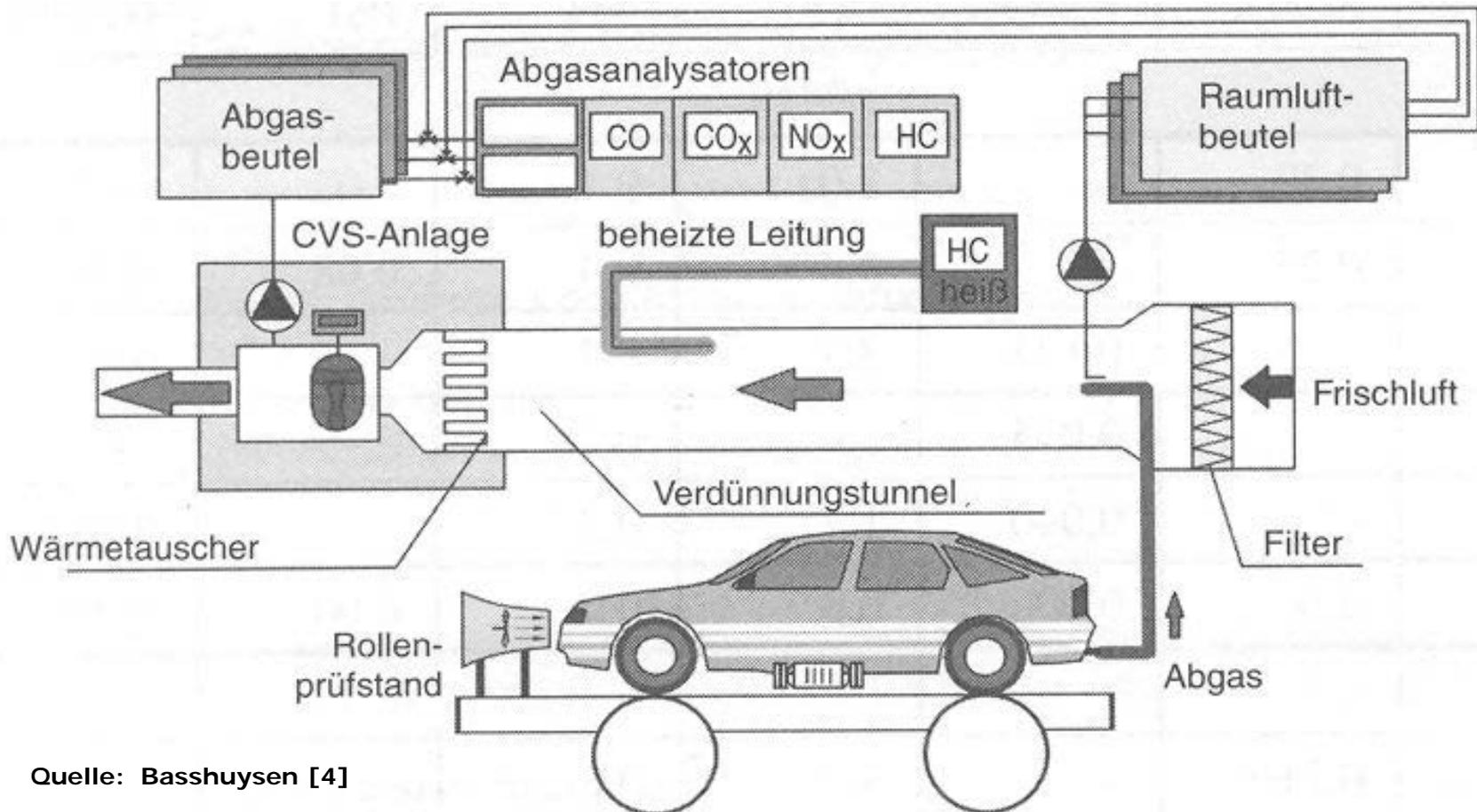
9. Messvorschriften Motoren, ohne PKW und LKW Anwendung

non-road transient cycle (NRTC-Ablaufplan)
Einzusetzen an Abgasstufe IIIB oder TIER 4 interim



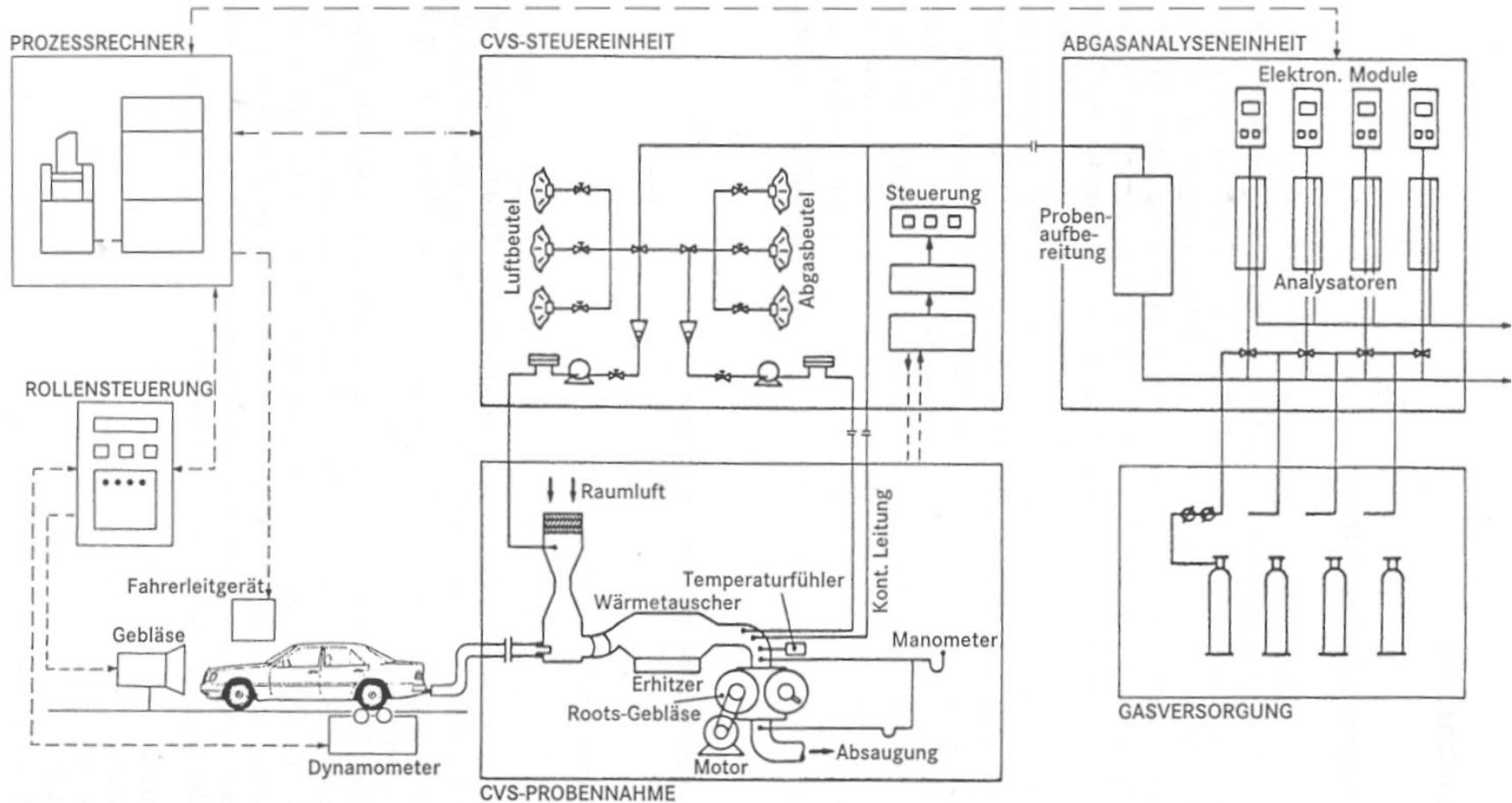
10. Messvorschriften PKW - OTTO-Motoren

Vollstromverdünnung → CVS Messsystem



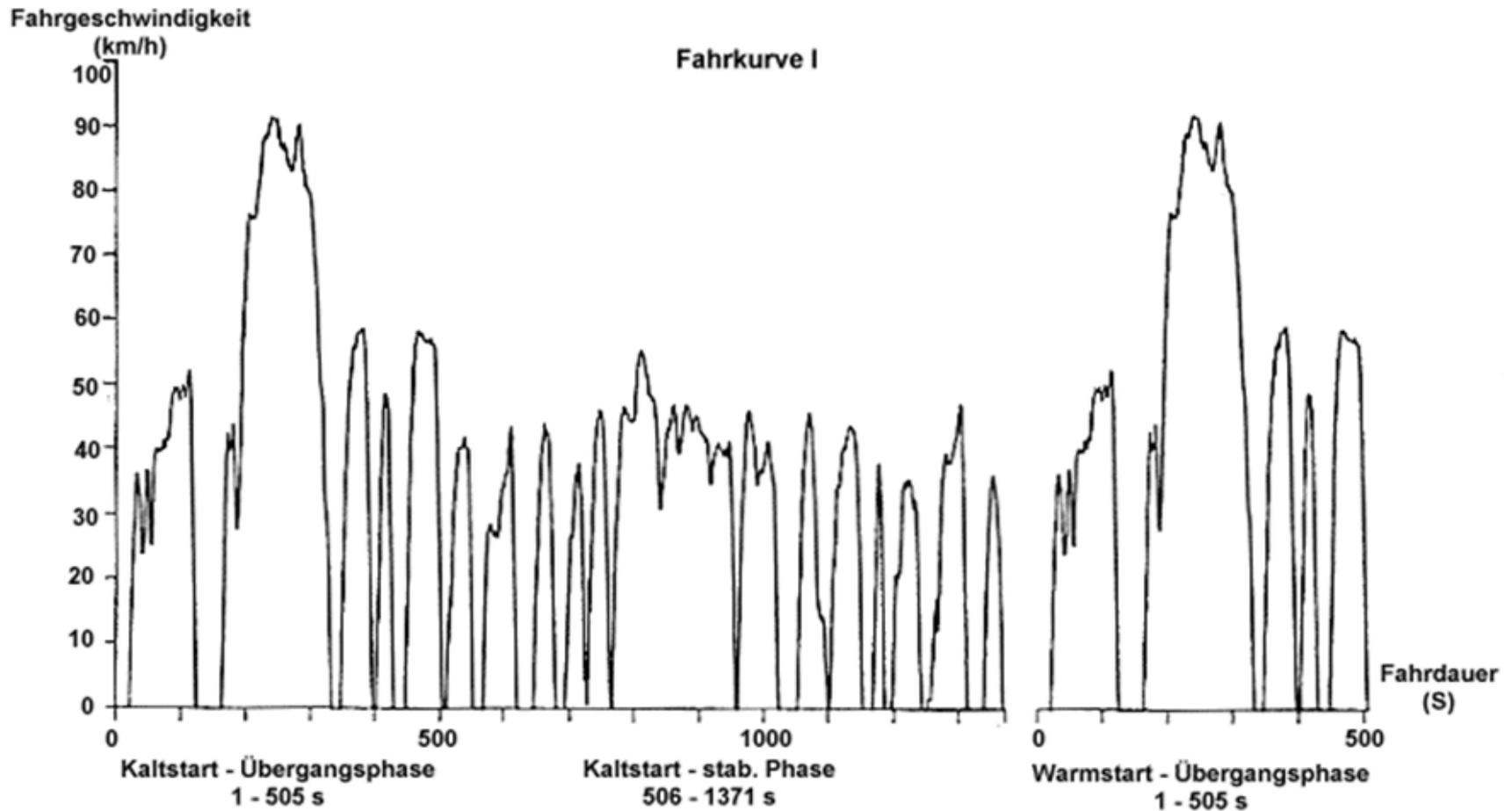
Quelle: Basshuysen [4]

10. Messvorschriften PKW - OTTO-Motoren



Quelle: Basshuysen [4]

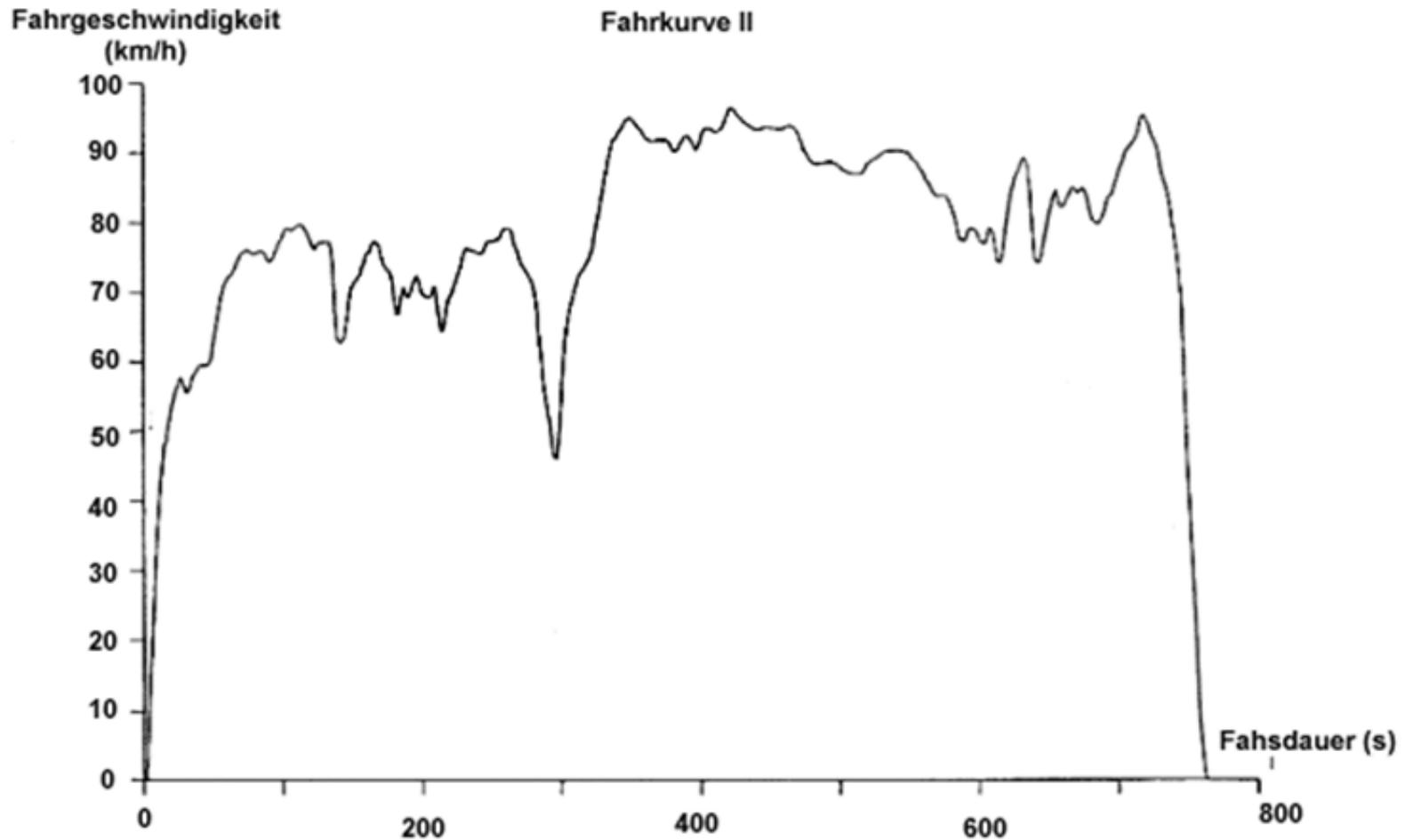
10. Messvorschriften PKW - OTTO-Motoren



Quelle: Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung



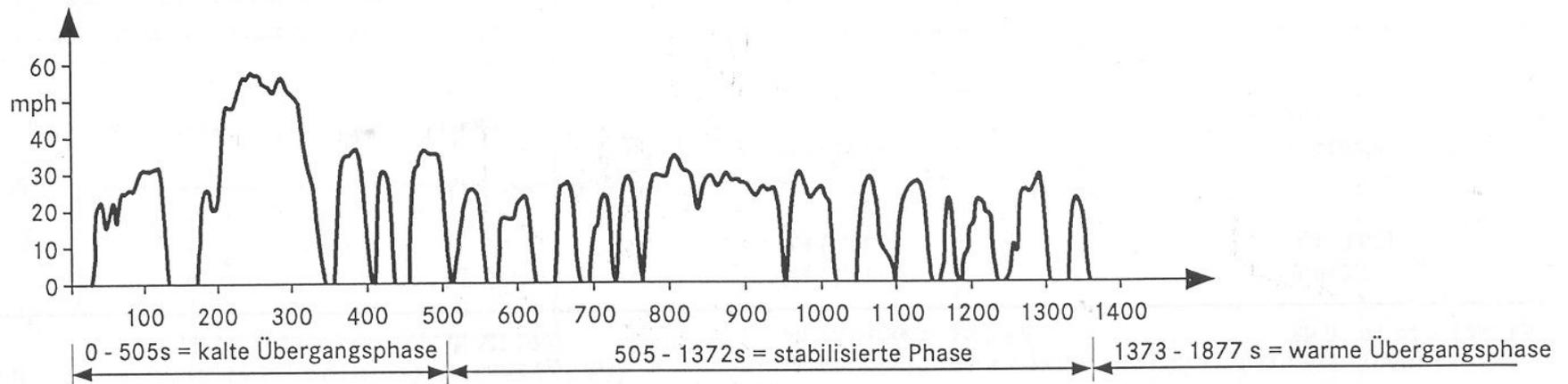
10. Messvorschriften PKW - OTTO-Motoren



Quelle: Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung

10. Messvorschriften PKW - OTTO-Motoren

USA - City-Zyklus (FTP 75)

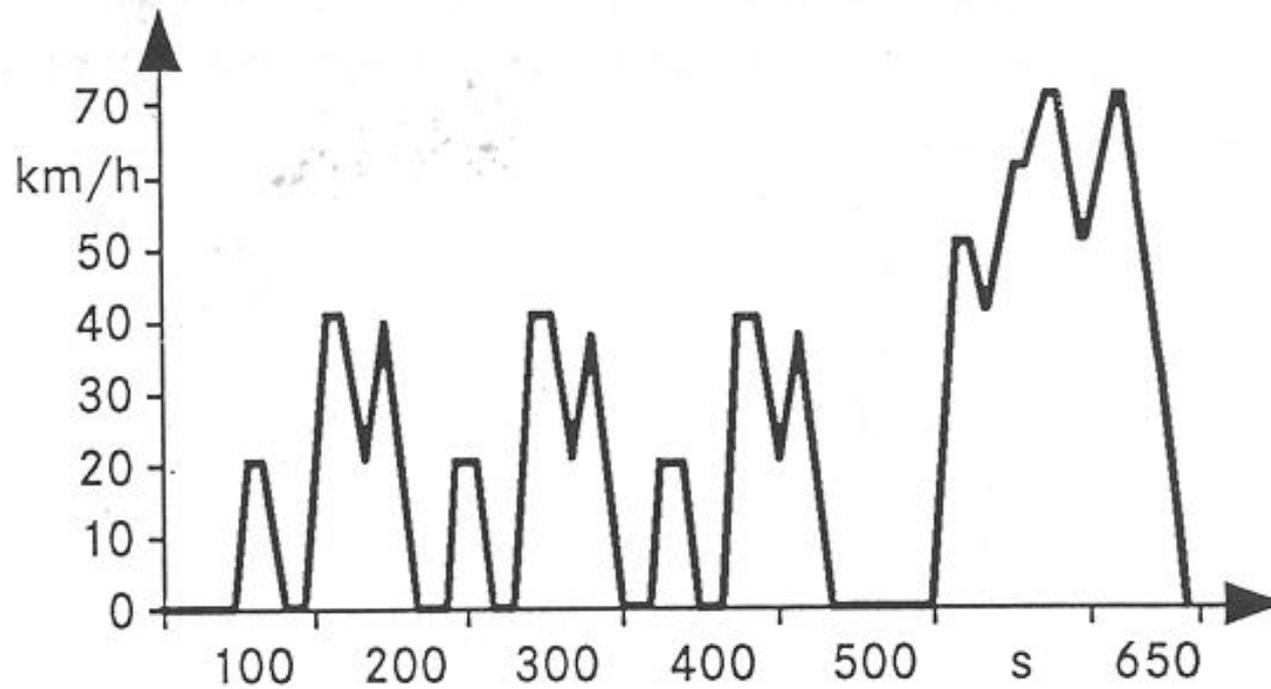


Quelle: Basshuysen [4]



10. Messvorschriften PKW - OTTO-Motoren

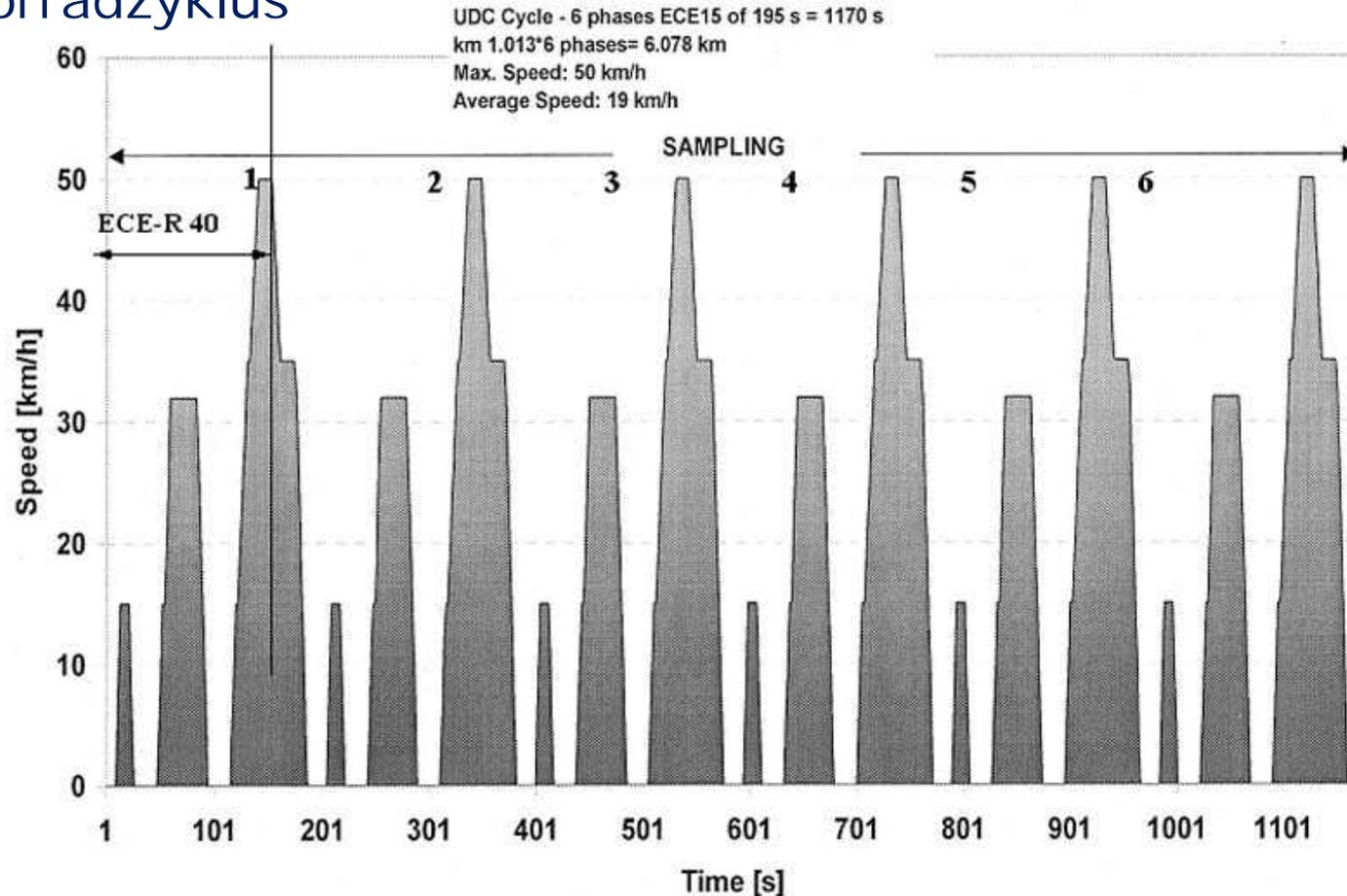
Japan - 10-15-mode-Zyklus



Quelle: Basshuysen [4]

10. Messvorschriften PKW - OTTO-Motoren

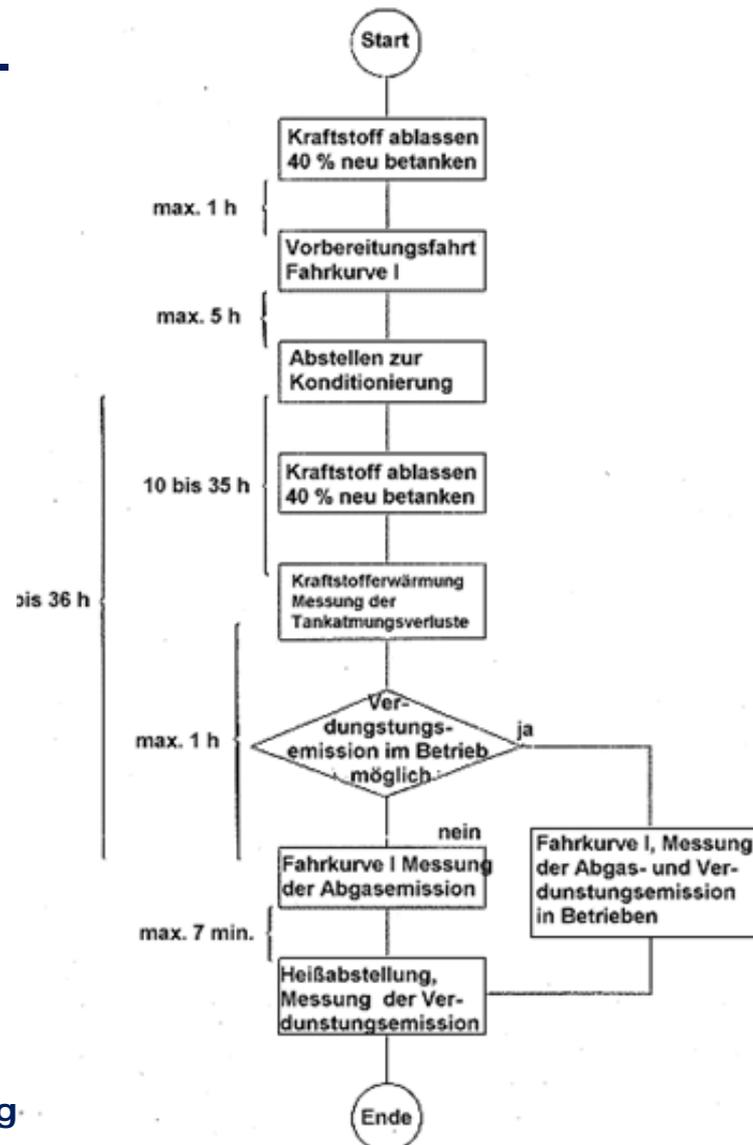
Motorradzyklus



Quelle: Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung



10. Messvorschriften PKW - OTTO-Motoren



Quelle: Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung



10. Messvorschriften PKW – OTTO-Motoren

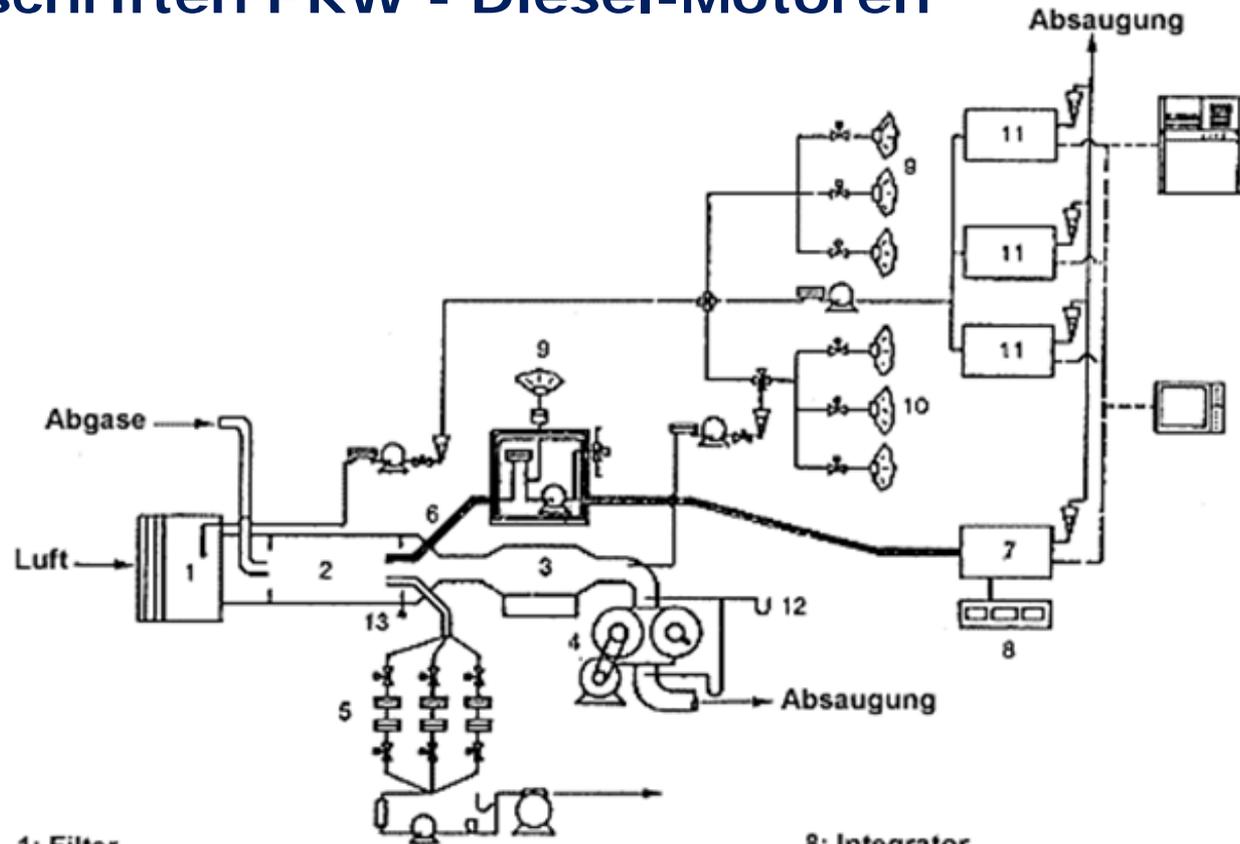
kürzeste Dauer: 12 h
längste Dauer: 44 h

12 bis 36 h



Quelle: Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung

10. Messvorschriften PKW - Diesel-Motoren



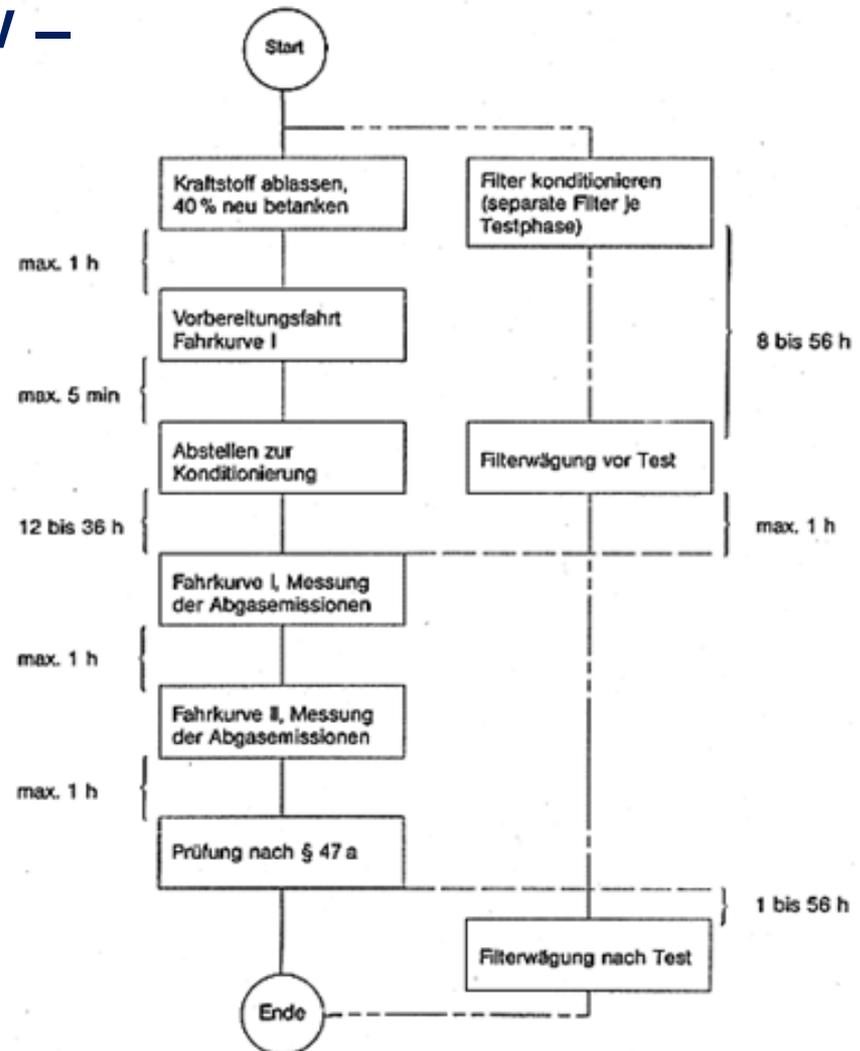
- 1: Filter
- 2: Verdünnungstunnel
- 3: Wärmetauscher
- 4: Roots-Gebläse
- 5: Partikel-Entnahmesystem
- 6: Beheiztes Kohlenwasserstoff-Entnahmesystem
- 7: Beheizter Flammen Ionisations-Detektor

- 8: Integrator
- 9: Raumluft-Sammelbeutel
- 10: Abgas-Sammelbeutel
- 11: Analysator
- 12: Druckmeßstelle
- 13: Temperaturmeßstelle



10. Messvorschriften PKW – Diesel-Motoren

kürzeste Dauer: 12 h
längste Dauer: 44 h



Quelle: Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung



10. Messvorschriften PKW - OTTO-Motoren

Das maßgebliche Volumen ist auf die Normalbedingungen 101,33 kPa und 273,2 K zu korrigieren.

Die Masse m der vom Fahrzeug während der Prüfung emittierten gasförmigen Luftverunreinigungen wird für die einzelnen Testphasen durch das Produkt aus Volumenkonzentration und dem entsprechenden Gasvolumen basierend auf den nachstehenden Dichtewerten nach den vorgenannten Bezugsbedingungen berechnet.

- für Kohlenmonoxid (CO): $d = 1,25 \text{ kg/m}^3$
- für Kohlenwasserstoffe (CH_{1,85}): $d = 0,619 \text{ kg/m}^3$
- für Stickoxide (NO₂): $d = 2,05 \text{ kg/m}^3$

Quelle: Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung



11. Messvorschriften schwere LKW-Motoren

- In der europäischen Abgasgesetzgebung für LKW-Motoren vorgeschrieben → Messung aus dem unverdünnten Abgas
- Messung im unverdünnten Abgasstrom
- Zur Umrechnung der Volumenkonzentrationen der einzelnen Abgaskomponenten in Massenemissionswerte ist auch die Messung der angesaugten Luftmasse und des Kraftstoffverbrauchs notwendig

Umrechnung von Volumen- in Massenkonzentration

$$HC_{mass} = HC_{roh} \cdot m_{Abgas} \cdot 0.479 \cdot 10^{-3} \left[\frac{g}{h} \right]$$

$$NOx_{mass} = NOx_{roh} \cdot m_{Abgas} \cdot KF \cdot 1.589$$

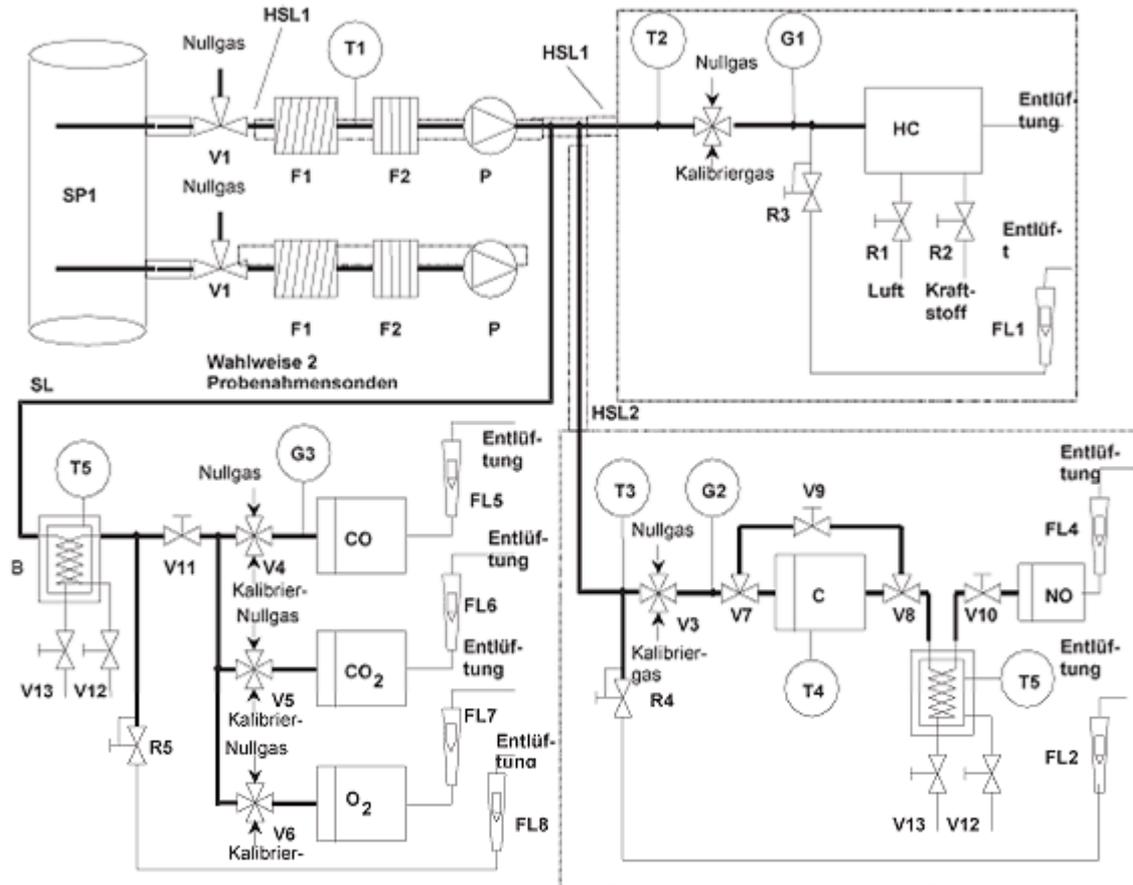
$$CO_{mass} = CO_{roh} \cdot m_{Abgas} \cdot 0.9671 \cdot 10^{-3} \left[\frac{g}{h} \right]$$

mit $HC_{roh}, NOx_{roh}, CO_{roh}$ in [ppm]

$$m_{Abgas} = m_{Luft} + m_{Kraftstoff} \left[\frac{kg}{h} \right]$$

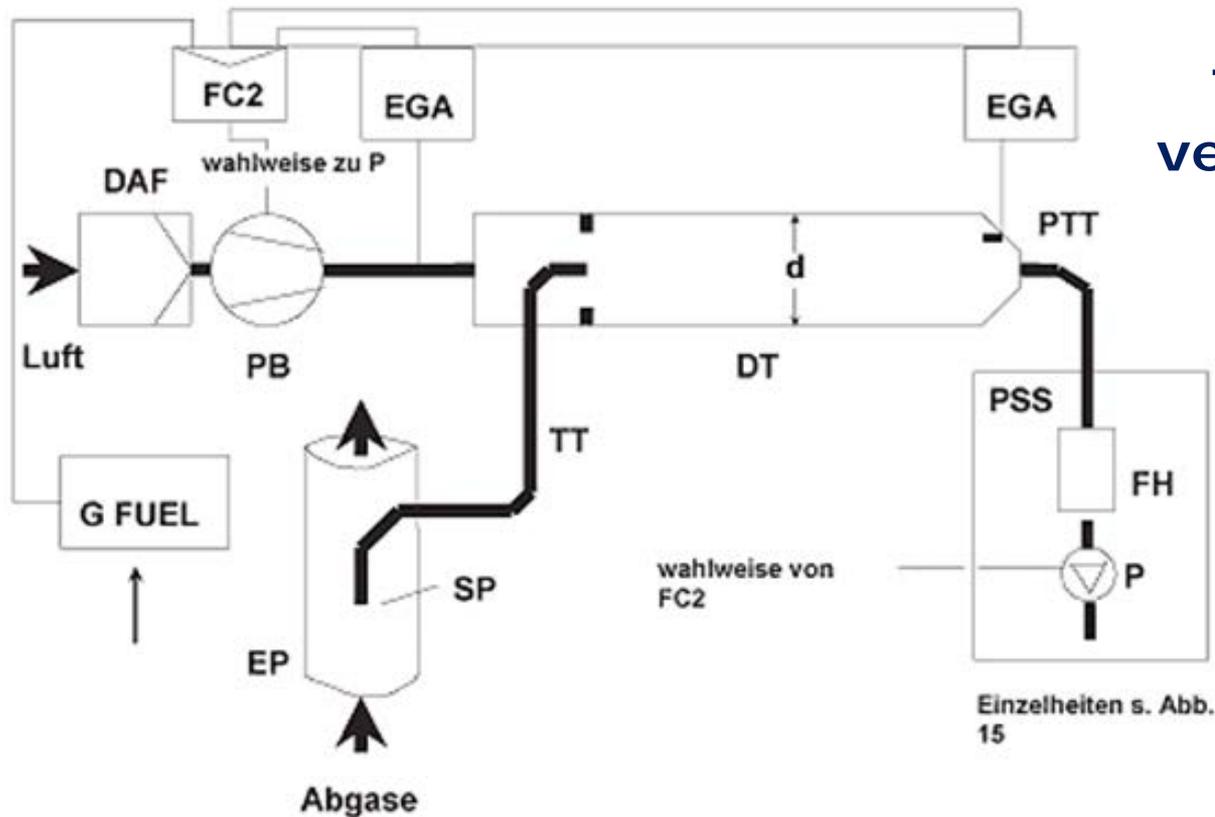
KF - Korrekturfaktor

11. Messvorschriften schwere LKW-Motoren



11. Messvorschriften schwere LKW-Motoren

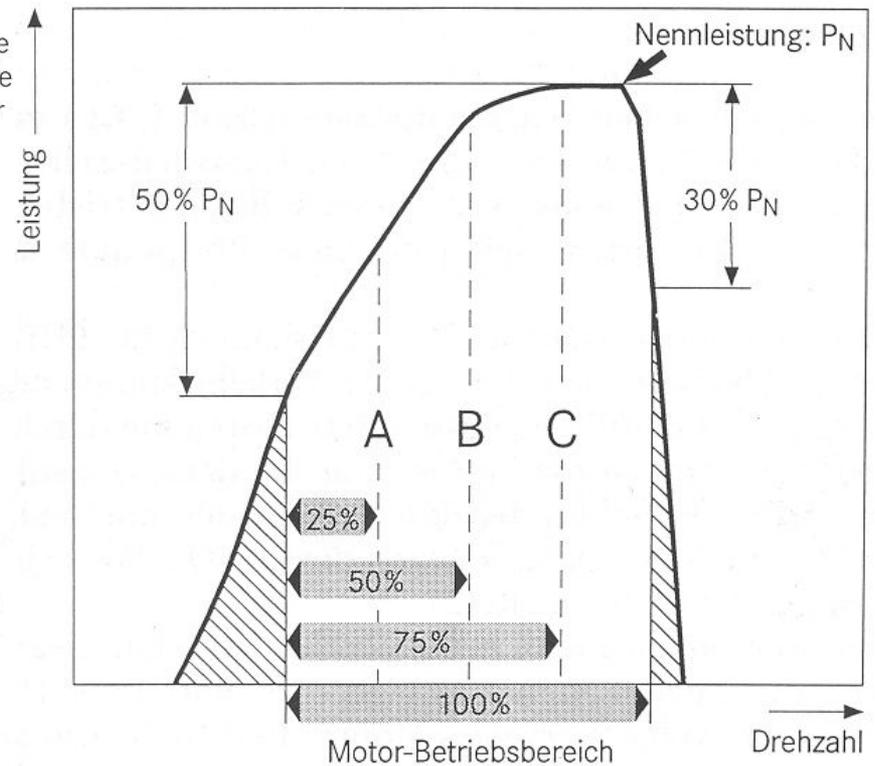
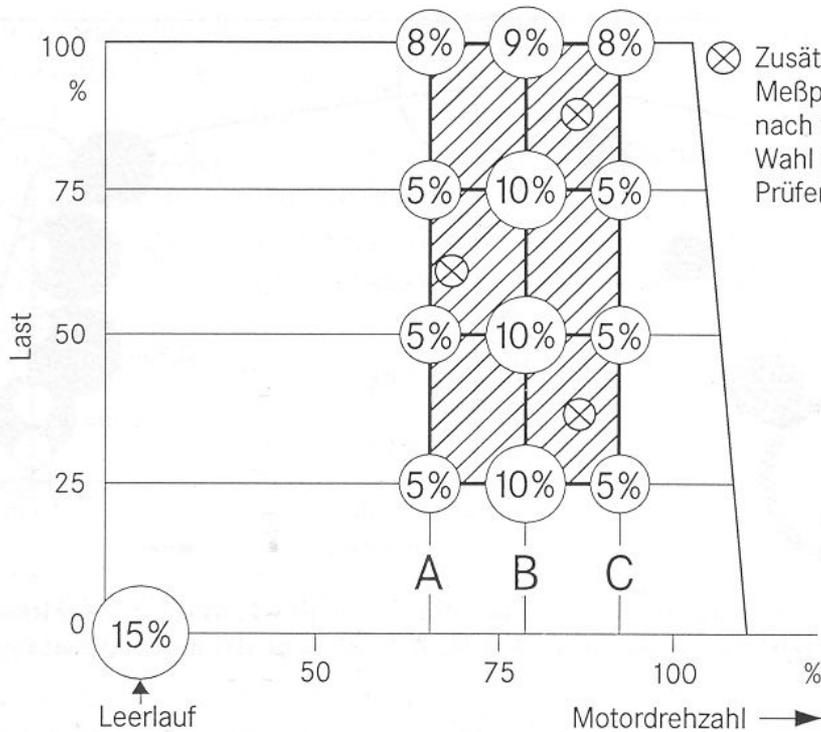
Partikelmessung: Bestimmung des Verdünnungsverhältnisses über zwei CO₂ Messungen



Teilstrom-
verdünnungs-
tunnel

11. Messvorschriften schwere LKW-Motoren

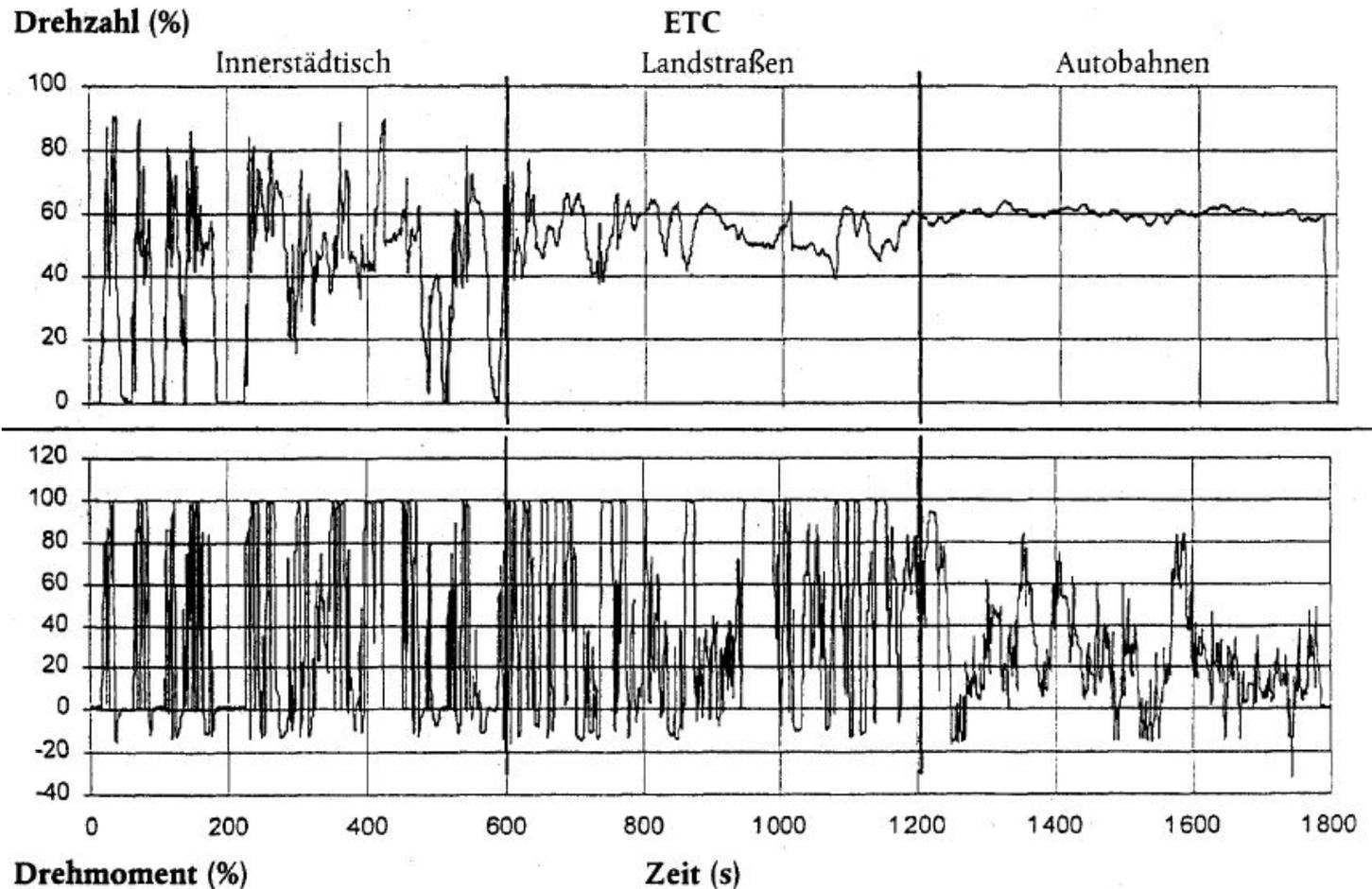
Festlegung der Messpunkte im
World harmonised Steady Cycle (WHSC) [13 stationäre Punkte]



Quelle: Basshuysen [4] Quelle: EG 595/2009

10. Messvorschriften LKW-Motoren

Festlegung der Messpunkte für ETC Euro 3 und 4





10. Messvorschriften LKW-Motoren

World harmonised transient Cycle (WHTC-Zyklus) Euro 5 und 6

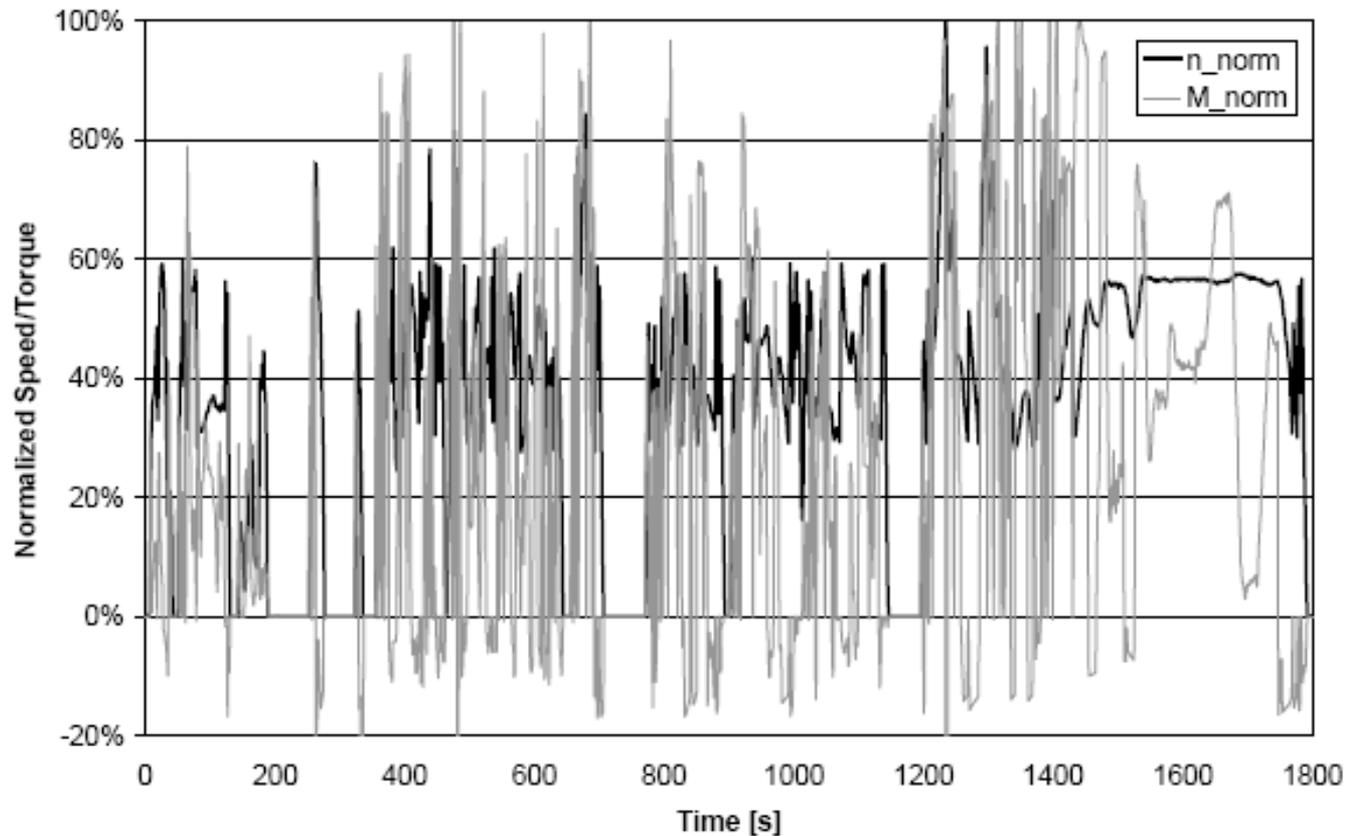


Figure 3:
WHTC test cycle

Quelle: EG 595/2009



Quellen

- [1] TA Luft
- [2] Bedienungsanleitungen der AVL für Messgeräte
- [3] Eichlseder: http://vkm-thd.tugraz.at/lehre/Thd_d_VM_2011/Block8.pdf
- [4] Basshuysen Handbuch Verbrennungsmotor Vieweg Verlag 2002
- [5] STZVO mit Erläuterungen
- [6] Richtlinie der EG 97/68/EG (Messungen stationärer Motoren)
- [7] Richtlinien der 595/2009 EG, 97/68 EG, 2004/26 EG; EG 2000/25 EG 2005/13 EG
- [8] EPA Nonroad Vorschrift 40 CFR 89; 40 CFR1068
- [9] Firma TSI Dokumentation CPC 3025°