

**T e c h n i s c h e
G r u n d l a g e**

für die Beurteilung von

**E m i s s i o n e n
a u s
S t a t i o n ä r m o t o r e n**

BMWA 2001

Diese Technische Grundlage wurde erstellt durch den

Arbeitskreis „Emissionen von Stationärmotoren“

Die vorliegende Technische Grundlage wurde von den Technischen Amtssachverständigen auf Grund ihrer Erfahrungen in gewerbebehördlichen Genehmigungsverfahren erarbeitet. Wo es als zweckdienlich erschien, wurden auch externe Experten gehört bzw. mit Detailfragen befasst.

Die Technische Grundlage bietet eine Zusammenfassung des für die Beurteilung des Sachgebietes notwendigen Basiswissens und gibt eine Übersicht über etwaig auftretende Gefahren, Emissionen oder Beeinträchtigungen und zeigt mögliche Abhilfemaßnahmen auf. Sie reflektiert die vielfältigen Erfahrungen einer langjährigen Verwaltungspraxis und dient dem Schutz von Personen und dem Schutz der Umwelt.

Die Technische Grundlage stellt die zu manchen Fragen zum Teil auch unterschiedlichen Auffassungen der technischen Amtssachverständigen auf eine gemeinsame Basis und ist grundsätzlich als Maximalbetrachtung des gestellten Themas zu sehen. Die in der Technischen Grundlage enthaltenen Inhalte sind daher nicht unbedingt in jeden Fall gegeben und vorgeschlagene Abhilfemaßnahmen sind nicht überall im gesamten Umfang notwendig. Andererseits können im Einzelfall vorliegende Umstände andere als in der Technischen Grundlage vorgesehene bzw. zusätzliche Maßnahmen rechtfertigen. Es obliegt daher dem technischen Amtssachverständigen im gewerbebehördlichen Genehmigungsverfahren, den jeweils konkret vorliegenden Sachverhalt nach den Erfordernissen des Einzelfalles zu beurteilen.

Der Technischen Grundlage kommt kein verbindlicher Charakter zu. Der Inhalt der Technischen Grundlage basiert auf dem zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung im Arbeitskreis verfügbaren Wissen.

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | EINLEITUNG | 6 |
| 2 | RECHTLICHE GRUNDLAGEN | 7 |
| 2.1 | Genehmigung der Anlagen in Österreich | 7 |
| 2.2 | Gewerbliches Betriebsanlagenrecht | 8 |
| 2.3 | Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz | 8 |
| 3 | MOTORTECHNISCHE GRUNDLAGEN..... | 9 |
| 3.1 | Berechnung der Leistung | 9 |
| 3.2 | Abgaskomponenten und deren Wirkung..... | 10 |
| 3.2.1 | Kohlenstoffmonoxid (CO)..... | 10 |
| 3.2.2 | Kohlenwasserstoffe (HC) | 10 |
| 3.2.3 | Stickstoffoxide (NO _x)..... | 10 |
| 3.2.4 | Partikel..... | 11 |
| 3.2.5 | Schwefeldioxid (SO ₂)..... | 11 |
| 3.3 | Emissionsverhalten | 11 |
| 4 | PROJEKTANGABEN | 13 |
| 4.1 | Emissionsdaten..... | 13 |
| 4.2 | Sonstige Angaben..... | 13 |
| 5 | BISHER VERWENDETE EMISSIONSVORSCHRIFTEN | 15 |
| 5.1 | Allgemeines..... | 15 |
| 5.2 | Bestimmungen in Österreich | 15 |
| 5.3 | Bestimmungen in Deutschland | 15 |
| 5.4 | Bestimmungen in der Schweiz | 17 |
| 5.5 | EU-Richtlinien..... | 18 |
| 6 | GRENZWERTEMPFEHLUNGEN FÜR GENEHMIGUNGSVERFAHREN..... | 20 |
| 6.1 | Emissionsbegrenzungen | 20 |
| 6.2 | Emissionsmessungen und Überwachung | 22 |
| 6.2.1 | Grundlagen | 22 |
| 6.2.1.1 | Vergleichbare gesetzliche Regelungen | 22 |
| 6.2.1.2 | Normative Grundlagen | 22 |
| 6.2.2 | Allgemeines | 23 |
| 6.2.3 | Durchführung der Überprüfungen und Emissionsmessungen..... | 24 |
| 6.2.3.1 | Befugte Sachverständige | 24 |
| 6.2.3.2 | Erstprüfungen | 24 |
| 6.2.3.2.1 | Typprüfung | 24 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 6.2.3.2.2 | Abnahmeprüfung und Anlagenbuch | 25 |
| 6.2.3.3 | Wiederkehrende Überprüfungen und Emissionsmessungen | 25 |
| 6.2.3.3.1 | Jährliche Überprüfungen | 25 |
| 6.2.3.3.2 | Wiederkehrende Emissionsmessungen für Brennstoffwärmeleistung über 1 MW | 26 |
| 6.2.3.3.3 | Kontinuierliche Messungen | 26 |
| 6.2.3.4 | Messtechnik und Messverfahren | 26 |
| 6.2.3.4.1 | Kontinuierliche Messung | 28 |
| 6.2.3.4.2 | Diskontinuierliche Messungen | 28 |
| 6.2.3.4.3 | Diskontinuierliche Messungen (Kurzzeitmessung, Kleinanlagen) | 29 |
| 6.2.4 | Zusammenfassung | 29 |
| 7 | TESTVORSCHRIFTEN UND ABGASGRENZWERTE | 31 |
| 7.1 | Allgemeines | 31 |
| 7.2 | ECE R49 13-Stufentest | 31 |
| 7.3 | ESC-, ELR- und ETC-Prüfzyklen | 32 |
| 7.4 | US-EPA Transient-Test | 35 |
| 7.5 | US-EPA Rauchttest | 36 |
| 7.6 | ECE R15-Test | 36 |
| 7.7 | ECE EUDC | 37 |
| 7.8 | US-EPA Rollenprüfstandtests | 37 |
| 7.9 | Stationärtests für Motoren für mobile Maschinen und Geräte | 37 |
| 8 | ENTSTEHUNG VON SCHADSTOFFEN | 39 |
| 8.1 | Herkunft unverbrannter Kohlenwasserstoffe im Motor | 39 |
| 8.2 | Entstehung der Partikel | 39 |
| 8.3 | Entstehung von Stickstoffoxiden | 40 |
| 8.3.1 | Brennstoff-NO | 40 |
| 8.3.2 | Promptes NO | 40 |
| 8.3.3 | Thermisches NO | 40 |
| 9 | ABGASNACHBEHANDLUNG | 41 |
| 9.1 | Nicht selektive katalytische Verfahren | 41 |
| 9.1.1 | Oxidationskatalysator | 41 |
| 9.1.2 | Drei-Wege-Katalysator | 41 |
| 9.2 | Selektive katalytische Reduktion | 42 |
| 9.2.1 | Reaktionen bei der selektiven katalytischen Reduktion | 42 |
| 9.2.2 | Katalysatoren | 43 |
| 9.2.3 | Verhalten der SCR-Katalysatoren im Motorbetrieb | 44 |
| 9.2.4 | HC-SCR Katalysatoren | 46 |
| 9.2.5 | Adsorberkatalysatoren | 46 |
| 9.3 | Rußreduktionssysteme | 47 |
| 9.3.1 | CRT Filter System (Continuous Regeneration Trap) | 48 |
| 9.3.2 | PSA Partikelfilter System | 49 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 10 | ABGASMESSDATEN | 50 |
| 10.1 | Allgemeines..... | 50 |
| 10.2 | Messergebnisse Salzburg..... | 50 |
| 10.2.1 | Dieselaggregat mit Abgasnachbehandlung | 50 |
| 10.2.1.1 | Messung 1997 bei ausgefallener Harnstoffeindüsung..... | 50 |
| 10.2.1.2 | Kontrollmessung 1999 mit instandgesetzter Harnstoffeindüsung..... | 51 |
| 10.2.2 | Dieselaggregate ohne Abgasnachbehandlung..... | 51 |
| 10.2.2.1 | Aggregat 1 | 51 |
| 10.2.2.2 | Aggregat 2 | 51 |
| 10.2.2.3 | Aggregat 3 | 52 |
| 10.2.3 | Gasmotoren in einer Kläranlage..... | 52 |
| 10.3 | Messergebnisse Wien..... | 52 |
| 10.3.1 | Dieselaggregat mit Abgasnachbehandlung | 52 |
| 10.3.1.1 | Forschungsinstitut, November 1995..... | 53 |
| 10.3.1.2 | Zivilingenieurbüro, Juni 1996 | 53 |
| 10.3.1.3 | Akkreditierte Versuchsanstalt, September 1997 | 53 |
| 10.3.1.4 | Büro für Umwelttechnik, Juni 1998 | 53 |
| 10.3.1.5 | Büro für Umwelttechnik, November 1998..... | 53 |
| 10.3.1.6 | Ziviltechnikerprüfungsgemeinschaft, Oktober 1998 | 54 |
| 10.3.2 | Dieselaggregate ohne Abgasnachbehandlung..... | 54 |
| 10.3.2.1 | Messung eines Iveco-Motors..... | 54 |
| 10.3.2.2 | Messung eines Volvo-Motors | 54 |
| 10.3.2.3 | Messung durch akkreditierte Prüfanstalt..... | 55 |
| 10.4 | Messergebnisse Tirol | 55 |
| 10.4.1 | Messungen an einem Dieselmotor | 55 |
| 10.4.2 | Messungen an einem Gas-Otto-Motor | 56 |
| 10.5 | Prüfstandsergebnisse..... | 56 |
| 10.5.1 | LKW-Motoren | 57 |
| 10.5.2 | PKW-Dieselmotoren | 58 |
| 11 | SCHALLEMISSION..... | 61 |
| 11.1 | Begriffsbestimmungen..... | 61 |
| 11.2 | Messverfahren | 61 |
| 11.3 | Geräuschquellen..... | 61 |
| 11.4 | Typische Emissionskennwerte | 62 |
| 11.5 | Gesetzliche Grenzwerte für Kraftstromerzeuger..... | 65 |
| 11.6 | Schallminderungsmaßnahmen | 65 |
| 11.6.1 | Motoroberfläche..... | 66 |
| 11.6.2 | Ansaugöffnung | 66 |
| 11.6.3 | Abgasaustrittsöffnung | 66 |
| 11.6.4 | Körperschallabstrahlung durch die Motorlagerung..... | 66 |
| 11.7 | Zukünftige Verminderung der Geräuschemission | 67 |
| 12 | LITERATUR | 68 |

1 Einleitung

Für ortsfest betriebene Verbrennungskraftmaschinen bestehen - abgesehen von den unter das Luftreinhaltegesetz für Kesselanlagen fallenden Motoren - keine Abgasgrenzwerte in Österreich. Die in Deutschland geltende TA-Luft oder die in der Schweiz verbindliche Luftreinhalteverordnung sind hierzulande nur beschränkt anwendbar. Die Gründe liegen in teilweise zu hohen oder zu restriktiven Grenzwerten oder an Leistungsgrenzen.

Im Rahmen der 28. Tagung der Technischen Amtssachverständigen im gewerbebehördlichen Genehmigungsverfahren (Oktober 1997) wurde deshalb angeregt, eine Beurteilungsgrundlage für die Emissionen von Stationärmotoren auszuarbeiten. Motoren sind häufig in gewerberechtlichen Genehmigungsverfahren von Blockheizkraftwerken, dezentralen Stromerzeugungsanlagen und mobilen Maschinen wie Häckslern, Brechern und dergleichen zu beurteilen.

Im Rahmen der vorliegenden Technischen Grundlage wird ein Überblick über derzeit existierende Testverfahren zur Zertifizierung von Verbrennungskraftmaschinen oder Fahrzeugen mit den zugehörigen Grenzwerten gegeben, soweit solche erlassen wurden. Die wichtigsten Schadstoffe werden beschrieben, und deren Entstehung wird kurz erläutert. Auf die Möglichkeiten der Abgasnachbehandlung wird eingegangen.

Abgasmessdaten und die Darstellung der Mechanismen der Schadstoffentstehung sollen helfen, die Bedeutung von Zertifizierungswerten unterschiedlicher Tests richtig zu interpretieren.

Es werden Empfehlungen für die Festlegung der Emissionsgrenzwerte und für deren Überwachung gegeben.

Abschließend wird auch die Schallproblematik behandelt. Es wird u.a. auf Messverfahren, Geräuschquellen, Emissionskennwerte und Schallminderungsmaßnahmen eingegangen.

Benzinbetriebene Ottomotoren werden in dieser Technischen Grundlage nicht behandelt, da die Einhaltung von Emissionsbestimmungen durch die CE-Kennzeichnung und die Konformitätserklärung als ausreichend angesehen wird.

2 Rechtliche Grundlagen

2.1 Genehmigung der Anlagen in Österreich

In der folgenden **Tabelle 2.1** wird überblicksartig dargestellt, welche Genehmigungsverfahren für die einzelnen Anlagentypen relevant sein können.

Tabelle 2.1: Genehmigungsverfahren

| | <i>Genehmigung nach:</i> | <i>Berücksichtigung von Emissionen aus Motoren:</i> |
|---------------------------------|--|--|
| gewerbliche Betriebsanlagen | GewO 1994 | § 77 Abs. 1 und 3 |
| | Bauordnung | nur indirekt über Immissionsschutz für Nachbarn |
| | LRG-K (in GewO-Verf. mitangew.) | nur mit Abhitzeessel |
| | El(W)G der Länder ¹ | teilweise subsidiär zu GewO, teilweise über Nachbarschutz |
| Öffentliche Gebäude, Wohnhäuser | Bauordnung | nur indirekt über Immissionsschutz für Nachbarn |
| Energieversorgungsunternehmen | GewO 1994, wenn gewerblich (siehe § 74 Abs. 5) | § 77 Abs. 1 und 3 |
| | El(W)G ¹ | teilweise subsidiär zu GewO, teilweise über Nachbarschutz |
| | LRG-K | nur mit Abhitzeessel |
| | Bauordnung | nur indirekt über Immissionsschutz für Nachbarn |
| Krankenhäuser, Altenheime | KAG | keine Emissionsvorschriften |
| | Bauordnung | nur indirekt über Immissionsschutz für Nachbarn |
| Deponien ² | GewO 1994 AWG DeponieVO WRG | §77 Abs. 1 und 3 Anwendung GewO, DeponieVO ... regelt Stand der Technik f. Ablagerungen subsidiär zur DeponieVO, regelt Anpassung bestehender Anlagen an DeponieVO |
| Klärgasanlagen | WRG | WRG regelt nur Abwasseremissionen |
| Landwirtschaftl. Betriebe | Bauordnung | nur indirekt über Immissionsschutz für Nachbarn |

¹ Siehe dazu § 67 Abs. 2 EIWOG.

² In diesem Zusammenhang sei der Vollständigkeit halber auf die §§ 2 Abs. 9 und 6 Abs. 3 AISAG hingewiesen (Deponiegaserfassung).

Gemäß § 77 Abs. 3 GewO 1994 müssen im gewerbebehördlichen Genehmigungsverfahren Emissionen von Luftschadstoffen jedenfalls nach dem Stand der Technik begrenzt werden.

In diesem Zusammenhang ist auch auf § 20 des **Immissionsschutzgesetzes-Luft (IG-L)** hinzuweisen. Demnach gilt die **Begrenzung der Emissionen von Luftschadstoffen nach dem Stand der Technik** auch für Anlagen, die nach anderen *bundesgesetzlichen* Vorschriften genehmigungspflichtig sind.

Ebenfalls hinzuweisen ist auf die **subsidiäre luftreinhaltrechtliche Genehmigungspflicht** nach § 21 IG-L für Anlagen, die keiner bundesgesetzlichen Genehmigungspflicht unterliegen, aber geeignet sind, erhebliche Mengen an Luftschadstoffen zu emittieren. Allerdings ist dazu die Erlassung einer DurchführungsVO nach § 21 Abs. 2 IG-L erforderlich.

2.2 Gewerbliches Betriebsanlagenrecht

Gewerbliche Betriebsanlagen dürfen nur mit Genehmigung der Behörde errichtet und betrieben werden, wenn sie u. a. wegen der Verwendung von Maschinen und Geräten (wie Stationärmotoren) geeignet sind, Leben und Gesundheit zu gefährden oder die Nachbarn durch Geruch, Lärm, Rauch, Staub, Erschütterungen oder in anderer Weise zu belästigen (§ 74 Abs 2 Z 1 und 2 GewO 1994).

Der Betriebsanlage ist u. a. die Genehmigung zu erteilen, wenn nach dem Stand der Technik und dem Stand der medizinischen und der sonst in Betracht kommenden Wissenschaften zu erwarten ist, dass voraussehbare Gefährdungen vermieden und Belästigungen überhaupt oder bei Einhaltung von Auflagen auf ein zumutbares Maß beschränkt werden (§ 77 Abs 1 GewO 1994).

Maßstäbe für die Zumutbarkeit der Belästigungen sind folgende objektive Kriterien (§ 77 Abs 2 GewO 1994):

- die Auswirkungen der durch die Betriebsanlage erfolgten Änderungen auf die örtlichen Verhältnisse;
- die Auswirkungen auf den gesunden, normal empfindenden Erwachsenen und das gesunde, normal empfindende Kind.

Die Forderung des § 77 Abs. 3 GewO 1994, wonach Emissionen von Luftschadstoffen jedenfalls nach dem Stand der Technik zu begrenzen sind, bedeutet, dass die Begrenzung der Luftschadstoffe nach dem Stand der Technik auch dann vorzuschreiben ist, wenn dies im Hinblick auf den Nachbarnschutz gar nicht erforderlich wäre. Eine über den Stand der Technik hinausgehende Beschränkung von Luftschadstoffen ist jedoch dann möglich, wenn der Schutz der Gesundheit und die Zumutbarkeit von Nachbarbelästigungen nur so gewährleistet werden kann.

2.3 Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz

Das ElWOG, BGBl. I Nr. 143/1998, ist hinsichtlich der Grundsatzbestimmungen mit 19. August 1998 in Kraft getreten (§ 67 Abs. 1). § 12 Abs. 2 ElWOG normiert, dass die Ausführungsgesetze der Länder vorsehen können, dass bestimmte Stromerzeugungsanlagen (KWK, elektrische Energie aus erneuerbaren Energien oder Abfällen) bis zu einer bestimmten Leistung einem vereinfachten Verfahren oder einem Anzeigeverfahren zu unterziehen sind. Ausdrücklich wird in § 12 Abs. 2 zweiter Satz festgelegt, dass eine Bewilligungspflicht nach ElWOG im Hinblick auf nach der GewO 1994 bewilligungs- oder anzeigepflichtige Anlagen nur subsidiär gilt.

3 Motortechnische Grundlagen

3.1 Berechnung der Leistung

Für Viertaktmotoren wird die an der Kurbelwelle anliegende Leistung aus dem effektiven Mitteldruck beziehungsweise aus dem Drehmoment wie folgt berechnet:

$$P_e = \frac{n \cdot V_H \cdot p_e}{1200} \quad (1)$$

beziehungsweise

$$P_e = \frac{M_d \cdot \pi \cdot n}{30.000} \quad (2)$$

mit

P_e effektive Leistung [kW]
 n Motordrehzahl [U/min]
 V_H Hubvolumen des Motors [dm³]
 p_e effektiver Mitteldruck [bar]
 M_d effektives Drehmoment [Nm].

Der effektive Mitteldruck ist der Effektivwert jenes Druckes, der während des Arbeitshubes am Kolben anliegt.

Das Drehmoment an der Kurbelwelle eines Viertaktmotors ergibt sich gemäß nachstehender Gleichung:

$$M_d = \frac{V_H \cdot p_e \cdot 100}{4 \cdot \pi} \quad (3)$$

mit

M_d effektives Drehmoment [Nm]
 V_H Hubvolumen des Motors [dm³]
 p_e effektiver Mitteldruck [bar].

Für Zweitaktmotoren sind die Ergebnisse gemäß (1) und (3) zu verdoppeln.

Die Brennstoffwärmeleistung kann mit Hilfe des effektiven Wirkungsgrades berechnet werden:

$$\dot{Q}_B = \frac{P_e}{\eta_e} \quad (4)$$

mit

\dot{Q}_B Brennstoffwärmeleistung [kW]
 P_e effektive Leistung [kW]
 η_e effektiver Wirkungsgrad.

3.2 Abgaskomponenten und deren Wirkung

Bei der vollkommenen Verbrennung des Treibstoffes (Benzin, Diesel) in Verbrennungsmotoren wird **Kohlenstoffdioxid (CO₂)** und **Wasserdampf (H₂O)** gebildet. Neben diesen ungiftigen Hauptbestandteilen des Abgases werden folgende Schadstoffe gebildet:

3.2.1 Kohlenstoffmonoxid (CO)

Kohlenstoffmonoxid CO ist ein geruchloses, farbloses Gas. CO entsteht bei Verbrennungen unter Luftmangel, wie dies in gewissen Bereichen des Zylinders oft der Fall ist. Es hat zum Blutfarbstoff Hämoglobin (zuständig für den Sauerstofftransport) eine bis zu 300 mal höhere Affinität als Sauerstoff. Es behindert daher den Sauerstofftransport im Blut und damit die Sauerstoffversorgung des Körpers. CO wirkt besonders auf das Zentralnervensystem und das Herz-Kreislauf-System. Symptome schwacher CO-Einwirkung sind Kopfschmerzen, Ermüden, Benommenheit, Nachlassen der Willenskraft, Störung des Wach/Schlafrhythmus. Starke CO-Einwirkung kann zum Tod führen.

3.2.2 Kohlenwasserstoffe (HC)

Bei der unvollkommenen Verbrennung des Treibstoffes bildet sich eine Vielzahl von Kohlenwasserstoffverbindungen. Diese können grob in aliphatische (Alkane, Alkene und Alkine) und zyklische Kohlenwasserstoffe unterteilt werden. Während die aliphatischen Verbindungen beim Verbrennungsmotor kaum eine Rolle spielen, kommt den zyklischen Verbindungen (z.B. Benzol, Toluol, Xylol) und insbesondere den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) eine besondere Bedeutung zu. Gesundheitlich bedeutend sind vor allem Benzol und PAH.

Benzoldampf wird über den Atemtrakt aufgenommen und kann sich bei chronischer Einwirkung im Fettgewebe und im Knochenmark anreichern. Blutbildende Systeme und Leber können geschädigt werden. Benzol ist krebserregend.

PAH steht für mehr als 100 Verbindungen, die oft an Staubteilchen adsorbiert sein können (Dieselruß). Einige PAH sind krebserregend. Als Leitsubstanz für die PAH wird meist Benzo(a)pyren (BaP) verwendet.

3.2.3 Stickstoffoxide (NO_x)

Stickstoffoxide entstehen bei Luftüberschuss durch Oxidation von Stickstoff bei sehr hohen Temperaturen. Im Motor wird fast nur Stickstoffmonoxid (NO) erzeugt, das in der Atmosphäre sehr rasch zu NO₂ oxidiert. Dieses wird durch Photolyse teilweise wieder gespalten. NO_x (NO und NO₂) gehören zu den Vorläufersubstanzen des bodennahen Ozons.

Hochkonzentriertes NO₂ ist ein braunes Gas mit beklemmend wirkendem Geruch. Bei längerer Einwirkung tritt ein Gewöhnungseffekt ein, sodass die Warnwirkung durch den Geruch wegfällt. NO₂ ist ein Reizgas für den Atemtrakt und ist in den Schleimhäuten löslich. Es bewirkt eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Krankheitserregern im Atemtrakt.

3.2.4 Partikel

Partikel in signifikantem Ausmaß werden nur von Dieselmotoren emittiert. Daher existieren derzeit weltweit nur für Dieselmotoren gesetzliche Limits für diesen Schadstoff.

Unter Partikel im Sinne der Gesetzgeber ist die Gesamtheit jener Materie zu verstehen, die sich mittels eines definierten Filters im verdünnten Abgasstrom auf dem Motor- oder Rollenprüfstand auffangen lässt. Der Begriff Partikel steht also für ein Konglomerat verschiedener Substanzen wie Ruß, unverbrannte höhersiedende Kohlenwasserstoffe, anorganische Verbindungen (wie z.B. Salze), Wasser und Abriebmetalle. Die Gefährlichkeit von Dieselruß liegt in der Lungengängigkeit (Durchmesser der Rußpartikel von 50 nm bis 1 µm).

3.2.5 Schwefeldioxid (SO₂)

Schwefel ist als unerwünschte Komponente im Kraftstoff enthalten und oxidiert im Motor hauptsächlich zu SO₂. Wegen des niedrigen Schwefelgehaltes der Treibstoffe ist die SO₂-Emission bei Verbrennungsmotoren jedoch als sehr gering zu bezeichnen.

3.3 Emissionsverhalten

Aus Messungen sind folgende grundsätzliche Zusammenhänge für die Schadstoffemissionen abzuleiten:

Mit zunehmender Last steigt bei konstanter Drehzahl die Stickstoffoxid-Emission. Dies wird durch höhere NO-Konzentrationen bei höheren Verbrennungstemperaturen und bei aufgeladenen Motoren durch gesteigerten Abgasmassenstrom hervorgerufen.

Bei konstanter Last (Mitteldruck, Drehmoment) nimmt der Ausstoß an Stickstoffoxid mit steigender Drehzahl meist zu. Ausschlaggebend ist hier die Zunahme des Abgasmassenstromes.

Mit zunehmender Last ist eine Abnahme der Emission unverbrannter Kohlenwasserstoffe festzustellen. Dies ist auf das steigende Temperaturniveau im Zylinder zurückzuführen. Bei lambdage regelten Ottomotoren und Magermotoren kann es in der Nähe der Volllast zu einem erneuten Ansteigen kommen, wenn in diesem Lastbereich eine Anfettung des Gemisches vorgenommen wird.

Bei konstanter Last und unterschiedlichen Drehzahlen ist keine eindeutige Aussage bezüglich der Emission unverbrannter Kohlenwasserstoffe möglich. Tendenziell ist jedoch mit einem Ansteigen der Massenemission mit steigender Drehzahl zu rechnen.

Kohlenstoffmonoxid wird wegen Verbrennung bei Luftmangel in signifikantem Ausmaß bei Dieselmotoren bei niedriger Drehzahl in der Nähe der Volllast gebildet. Lambdageregelte Ottomotoren können bei unterstöchiometrischer Gemischbildung ebenfalls erhöhten CO-Ausstoß aufweisen.

Eine ausgeprägte Drehzahlabhängigkeit der CO-Emission bei konstanter Last ist nicht eindeutig zu erkennen. Bei Dieselmotoren sind der Luftüberschuss und der Einspritzdruck bei niedrigen Volllastdrehzahlen geringer als im oberen Drehzahlbereich, was höhere CO-Konzentrationen im Abgas zur Folge hat. Da aber der Abgasmassenstrom mit der Drehzahl zunimmt, ist eine gegen-

über niedrigen Drehzahlen höhere Massenemission möglich. Dies gilt speziell für hochaufgeladene Motoren.

Partikel sind bekanntlich zu wesentlichen Teilen aus unverbrannten Kohlenwasserstoffen und aus Ruß (wegen Verbrennung unter Luftmangel) zusammengesetzt. Somit gelten die für CO und HC festgestellten Zusammenhänge sinngemäß auch für Partikel.

Es sei betont, dass die genannten Abhängigkeiten nicht in jedem Fall zutreffend sind. Die Möglichkeit, mittels moderner Motorelektronik Zünd- bzw. Einspritzzeitpunkte für jeden Lastpunkt im Kennfeld individuell einstellen zu können, kann zu Ergebnissen führen, die den oben dargelegten Erkenntnissen widersprechen. Zusätzliche Freiheitsgrade in der Emissionsoptimierung ergeben sich durch die Möglichkeit, den Einspritzverlauf zu formen ("rate shaping"), den Luftmassenstrom zu kontrollieren (Turbolader mit verstellbaren Leitschaufeln, elektronisch angesteuerte Abblaseventile) und Abgas in nahezu beliebigen Raten in den Ansaugtrakt zu rezirkulieren.

In **Bild 3.1** sind grundsätzliche Abhängigkeiten in Form grober Näherungswerte dargestellt.

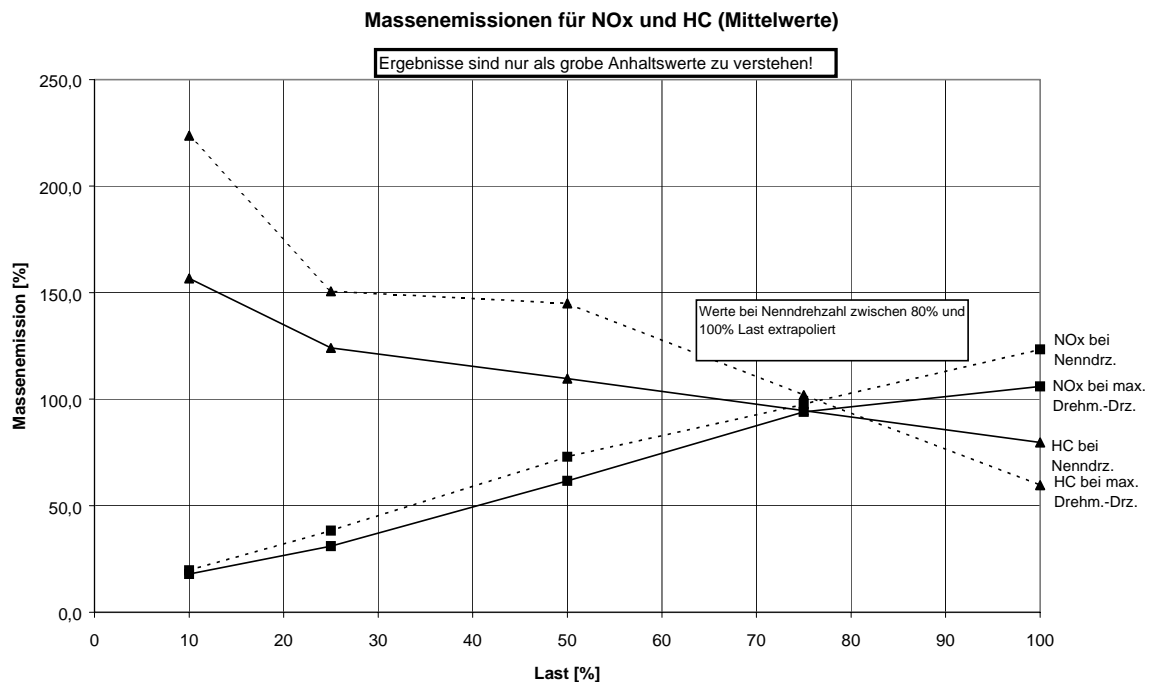


Bild 3.1: Anhaltswerte für Abhängigkeiten der Schadstoffemissionen

Bei Kenntnis des Emissionsverhaltens in einem einzigen Betriebspunkt oder aufgrund eines Testergebnisses (z.B. ECE R49-Test) ist es nur bedingt möglich, auf einzelne Lastpunkte zu schließen.

Weitere Ausführungen betreffend das Emissionsverhalten und die Entstehung von Schadstoffen können dem Abschnitt 8 entnommen werden.

4 Projektangaben

4.1 Emissionsdaten

Folgende Angaben sind für Partikel, CO, NO_x als NO₂, bei Gasmotoren zusätzlich für NMHC (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe) erforderlich:

- Massenkonzentrationen in mg/m³ bezogen auf 5 Vol-% O₂ und Normzustand sowie
- Massenströme in kg/h.

Für Motoren, die zur Kraftstromerzeugung herangezogen werden, sind die Emissionsdaten für die maximale Leistung bei Betriebsdrehzahl anzugeben, sie arbeiten üblicherweise mit einer Betriebsdrehzahl von 750, 1500 oder 3000 U/min bei 50 Hz.

Für alle anderen Stationärmotoren, wie z.B. Brecher-, Häckslerantrieb u.ä. sind die Emissionsdaten bei Nennleistung anzugeben. Weicht die Betriebsdrehzahl um mehr als 30 % von der Nenn-drehzahl ab, sind die Emissionsdaten des jeweiligen Betriebspunktes vorzulegen.

- Die Umrechnung von g/kWh (mechanische Arbeit) auf mg/m³ kann für Dieselmotoren wie folgt abgeschätzt werden:

$$1 \text{ g/kWh} \approx 365 \text{ mg/m}^3$$

So entsprechen beispielsweise 5 g/kWh CO etwa einem Wert von 1825 mg/m³ CO.

4.2 Sonstige Angaben

- Brennstoffwärmeleistung;
- Betriebsart (Spitzenlast, Dauerbetrieb, Betriebszeiten);
- Angaben zum Kraftstoff (Bezeichnung, Bezugsnorm, bei nicht normgerechten Kraftstoffen die chemische Zusammensetzung, Verbrauch in kg/h);
- Form und Betriebsart der Abwärmenutzung;
- Betriebstemperatur (Vorwärmung ja/nein);
- Wartungsplan für das Aggregat;
- Angaben zur Probenahmestelle für die Emissionsmessung;
- Abgasführung vom Motor bis zur Ausblasöffnung, Ausblasgeschwindigkeit und -richtung, Abgasvolumenstrom, Abgastemperatur;
- Art und Ort der Aufstellung (im Freien, im Container, usw.);
- Schallemissionen und Schallschutzmaßnahmen;
- Bei Substitution von Feuerstätten durch Abwärmenutzung allenfalls Angaben darüber, welche Emissionen durch das Aggregat wegfallen.

Bei Stationärmotoren können näherungsweise die in **Tabelle 4.1** angeführten Umrechnungsfaktoren verwendet werden.

Tabelle 4.1: Umrechnungsfaktoren Leistungsgrößen/Brennstoffverbrauch

| ↔Ergebnis↔ ↓Angabe↓ | kVA | kW(BWL) | kW(mech) | Dieserverbrauch l/h | Erdgasverbrauch m ³ /h |
|--|------|---------|----------|------------------------|--------------------------------------|
| kVA | 1 | 2,6 | 1,05 | 0,26 | 0,39 |
| kW(BWL) | 0,38 | 1 | 0,4 | 0,1 | 0,1 |
| kW(mech) | 0,95 | 2,5 | 1 | 0,25 | 0,37 |
| Diesel- verbrauch ³ l/h | 3,9 | 10 | 4 | 1 | ---- |
| Erdgas- verbrauch ⁴ m ³ /h | 2,56 | 10 | 2,7 | ---- | 1 |

³ Dieseldiesellostoff: Dichte = 0,83 kg/l, H_u = 42.700 kJ/kg;

Multiplikationsfaktoren hängen vom Gesamtwirkungsgrad ab (hier: $\eta_{\text{eff}} = 40\%$).

⁴ Erdgas als Kraftstoff: Dichte = 0,72 kg/m³_n, H_u = 36.000 kJ/m³_n;

Multiplikationsfaktoren hängen vom Gesamtwirkungsgrad ab (hier: $\eta_{\text{eff}} = 27\%$).

5 Bisher verwendete Emissionsvorschriften

5.1 Allgemeines

In den nachstehenden Abschnitten werden die einschlägigen Regelungen über Emissionsbegrenzungen bei stationären Motoren in Österreich, in Deutschland und in der Schweiz sowie die EU-Vorschriften dargelegt. Zu beachten ist, dass der Regelungsumfang und auch der Leistungsbegriff unterschiedlich sind. Siehe auch Band 4/1999 der Schriftenreihe des BMUJF /5.1/.

5.2 Bestimmungen in Österreich

In § 21a Abs. 2 der Luftreinhalteverordnung für Kesselanlagen 1989 (LRV-K), BGBl.Nr. 19/1989, in der Fassung BGBl. II Nr. 324/1997, sind Emissionsgrenzwerte für Dampfkesselanlagen, die mit Abgasen von Kolbenmaschinen für konventionelle flüssige oder gasförmige Brennstoffe beheizt werden, angegeben. Da die Abgase von stationären Motoren eher selten zur Dampferzeugung verwendet werden, trifft diese allgemein verbindliche Vorschrift nur in wenigen Fällen zu.

Table 5.1: Emissionsgrenzwerte⁵ für mit Abgasen von Kolbenmaschinen beheizte Dampfkesselanlagen nach § 21a Abs. 2 der LRV-K

| | |
|---|-------------------------|
| <u>Staub</u> | |
| flüssige Brennstoffe | 80 mg / m ³ |
| gasförmige Brennstoffe (Rechenwert) | 5 mg / m ³ |
| <u>Kohlenstoffmonoxid (CO)</u> | |
| flüssige und gasförmige Brennstoffe | 500 mg / m ³ |
| <u>Stickstoffoxid (NO_x angegeben als NO₂)</u> | |
| Selbstzündungsmotoren | 500 mg / m ³ |
| Fremdzündungsmotoren | 350 mg / m ³ |

5.3 Bestimmungen in Deutschland

Die TA-Luft enthält die Vorschriften zur Reinhaltung der Luft und deren Überwachung, die von den Genehmigungs- und Überwachungsbehörden als den für die Umsetzung des Immissions-schutzes zuständigen Behörden unter anderen in Genehmigungsverfahren für genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) beachtet werden müssen. Gemäß der 4. BImSchV (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen vom 24. Juli 1985, zuletzt geändert durch Verordnung vom 20. April 1998) benötigen folgende Verbrennungsmotoranlagen (Nr. 1.4 der 4. BImSchV) eine Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutzgesetz:

„Verbrennungsmotoranlagen für den Einsatz von Altöl, Deponiegas, Klärgas, Biogas aus der Landwirtschaft und der Abfallvergärung mit einer Feuerungswärmeleistung über 350 kW

oder

anderen brennbaren Stoffen (...) mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 Megawatt oder mehr, ausgenommen Verbrennungsmotoranlagen für Bohranlagen und Notstromaggregate.“

⁵ Bezogen auf 5 % Volumenkonzentration Sauerstoff im Verbrennungsgas.

In den Erläuterungen zur 4. BImSchV wird ausgeführt, inwieweit zwei Aggregate mit einer Leistung von jeweils weniger als 1 MW zwecks Ermittlung der Genehmigungsbedürftigkeit zusammenzufassen sind, wenn ein Aggregat für seltene Notfälle bereitgehalten wird.

Gemäß Erläuterungen sind bei Verbrennungsmotoranlagen mit mehreren Diesellaggregaten, die nur zusammen die Leistungsschwelle unter Nr. 1.4 überschreiten, die Einzelleistungen auch zusammenzuzählen, wenn ein Motor nur für den seltenen Fall des Ausfalls der öffentlichen Stromversorgung bereitgehalten wird. Für die Frage der Leistungsaddition kommt es nicht auf die Häufigkeit oder Seltenheit des Einsatzes des Hilfsmotors an, sondern darauf, ob die Motoren in den Einsatzfällen gleichzeitig in Betrieb sein können und dürfen. Wenn dies der Fall ist, findet eine Addition statt.

Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, TA-Luft 1986, enthält in Nr. 3.3.1.4.1 für Verbrennungsmotoranlagen spezielle Anforderungen.

Table 5.2: Emissionswerte der TA-Luft für Verbrennungsmotoren
(bez. auf 5 % O₂-Gehalt)

| Feuerungs- wärmeleistung | Selbstzündung | | Fremdzündung | |
|------------------------------------|---------------|--------|---------------|---------------|
| | < 3MW | > 3MW | Viertaktmotor | Zweitaktmotor |
| Staub mg/Nm ³ | 130* | | | |
| CO mg/Nm ³ | 650 | | | |
| NO _x mg/Nm ³ | 4000** | 2000** | 500 | 800 |

* darüberhinaus ist der Einsatz von Rußfiltern anzustreben.

** bei Selbstzündungsmotoren sind die Möglichkeiten, die Emissionen durch motorische und andere dem Stand der Technik entsprechende Maßnahmen weiter zu vermindern, auszuschöpfen.

Neben der speziellen SO₂-Begrenzung beim Einsatz flüssiger Brennstoffe (Begrenzung des Schwefelgehaltes nach DIN 51603 Teil 1, Ausgabe 1981) gilt für gasförmige Treibstoffe der SO₂-Emissionsgrenzwert von 500 mg/m³ nach Nr. 3.1.6, sofern der Emissionsmassenstrom 5 kg/h erreicht wird.

Bei Einsatz von Deponiegasen können von den Anforderungen der Nr. 3.1.5 (dampf- oder gasförmige anorganische Stoffe) TA Luft noch die Emissionsgrenzwerte für Halogenverbindungen bedeutsam sein [Technischer Kommentar TA Luft, 1986].

Für organische Stoffe nach Nr. 3.1.7 können emissionsbegrenzende Anforderungen am ehesten für Aldehyde (Klasse I, 20 mg/m³) oder Paraffinkohlenwasserstoffe (Klasse III, 150 mg/m³) gelten, wobei Methan ausgenommen ist. Bei Einsatz von halogenhaltigen Deponiegasen ist zusätzlich darauf zu achten, dass z.B. im Hinblick auf Dioxine das Minimierungsgebot nach Nr. 3.1.7 Abs. 7 erfüllt ist (In der 17. BImSchV wird ein Grenzwert von 0,1 ng TE/m³ angegeben). Das Minimierungsgebot nach Nr. 2.3 Abs. 1 für krebserzeugende Stoffe, z.B. Benz(a)pyren, ist insbesondere bei Dieselmotoren zu beachten [Technischer Kommentar TA Luft, 1986].

Der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) hat zur Konkretisierung der in der TA-Luft enthaltenen Dynamisierungsklauseln im Hinblick auf einen bundeseinheitlichen Vollzug nachfolgende Empfehlungen beschlossen. Die Empfehlungen des LAI wurden von den Bundesländern umgesetzt. Dabei wird unterschieden zwischen Zielwerten, die im Einzelfall je nach Mög-

lichkeit der technischen Maßnahme erreicht werden sollten, und konkreten Emissionswerten, die von den Behörden bindend vorgeschrieben werden sollen.

Tabelle 5.3: Konkretisierung der Dynamisierungsklauseln vom Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) (bez. auf 5 % O₂-Gehalt)

| | Gasbetriebene Zündstrahlmot. | Sonstige Motoren | | | |
|------------------------------------|------------------------------|------------------|-----------|------------|------------|
| | | < 1000 kW | > 1000 kW | Notstrom | Altanlagen |
| Feuerungswärmeleistung | | | | | |
| NO _x mg/Nm ³ | 500 | 1000 (Zielwert*) | | | |
| Staub mg/Nm ³ | 50 | 80 (ZW**) | 50 (ZW**) | 80 (ZW***) | 130 |

* Zielwert; insbesondere durch den Einsatz von SCR soweit wie möglich anzustreben.

** Zielwert; durch motorische Maßnahmen. Der Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben.

*** Zielwert; durch motorische Maßnahmen anzustreben.

Hinsichtlich der NO_x-Begrenzung werden Altanlagen wie Neuanlagen behandelt.

In Bayern sind laut Bayrischem Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen 20 mg/Nm³ Staub als Zielwert angestrebt.

Bei Notstromaggregaten wurden bisher in Bayern 2000 mg/Nm³ für NO_x und 130 mg für Staub vorgeschrieben.

Laut mündlicher Auskunft des Bayrischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen werden in Bayern für Dieselmotoren > 1 MW Grenzwerte vorgeschrieben, die den Einsatz von SCR und Rußfiltern erfordern.

Soweit Zielwerte angegeben sind, sollen die zuständigen Behörden im Rahmen von Genehmigungsverfahren und im Zuge der Anhörung beim Erlass von Ordnungsverfügungen ermitteln, welche der technischen Maßnahmen im Einzelfall anwendbar sind, um den Zielwert möglichst zu erreichen [Die neue TA Luft; Teil 11/3 Dynamisierungsklauseln in der TA Luft; WEKA, Augsburg].

5.4 Bestimmungen in der Schweiz

In der Schweiz werden die Emissionen von stationären Motoren grundsätzlich in der Schweizer Luftreinhalteverordnung SR 814. 318.142.1 vom 16. Dezember 1985 geregelt. Mit 15. Dezember 1997 wurde die LRV geändert, wobei auch die Emissionsvorschriften für stationäre Motoren betroffen sind. Die Änderung ist am 1. März 1998 in Kraft getreten. Die Emissionen von stationären Verbrennungsmotoren werden in Ziffer 82 geregelt. Ausgenommen von den Emissionsvorschriften werden Anlagen zur Deckung des Notstrombedarfs, der in der Schweiz mit einer maximalen Betriebsstundenanzahl von 50 Stunden pro Jahr begrenzt ist. Für diese Verbrennungsmotoren von Notstromgruppen, die während höchstens 50 Stunden pro Jahr betrieben werden, legt die Behörde die vorsorglichen Emissionsbegrenzungen nach Artikel 4 fest; Absatz 1 und Anhang 1 gelten nicht.

In der folgenden **Tabelle 5.4** werden sowohl die aktuellen als auch die außer Kraft getretenen Emissionsvorschriften dargestellt:

Tabelle 5.4: Schweizer Luftreinhalteverordnung für Verbrennungsmotoren
(bez. auf 5 % O₂-Gehalt)

| | Außer Kraft seit 1. März 1998 | | In Kraft seit 1. März 1998 | |
|---------------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|-----------------------|
| | Fremdzündung | Selbstzündung | | |
| Brennstoffverbrauch | > 10 kg/h | | > 50 kg/h | |
| Leistung | | | > 100 kW _{therm} | |
| | Deponie*- Klär- u. Biogas | Erdgas | Deponie*- Klär- u. Biogas | andere Brennstoffe |
| Staub | 100 | | 50 | |
| CO | 650 | | 650 | |
| NO ₂ | 400 | 80 | 400 | 400** |

* sofern deren Gehalt an anorganischen und organischen Chlor- und Fluorverbindungen, angegeben als Chlor- und Fluorwasserstoff, zusammen 50 mg/m³ nicht überschreitet.

** wenn die Anlage jährlich mindestens zu 80 Prozent mit diesen Stoffen betrieben wird.

Bemerkenswert für die neue Emissionsvorschrift ist, dass man den Grenzwert für NO_x bei Erdgasmotoren von 80 mg/Nm³ auf 250 mg/Nm³ angehoben hat (bez. auf 5 % O₂-Gehalt). Dadurch wird in der Schweiz der Magermotorbetrieb ohne Katalysator grundsätzlich ermöglicht. Auch die Werte für Sondergase sind ohne Katalysatoren erreichbar. Dieselmotoren über 50 Betriebsstunden und Feuerungswärmeleistung über 100 kW benötigen hingegen durchwegs SCR-Katalysatoranlagen.

Die generelle Erhöhung des NO_x-Grenzwertes für Erdgasmotoren durch die Novellierung der Schweizer Luftreinhalteverordnung wird jedoch dadurch relativiert, dass in vielen Kantonen ein niedrigerer Emissionsgrenzwert weiterhin gilt, wie nachfolgender **Tabelle 5.5** zu entnehmen ist.

Tabelle 5.5: Stickstoffoxidgrenzwerte einiger Regionen in der Schweiz
(bez. auf 5 % O₂-Gehalt)

| | Stickstoffoxid Grenzwert |
|--|-----------------------------|
| Stadt Zürich | 50 mg/Nm ³ |
| Kanton Zürich Land, Region Bern, Biel, Thun, Langenthal, Region St. Gallen, Rohrschach, Linthgebiet, Wil | 120 mg/Nm ³ |
| Stadt Basel, Bezirke Arlesheim und Liestal | 110 mg/Nm ³ |

5.5 EU-Richtlinien

Im EU-Raum existieren für unterschiedliche Anwendungen diverse Richtlinien zur Begrenzung von Schadstoffemissionen aus Verbrennungsmotoren. Für Nutzfahrzeuge mit Diesel- oder Gasmotoren (Masse > 3,5 t) gilt die Richtlinie 88/77/EWG, zuletzt geändert durch Richtlinie 1999/96/EG vom 13. Dezember 1999 /7.2/.

Die Richtlinie 97/68/EG vom 16. Dezember 1997 /7.5/ regelt die Schadstoffemissionen aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. Stromerzeugungsaggregate sind von den Bestimmungen dieser Richtlinie ausgenommen.

Derzeit existieren für Stromerzeugungsanlagen im EU-Raum keine Grenzwerte.

6 Grenzwertempfehlungen für Genehmigungsverfahren

6.1 Emissionsbegrenzungen

Für in Österreich neu zu genehmigende Anlagen werden die in **Tabelle 6.1** genannten Emissionsgrenzwerte vorgeschlagen.

Die in dieser **Tabelle 6.1** angeführten Leistungen sind jeweils als Gesamtleistung einer Anlage zu verstehen, die aus mehreren Motoren bestehen kann, die in einem engen örtlichen Zusammenhang stehen und gleichzeitig betrieben werden können.

Hinsichtlich der erforderlichen Emissionsdaten siehe Abschnitt 4.

Notstromaggregate sind Motoren mit weniger als 50 Betriebsstunden im Jahr, wobei Probeläufe nach Betriebsanleitung nicht zu den Jahresstunden gerechnet werden.

Die mechanische Motorleistung ist die gemäß Richtlinie 80/1269/EWG, Anhang I, zuletzt geändert durch Richtlinie 1999/99/EG, ermittelte mechanische Motorleistung von Selbstzündungs- und Fremdzündungsmotoren /6.1/.

Die Grenzwerte gelten als Halbstundenmittelwerte für trockenes Abgas im Normzustand und bezogen auf 5 % O₂, in der Regel bei Nennlast.

Für kleine Anlagen bis 125 kW kann der Staubgrenzwert durch eine Beurteilung der Abgastrübung (z.B. Bosch-Zahl, Sichtkontrolle) ersetzt werden, da die regelmäßige messtechnische Überwachung des Staubgrenzwertes mit einfachen Messmethoden technisch nicht möglich ist.

Bei Verwendung von SCR-Abgasreinigungsanlagen darf ein Ammoniakschlupf von 5 mg/m³ nicht überschritten werden.

Bei besonderen örtlichen Verhältnissen oder wenn zu erwarten ist, dass nach Inbetriebnahme der Anlage die Immissionsgrenzwerte nach IG-L, BGBl. I Nr. 115/1997, nicht eingehalten werden können, sind niedrigere Emissionsgrenzwerte als die in der Tabelle 6.1 angeführten vorzusehen.

Tabelle 6.1: Grenzwertempfehlungen für Stationärmotoren

Grenzwertempfehlungen, bezogen auf 0° C, 1013 mbar, 5% O₂, in der Regel bei Nennleistung¹⁾:

| | | Heizöl extraleicht / Dieselkraftstoff | | | | | | | | | Erdgas / Flüssiggas Ottomotor | | | | | | Biogas | | | | Klärgas Deponiegas ⁵⁾ | | | | | | | | | | |
|----------------------|--|---------------------------------------|-----|---------|-----------------------|-----|-------|-----------------------|-----|-------|----------------------------------|-----|-------|----------|-----|----------|------------|----------|------|------------------|-------------------------------------|------|-----|-----|------|---|------|-----|-----|-----|-----|
| BWL | | < 125 kW | | | ≥ 125 < 1000 kW | | | ≥ 1000 < 2500 kW | | | ≥ 2500 kW | | | < 250 kW | | ≥ 250 kW | | < 250 kW | | ≥ 250 kW | | | | | | | | | | | |
| mechanische Leistung | | < 50 kW | | | ≥ 50 < 400 kW | | | ≥ 400 < 1000 kW | | | ≥ 1000 kW | | | < 100 kW | | ≥ 100 kW | | < 100 kW | | ≥ 100 kW | | | | | | | | | | | |
| | | Oxi-Kat ²⁾ | | | SCR-Kat ³⁾ | | | SCR-Kat ³⁾ | | | | | | | | | Magermotor | | | | | | | | | | | | | | |
| | | NOx | CO | Staub | NOx | CO | Staub | NOx | CO | Staub | NOx | CO | Staub | NOx | CO | NMHC | NOx | CO | NMHC | H ₂ S | NOx | CO | NOx | CO | NMHC | | | | | | |
| mg/Nm ³ | | 4000 ⁴⁾ | 650 | Bosch 3 | 2500 | 650 | 50 | 400 | 250 | 50 | 250 | 250 | 30 | 250 | 200 | 150 | 150 | 200 | 50 | ---- | 650 | ---- | 400 | 650 | 150 | 5 | ---- | 650 | 500 | 400 | 150 |

Die Brennstoffwärmeleistung BWL ist maßgebend für die Klassifizierung innerhalb dieser Tabelle.

Die mechanische Leistung wurde unter Annahme eines Wirkungsgrades von 40 % aus der BWL errechnet und ist als Richtwert anzusehen.

Für **Notstromaggregate** gelten die entsprechend ihrer Leistung in der Tabelle angeführten Grenzwerte für CO und Staub.

Für NOx ist der Grenzwert in der Höhe von 4000 mg/Nm³ einzuhalten.

Die angegebenen mechanischen Leistungen sind gemäß Richtlinie 80/1269/EWG, Anhang I, zuletzt geändert durch Richtlinie 1999/99/EG, ermittelte mechanische Motorleistungen von Selbstzündungs- und Fremdzündungsmotoren.

¹⁾ Abnahme bei Nennlast; in begründeten Einzelfällen auch bei anderer Last nach Vorgabe der Abnahmemesswerte für diesen Lastpunkt.

²⁾ Vorteilhaft zur Reduzierung der unverbrannten Kohlenwasserstoffe und der Geruchsbelastung.

³⁾ Zur Einhaltung der angeführten Grenzwerte ist nach dem derzeitigen Stand der Technik ein SCR-Kat erforderlich.

Ein Ammoniakschlupf von höchstens 5 mg/Nm³ darf nicht überschritten werden.

⁴⁾ Es gibt bereits Anbieter, die in diesem Leistungsbereich die Einhaltung eines NOx-Grenzwertes von 2.500 mg/m³ garantieren.

Es sind hier Fortschritte in der technischen Weiterentwicklung abzusehen.

⁵⁾ Grundsätzlich sind die übrigen Luftschadstoffe wie bei der Müllverbrennung zu begrenzen;

in der Regel wird eine Rohgasreinigung erforderlich sein. Siehe hierzu LRV-K 1989, BGBl.Nr. 19/1989, idF. BGBl. II Nr. 324/1997.

6.2 Emissionsmessungen und Überwachung

Die hier vorgeschlagenen Anforderungen an die Durchführung von Emissionsmessungen und an jene Stellen, die diese Messungen durchführen, sollen die Vergleichbarkeit ermittelter Werte sicherstellen. Weiters soll sichergestellt werden, dass Anbieter derartiger Leistungen im Rahmen von Entwicklungsarbeiten aber auch beim späteren Vertrieb der Verbrennungsanlagen dem Stand der Technik entsprechende Messverfahren anwenden und auf diese Weise ebenfalls die Sicherheit haben, dass erhaltene Messwerte - bei sachgerechter Ermittlung - vergleichbar sind und jeder Überprüfung standhalten können.

Die hier angeführten Überwachungsvorschläge basieren im Wesentlichen auf den Vorschriften des Luftreinhaltegesetzes für Kesselanlagen (LRG-K) und der Luftreinhalteverordnung für Kesselanlagen (LRV-K) und der Feuerungsanlagen-Verordnung (FAV). Die Regelungen des LRG-K stellen eine erprobte Grundlage dar, auf die aufgebaut werden kann. Gleichzeitig sollen aber aus heutiger Sicht Verbesserungen des Systems vorgeschlagen werden, ohne die Kosten von Überwachungsarbeiten zu erhöhen.

6.2.1 Grundlagen

6.2.1.1 Vergleichbare gesetzliche Regelungen

- Luftreinhaltegesetz für Kesselanlagen (LRG-K),
BGBI. Nr. 380/1988 vom 23.06.1988 idF. BGBI. I Nr. 115/1997;
- Luftreinhalteverordnung für Kesselanlagen (LRV-K 1989),
BGBI. Nr. 19/1989 vom 29.12.1988 idF. BGBI. II Nr. 324/1997.

6.2.1.2 Normative Grundlagen

- ÖNORM M 5861, Teil 1 vom 01.04.1993: „Manuelle Bestimmung von Staubkonzentrationen in strömenden Gasen - Gravimetrisches Verfahren - Allgemeine Anforderungen“;
- ÖNORM M 5861, Teil 2 vom 01.04.1994: „Manuelle Bestimmung von Staubkonzentrationen in strömenden Gasen -Besondere messtechnische Anforderungen“;
- ÖNORM M 9410 vom 01.01.1991: „Luftreinhaltung; Messtechnik; Begriffsbestimmungen und Merkmale von kontinuierlich arbeitenden Konzentrationsmessgeräten für Emissionen und Immissionen“;
- ÖNORM M 9411 vom 01.11.1999: „Kontinuierlich arbeitende Konzentrationsmesssysteme für Emissionen luftverunreinigender Stoffe; Anforderungen, Einbau und Wartung“;
- ÖNORM M 9412 vom 01.08.1994: „Anforderungen an Auswerteeinrichtungen für kontinuierliche Emissionsmessungen luftverunreinigender Stoffe“;
- ÖNORM M 7535, Teil 1 vom 01.11.1997: „Prüfung von Verbrennungsgasen aus Feuerungsanlagen - Messgeräte zur Bestimmung der Rußzahl von Ölfeuerungen - Anforderungen, Prüfung, Normkennzeichnung“;
- ÖNORM M 7535, Teil 2 vom 01.11.1997: „Prüfung von Verbrennungsgasen aus Feuerungsanlagen - Messgeräte zur Bestimmung der CO₂-Konzentration - Anforderungen, Prüfung, Normkennzeichnung“;

- ÖNORM M 7535, Teil 3 vom 01.11.1997: „Prüfung von Verbrennungsgasen aus Feuerungsanlagen - Messgeräte zur Bestimmung der O₂-Konzentration - Anforderungen, Prüfung, Normkennzeichnung“;
- ÖNORM M 7535, Teil 4 vom 01.11.1997: „Prüfung von Verbrennungsgasen aus Feuerungsanlagen - Messgeräte zur Bestimmung der CO-Konzentration - Anforderungen, Prüfung, Normkennzeichnung“;
- ÖNORM M 7535, Teil 5 vom 01.11.1997: „Prüfung von Verbrennungsgasen aus Feuerungsanlagen - Messgeräte zur Bestimmung der Verbrennungsgastemperatur - Anforderungen, Prüfung, Normkennzeichnung“;
- ÖNORM M 7535, Teil 7 vom 01.11.1997: „Prüfung von Verbrennungsgasen aus Feuerungsanlagen - Messgeräte zur Bestimmung der NO-Konzentration - Anforderungen, Prüfung, Normkennzeichnung“;
- ÖNORM M 9415, Teil 1 vom 01.05.1991: „Messtechnik - Messung von Stoffemissionen in die Atmosphäre - Allgemeine Anforderungen“;
- ÖNORM M 9415, Teil 2 vom 01.05.1991: „Messtechnik - Messung von Stoffemissionen in die Atmosphäre - Festlegungen für die Durchführung der Messung“;
- ÖNORM M 9415, Teil 3 vom 01.05.1991: „Messtechnik; Messung von Stoffemissionen in die Atmosphäre; Sicherheitstechnische Anforderungen“;
- VDI 3481, Blatt 3 vom 01.10.1995: „Messen gasförmiger Emissionen; Messen von flüchtigen organischen Verbindungen, insbesondere von Lösemitteln, mit dem Flammenionisations-Detektor (FID)“;
- VDI 3950 vom Juli 1994: „Kalibrierung automatischer Emissionsmeseinrichtungen“;
- BOSCHZAHL aus: „Kraftfahrtechnisches Taschenbuch“; Robert Bosch GesmbH. Stuttgart; Vertrieb: VDI VerlagsgesmbH. Düsseldorf.

6.2.2 Allgemeines

Die technischen Möglichkeiten zur Bestimmung eines Messwertes, der mit einem Grenzwert verglichen werden soll, hängen von der Art des zu analysierenden Parameters und von der Größenordnung der Konzentration des zu überwachenden Grenzwertes ab.

Bezüglich des Anlagenbegriffes und der Zusammenrechnung der Brennstoffwärmeleistungen einzelner Motoren wird von der Definition, wie sie in § 3 Abs. 2 der Feuerungsanlagen-Verordnung gegeben ist, ausgegangen.

Ob mehrere stationäre Motoren eines Betreibers als eine einzige Anlage gelten, ist im Einzelfall festzulegen: In diese Beurteilung haben die Zweckbestimmung der stationären Motoren, die verwendeten Brennstoffe, die vorgesehenen Betriebszeiten der stationären Motoren und der räumliche Zusammenhang der einzelnen Anlagenteile einzugehen.

Bei den nachfolgenden Vorschlägen zur Überprüfung der Anlagen wird nach den jährlichen Betriebsstunden (Notstromaggregate) und nach der Leistung der Anlage differenziert.

Wenn die Verwendung eines Stationärmotors als Notstromaggregat vorgesehen ist (maximale Betriebszeit 50 Stunden/Jahr), dann ist der Einbau eines Betriebsstundenzählers zur Überwachung der Betriebszeit unerlässlich.

6.2.3 Durchführung der Überprüfungen und Emissionsmessungen

Eine übersichtliche Darstellung der vorgeschlagenen Überwachungsmodalitäten findet sich in der **Tabelle 6.2** am Ende des Abschnitts 6.

6.2.3.1 Befugte Sachverständige

Die Überprüfungen und/oder Emissionsmessungen sind von akkreditierten Stellen, im Rahmen des fachlichen Umfangs ihrer Akkreditierung, von staatlichen oder staatlich autorisierten Stellen oder Ziviltechnikern, jeweils im Rahmen ihrer Befugnisse, durchzuführen.

Typprüfungen bzw. Abnahmeprüfungen sollten für alle Anlagen, unabhängig von deren Brennstoffwärmeleistung, von akkreditierten Prüfstellen oder Ziviltechnikern durchgeführt werden.

Für Gewerbetreibende besteht die Möglichkeit, sich für die Durchführung entsprechender Messungen akkreditieren zu lassen und im Rahmen des Akkreditierungsverfahrens nachzuweisen, dass die technischen und fachlichen Voraussetzungen für die Ausübung der Messtätigkeit erfüllt sind. Die generelle Zulassung von Gewerbetreibenden für die Durchführung der Messungen und Überprüfungen für kleinere Anlagen, wie sie z.B. im LRG-K vorgesehen ist, wird nicht als zweckmäßig angesehen, da z.B. für die Messung von unverbrannten Kohlenwasserstoffen eine entsprechende Ausrüstung und entsprechende Erfahrung im Umgang mit diesen Geräten notwendig sind. Außerdem kann nicht davon ausgegangen werden, dass Gewerbetreibende generell Sachverständige für analytische Chemie sind oder entsprechend ausgebildete Personen angestellt haben. Die Beauftragung von Gewerbetreibenden (ohne Akkreditierung, jedoch mit Nachweis ihrer messtechnischen Fähigkeiten) für behördliche Messtätigkeit oder Begutachtungen im Rahmen von regelmäßigen Anlagenüberprüfungen ist nur in Einzelfällen und nur bei Anlagen mit einer Brennstoffwärmeleistung bis 1 MW zulässig.

6.2.3.2 Erstprüfungen

Erstprüfungen sind Typprüfung oder Abnahmeprüfung.

6.2.3.2.1 Typprüfung

Im Rahmen der Typprüfung kann nachgewiesen werden, dass ein Anlagentyp technisch geeignet ist, die entsprechenden Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass der gesamte Lastbereich, der mit der Anlage gefahren werden kann, bei der Typprüfung abgedeckt wird.

Grundsätzlich scheint eine solche Typprüfung nur für kleinere Anlagen (Brennstoffwärmeleistung: max. 1 MW) und für Anlagen, die nur eine geringe Betriebsstundenanzahl (50 Stunden pro Jahr, also Notstromaggregate) aufweisen, sinnvoll, da durch Typprüfungen lediglich die grundsätzliche Eignung für die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten festgestellt werden kann. Einflüsse, die durch den Aufstellungsort hervorgerufen werden, werden nicht erfasst.

6.2.3.2 Abnahmeprüfung und Anlagenbuch

Im Rahmen der Abnahmeprüfung soll nachgewiesen werden, dass die entsprechenden Emissionsgrenzwerte von der am Aufstellungsort installierten Anlage eingehalten werden. Es ist zu überprüfen, ob die gemäß den gesetzlichen Grundlagen vorgeschriebenen Anforderungen erfüllt sind.

Die Durchführung von Abnahmeprüfungen hat - im Vergleich zu Typprüfungen - den Vorteil, dass die tatsächlichen Emissionen der Anlage - wenn auch nur für kurze Zeit - festgestellt werden.

Für den Käufer und späteren Eigentümer einer Anlage besteht der wesentliche Vorteil in Abnahmeprüfungen darin, dass gezeigt werden muss, dass die gelieferte Anlage den Spezifikationen tatsächlich entspricht.

Es wird vorgeschlagen, ein Anlagenbuch ähnlich dem Dampfkesselanlagenbuch (gemäß LRG-K, LRV-K) zu erstellen. In diesem Anlagenbuch sollen eine kurze technische Beschreibung des Stationärmotors, die gesetzlichen Bestimmungen und mit Bescheid vorgeschriebenen Auflagen wie z.B. Emissionsgrenzwerte zusammengefasst sein.

Ein Anlagenbuch für stationäre Motoren kann im Rahmen von Abnahmeprüfungen erstellt werden. Darin sind auch die Ergebnisse der Abnahmeprüfung zu dokumentieren.

6.2.3.3 Wiederkehrende Überprüfungen und Emissionsmessungen

6.2.3.3.1 Jährliche Überprüfungen

Jede Anlage ist mindestens einmal jährlich durch einen befugten Sachverständigen gemäß Abschnitt 6.2.3.1 auf die Einhaltung der gesetzlichen und bescheidmäßigen Anforderungen überprüfen zu lassen. Die Überprüfung umfasst jene Anlagenteile, die für die Emissionen oder deren Begrenzung von Bedeutung sind, sowie vorhandene Messergebnisse und vom Betreiber zu führende Aufzeichnungen (z.B.: Betriebsstunden, Brennstoffverbrauch, Zertifikate über die Brennstoffqualität, Wartungsberichte). Bei den jährlich durchzuführenden Überprüfungen der Einhaltung bescheidmäßiger Vorschriften handelt es sich um eine Sichtprüfung mit vereinfachten Messungen von CO und NO_x gemäß ÖNORM M 7535.

Zusätzlich zu diesen Überprüfungen sollten von einem Fachmann (Lieferfirma oder Hersteller der Anlage, geschultes Personal) in regelmäßigen Abständen, mindestens jedoch jährlich, Wartungsarbeiten durchgeführt werden, um die Funktion, den konsensgemäßen Zustand der Anlage und die optimale Motoreinstellung sicherzustellen.

Bei Lambda-1-Motoren ist einmal jährlich eine Wartung durch den Hersteller oder dessen bevollmächtigten Vertreter notwendig. Diese muss mindestens die Kontrolle der Lambda-Sonde, der Stellmotoren für die Gasregelung, die Feststellung einer allfälligen Katalysator-Schädigung und eine Kontrollmessung von CO und NO_x umfassen.

Magermotoren sind spätestens nach jeweils 6.000 Betriebsstunden oder 1 Jahr – je nachdem, welcher Wert früher erreicht wird – einer Wartung durch die Erzeugerfirma oder deren bevollmächtigten Vertreter unterziehen zu lassen. Diese Wartung hat mindestens die Kontrolle und Einstellung der Zündkerzen und die Kontrolle der Motoreinstellung (Luftüberschuss) zu umfassen.

6.2.3.3.2 Wiederkehrende Emissionsmessungen für Brennstoffwärmeleistung über 1 MW

Bei wiederkehrenden Emissionsmessungen sind mindestens 3 Messwerte zur Bildung des Beurteilungswertes zu ermitteln. Die Messdauer zur Erlangung eines Messwertes hat mindestens eine halbe Stunde zu betragen. Ist dies nicht möglich, so sind dieser Umstand sowie die Ursache im Befund anzuführen.

Emissionsmessungen sind bei jenem stationären Anlagenbetriebszustand durchzuführen, bei dem die höchsten Emissionskonzentrationen zu erwarten sind, wobei nur solche Betriebszustände zu berücksichtigen sind, bei denen die Anlage vorwiegend betrieben wird.

Bei Anlagen, die bis zu 50 Stunden pro Jahr betrieben werden, dies sind insbesondere Notstromaggregate, sind die Emissionsmessungen im Abstand von 5 Jahren durchzuführen. Bei Notstromaggregaten über 10 MW hat die messtechnische Überwachung der Einhaltung der Grenzwerte alle 3 Jahre zu erfolgen.

Der Zyklus für Emissionsmessungen für Anlagen, die mehr als 50 Stunden im Jahr betrieben werden und eine Brennstoffwärmeleistung zwischen 1 MW und 2 MW aufweisen, hat höchstens 5 Jahre zu betragen (siehe LRG-K).

Anlagen mit mehr als 50 Betriebsstunden pro Jahr und über 2 MW Brennstoffwärmeleistung sind im Abstand von 3 Jahren hinsichtlich der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte zu überprüfen.

Die Erfahrung zeigt, dass Überwachungszyklen, wie sie z.B. im LRG-K festgehalten sind, ein gangbarer Weg zur Überwachung der Emissionen einer Anlage sind. Es scheint – wie die Praxis zeigt – zweckmäßig, die Emissionsmessungen in einem größeren Intervall (3 und 5 Jahre) mit entsprechend genauen Messsystemen über einen längeren Zeitraum (drei Halbstundenmittelwerte) durchzuführen und den konsensgemäßen Zustand zwischenzeitlich durch entsprechende Wartungsarbeiten sicherzustellen. So werden die Überwachungskosten trotz einer ausreichenden Überwachung der Emissionen gering gehalten und es kann auch davon ausgegangen werden, dass die Anlage in den Zeiträumen zwischen den Emissionsmessungen in einem konsensgemäßen Zustand betrieben wird.

6.2.3.3.3 Kontinuierliche Messungen

Die kontinuierliche Überprüfung der Einhaltung von Emissionsgrenzwerten ist zwar für die relevanten Schadstoffe technisch möglich, bei geringen Anlagenleistungen ist jedoch von der kontinuierlichen Erfassung von Messwerten aus Kostengründen abzusehen.

Erst bei Anlagen mit einer Brennstoffwärmeleistung ab 10 MW ist eine kontinuierliche Emissionsmessung (in Anlehnung an Bestimmungen für Dampfkesselanlagen und sonstige Feuerungsanlagen) sinnvoll.

Hinsichtlich der Messgeräte und Messverfahren siehe Abschnitte 6.2.1.2 und 6.2.3.4.

6.2.3.4 Messtechnik und Messverfahren

Grundsätzlich stehen zur Grenzwertüberwachung, abgesehen von nasschemischen (z.B. Formaldehyd) und manuellen Messmethoden (z.B. Staub), zwei Arten von Messsystemen zur Verfügung:

Messsysteme, die den Anforderungen der ÖNORM M 9411 und jene, die der ÖNORM M 7535, Teil 1 bis 7 entsprechen.

Messsysteme, die den Anforderungen der ÖNORM M 9411 entsprechen, sind kontinuierliche Messsysteme, die zur Dauerüberwachung von Emissionen geeignet sind. Sie sind derzeit der Stand der Technik in der dauernden Emissionsüberwachung von Anlagen.

Derartige Messsysteme werden aber auch für kurzzeitige Überwachungsmessungen eingesetzt, bei denen z.B. Halbstundenmittelwerte gemessen werden müssen.

Normativ erlaubte Messfehler hängen vom Messbereichsendwert des verwendeten Messsystems ab. Je kleiner der verwendete Messbereich ist, desto geringer darf die Abweichung des Messwertes vom „wahren Wert“ sein. Bei Verwendung derartiger Messsysteme kann der Messbereichsendwert auf den zu überwachenden Grenzwert abgestimmt werden.

Erfahrungen bei der Durchführung von Kalibrierungen von kontinuierlichen Messgeräten mit Referenzmessverfahren zeigen, dass der Messwert für z.B. die Konzentrationsanzeige für CO bei einem Sollwert von 150 mg/m³ zwischen 142 und 158 mg/m³ liegt. Derartige Messsysteme sind vor und nach jedem Einsatz für die diskontinuierliche Überwachung im Nullpunkt und im Referenzpunkt mit entsprechenden Prüfgasen zu justieren.

Messsysteme entsprechend der ÖNORM M 7535, Teil 1 bis 7 sind Messsysteme, die für Kurzzeitmessungen und speziell für Messungen an kleinen Anlagen entwickelt wurden und deren Messergebnisse, auch bei der Erfüllung der normativen Anforderungen, mit einem relativ großen Fehler behaftet sein können. Normativ erlaubte Messfehler hängen grundsätzlich auch bei diesen Messsystemen vom Messbereichsendwert ab. Die Messbereichsendwerte dieser Geräte sind aber in der Regel für die Überwachung der für stationäre Motoren heranzuziehenden angeführten Grenzwerte viel zu groß.

So entspricht z.B. ein CO-Messsystem der ÖNORM M 7535, wenn bei einem Sollwert von 150 mg/m³ der Messwert zwischen 128 mg/m³ und 172 mg/m³ liegt. Diese Abweichung darf bei der Eignungsprüfung nicht überschritten werden. Vor der Messung erfolgt im Regelfall keine Kalibrierung des Messsystems, es wird lediglich der Nullpunkt abgeglichen.

Ein weiteres Manko derartiger Messsysteme ist üblicherweise das Fehlen einer geeigneten Probengasaufbereitung für die Durchführung von Messungen über mehrere Stunden. Die Probengasaufbereitung ist für den bestimmungsgemäßen Einsatz, die punktuelle Messung von Abgasinhaltsstoffen, eher einfach ausgeführt. Bei längerdauernden Messeinsätzen kann es zu unerkannten Verfälschungen des angezeigten Wertes kommen.

Ein wesentlicher Vorteil derartiger Messsysteme im Vergleich zu Messsystemen, die der ÖNORM M 9411 entsprechen, liegt in der geringen Vorlaufzeit vom Einschalten des Messgerätes bis zur Anzeige eines Messwertes.

Aufgrund der bei Anlagen, die dem Stand der Technik entsprechen, größtenteils niedrigen einzuhaltenden Grenzwerten wird grundsätzlich empfohlen, die Emissionsmessungen mit Messsystemen, die der ÖNORM M 9411 entsprechen, durchzuführen, da diese Messungen mit ausreichender Genauigkeit auch über einen längeren Zeitraum ermöglichen. Weiters sind derzeit für die Bestimmung der organisch C-Konzentration im Abgas nur Messsysteme entsprechend der ÖNORM M 9411 verfügbar.

Die direkte Messung des Staubgehaltes kann nur nach ÖNORM M 5861 manuell durchgeführt werden. Staubmessgeräte in einfacher Version (wie bei gasförmigen Komponenten, ÖNORM M 7535, siehe oben) sind nicht am Markt.

Es scheint jedoch auch sinnvoll, für die jährlichen vereinfachten Messungen bei Anlagen die Grenzwertüberwachung - soweit möglich - mit Messsystemen entsprechend der ÖNORM M 7535 durchzuführen.

Die Ergebnisse derartiger Messungen können auch zur Kontrolle der Motoreinstellung bei der regelmäßigen Wartung der Anlagen verwendet werden.

Im Rahmen der Typ- und Abnahmeprüfungen sollten nur Messsysteme, die den Anforderungen der ÖNORM M 9411 entsprechen, verwendet werden, da nur diese für Messungen über einen längeren Zeitraum geeignet sind.

Komponenten, welche im Rahmen von wiederkehrenden Emissionsmessungen nicht mit kontinuierlichen Messsystemen erfasst werden können, sind mit entsprechenden manuellen Messmethoden zu messen (z.B. Staub: nach ÖNORM M 5861).

Bei den wiederkehrenden Emissionsmessungen können bei Anlagen bis 1 MW Brennstoffwärmeleistung Messsysteme, die der ÖNORM M 7535, Teil 1 bis 7 entsprechen, eingesetzt werden. Es ist darauf zu achten, dass viele manuelle Messverfahren bei kurzen Probenahmezeiten Messergebnisse mit großem Fehler liefern können.

Anlagen mit über 1 MW Brennstoffwärmeleistung sollten, wie bei der Abnahmeprüfung, mit Messsystemen, die den Anforderungen der ÖNORM M 9411 entsprechen, überprüft werden. Emissionen von Abgasinhaltsstoffen wie Staub sind mit geeigneten manuellen Messverfahren zu erfassen.

Bei Brennstoffen (z.B.: Deponiegase, Klärgase) mit nicht genau definierter Zusammensetzung wäre die Überwachung zusätzlicher Komponenten wie z.B. SO₂ im Abgas vorzusehen oder es sollte der Gehalt der Vorläufersubstanzen (z.B.: H₂S) im Brennstoff durch geeignete Analysen ermittelt werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die nötigen Messstellen, speziell für die Staubbmessung, bereits bei der Errichtung der Anlage zu berücksichtigen sind. Vorschriften für die Festlegung von Messstellen finden sich in ÖNORM M 9415, 1 - 3.

6.2.3.4.1 Kontinuierliche Messung

Grundlage: ÖNORM M 9411 für Messsysteme
 ÖNORM M 9412 für Auswertesysteme

6.2.3.4.2 Diskontinuierliche Messungen

Mit Messsystemen nach ÖNORM M 9411

Staub: ÖNORM M 5861

Org. Kohlenstoff: VDI 3481

Formaldehyd: VDI 3862

Diese Messverfahren zielen auf die Bildung von Halbstundenmittelwerten ab.

6.2.3.4.3 Diskontinuierliche Messungen (Kurzzeitmessung, Kleinanlagen)

Mit Messgeräten nach ÖNORM M 7535.

Messungen mit diesen Messsystemen sind für die Abgasinhaltsstoffe CO, NO, O₂, CO₂ und für die Rußzahl genormt. NO₂ wird von derartigen Messsystemen im Normalfall nicht erfasst.

Diese Messsysteme sind grundsätzlich nicht für die Bestimmung von Mittelwerten über Messzeiträume von mehr als 15 Minuten geeignet.

6.2.4 Zusammenfassung

Eine übersichtliche Darstellung der vorgeschlagenen Überwachungsmodalitäten findet sich in der nachfolgenden **Tabelle 6.2**; die Leistungsgrenzen lehnen sich an das LRG-K und die Feuerungsanlagen-Verordnung an.

Das Überwachungsschema gilt für alle Anlagen, unabhängig davon, welche Brennstoffe verfeuert werden.

Wird der Schwefelgehalt des eingesetzten Brennstoffes limitiert, so kann die Überwachung der Einhaltung des SO₂-Grenzwertes statt durch kontinuierliche Messungen auch durch wiederkehrende Einzelmessungen erfolgen.

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Kontrollen der Emissionen von Stationärmotoren / Art der Tätigkeit und Rhythmus

| Anlage [Brennstoffwärmeleistung] | Typ- prüfung | Abnahme- prüfung | jährliche Wartung durch Fachfirma sowie jährliche Sichtprüfung und vereinfachte Messung von CO, NO _x (ÖNORM M 7535) | wiederkehrende Messung (ÖNORM M 9411; nasschemische/manuelle Verfahren) | kontinuierliche Messung |
|---|-----------------|---------------------|---|--|---|
| Notstromaggregate bis 50 Betriebsstunden | | | | | |
| bis 1 MW | X ¹⁾ | X ¹⁾ | X | | |
| > 1 bis 10 MW | X ¹⁾ | X ¹⁾ | X | X (5 Jahre) | |
| > 10 MW | X ¹⁾ | X ¹⁾ | X | X (3 Jahre) | |
| Aggregate über 50 Be- triebsstunden | | | | | |
| bis 1 MW | X ¹⁾ | X ¹⁾ | X | | |
| > 1 bis 2 MW | | X | X | X (5 Jahre) | |
| > 2 bis 10 MW | | X | X | X (3 Jahre) | |
| > 10 MW | | X | X | X (3 Jahre) | X |
| | | | | | CO, Staub (außer bei Gas und Biogas), NO _x , Summenkohlenwasserstoffe, SO ₂ bei Abgasentschwefelung |

X¹⁾ gilt alternativ

7 Testvorschriften und Abgasgrenzwerte

7.1 Allgemeines

Für Anwendungen von Stationärmotoren werden oftmals keine speziellen Motoren entwickelt, sondern verfügbare LKW-Motoren eingesetzt. Deshalb wird im Folgenden ein Überblick über Testverfahren für LKW-Motoren und andere schwere Dieselmotoren gegeben.

Weltweit gibt es eine Reihe unterschiedlicher gesetzlicher Vorschriften zur Zertifizierung von Motoren oder Fahrzeugen. Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge werden als Einheit mit dem Motor auf dem Rollenprüfstand getestet. Bei schweren Dieselmotoren ist immer das Triebwerk alleine Gegenstand der Abgasprüfung.

Straßenfahrzeuge (PKW und leichte Nutzfahrzeuge) müssen quasi-reale Fahrzyklen auf dem Rollenprüfstand absolvieren, die sowohl Fahrzustände in Städten als auch auf Autobahnen beinhalten. Es handelt sich dabei um Instationärtests.

Bei Diesel- oder Gasmotoren für schwere Nutzfahrzeuge sind stationäre und instationäre Testverfahren zu unterscheiden.

In den Vereinigten Staaten von Amerika sind die Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen in einem instationären Prüfzyklus nachzuweisen.

Für Anwendungen abseits von Straßen („Off-Road“) wurden anwendungsspezifische Stationärtests entwickelt.

7.2 ECE R49 13-Stufentest

Nutzfahrzeug-Dieselmotoren von LKW (Masse über 3,5 t) werden bis 30. September 2001 nach dem ECE R49 13-Stufentest geprüft /7.1/. Dieser Test besteht aus elf verschiedenen stationären Lastpunkten, wobei der untere Leerlauf dreimal vorkommt, wie aus **Tabelle 7.1** ersichtlich ist. Die einzelnen Motorbetriebspunkte haben unterschiedliche Wichtungsfaktoren, welche die Häufigkeit des jeweiligen Lastzustandes im Straßenverkehr wiedergeben sollen.

Tabelle 7.1: Lastpunkte und Wichtungsfaktoren im ECE R49 Test

| Stufe Nr. | Drehzahl | Last % | Wichtung % |
|-----------|------------------------------|------------------|------------|
| 1 | Leerlauf | 0 | 8.33 |
| 2 | Zwischendrehz. ¹⁾ | 10 ²⁾ | 8.00 |
| 3 | Zwischendrehz. | 25 | 8.00 |
| 4 | Zwischendrehz. | 50 | 8.00 |
| 5 | Zwischendrehz. | 75 | 8.00 |
| 6 | Zwischendrehz. | 100 | 25.00 |
| 7 | Leerlauf | 0 | 8.33 |
| 8 | Nenndrehzahl | 100 | 10.00 |
| 9 | Nenndrehzahl | 75 | 2.00 |
| 10 | Nenndrehzahl | 50 | 2.00 |
| 11 | Nenndrehzahl | 25 | 2.00 |
| 12 | Nenndrehzahl | 10 | 2.00 |
| 13 | Leerlauf | 0 | 8.33 |

¹⁾ Als Zwischendrehzahl ist entweder die Drehzahl des maximalen Drehmomentes oder 60 % der Nenndrehzahl zu wählen. Die höhere der beiden ist zu verwenden.

²⁾ In Prozent der bei der jeweiligen Drehzahl maximalen Last (Volllast).

Die Messungen sind bei stabilisierten Prüfbedingungen durchzuführen. Die Gesamt-Testergebnisse werden aus den Einzelmessungen berechnet.

Die in den Ländern der Europäischen Gemeinschaft im Zeitraum vom 1.10.1996 bis 30.9.2001 einzuhaltenden Grenzwerte sind in **Tabelle 7.2** angeführt (ab 1.10.2001 siehe Abschnitt 7.3).

Tabelle 7.2: Grenzwerte vom 1.10.1996 bis 30.9.2001 (EURO II)

| EURO II (bis 2001) | CO g/kWh | HC g/kWh | NO _x g/kWh | Partikel g/kWh |
|-----------------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------------|
| ECE R49 | 4.0 | 1.1 | 7.0 | 0.15 |

7.3 ESC-, ELR- und ETC-Prüfzyklen

In der Richtlinie 88/77/EWG werden die Testverfahren und die Emissionsgrenzwerte für Nutzfahrzeuge mit einer Gesamtmasse von über 3,5 t geregelt /7.1/. Mit der Richtlinie 1999/96/EG wurde diese Richtlinie geändert /7.2/. Demnach dürfen Emissionen von Fahrzeugen, welche durch einen Diesel- oder Gasmotor angetrieben werden, ab dem 1. Oktober 2001 verschärfte Grenzwerte nicht überschreiten. Die Emissionswerte sind nach neuen Prüfzyklen zu ermitteln.

Die **ESC-Prüfung (Europäischer Stationärttest)** besteht aus dreizehn stationären Drehzahl- und Leistungsphasen, die dem Bereich entsprechen, in dem diese Motoren normalerweise betrieben werden (**Tabelle 7.3**). Die Motordrehzahlen A, B und C sind gemäß Anhang III, Anlage 1 der Richtlinie 1999/96/EG zu bestimmen. Diese Drehzahlen werden in Zusammenhang mit der Leistung rechnerisch ermittelt, die Leistung liegt dabei im Bereich zwischen 50 und 70 % der Höchstleistung des Motors.

Tabelle 7.3: ESC-Prüfung, 13-Phasen-Zyklus

| Prüfphase | Motor-drehzahl | Teillast-verhältnis | Wichtungs-faktor | Dauer der Prüfphase (min) |
|-----------|----------------|---------------------|------------------|---------------------------|
| 1 | Leerlauf | - | 0,15 | 4 |
| 2 | A | 100 | 0,08 | 2 |
| 3 | B | 50 | 0,10 | 2 |
| 4 | B | 75 | 0,10 | 2 |
| 5 | A | 50 | 0,05 | 2 |
| 6 | A | 75 | 0,05 | 2 |
| 7 | A | 25 | 0,05 | 2 |
| 8 | B | 100 | 0,09 | 2 |
| 9 | B | 25 | 0,10 | 2 |
| 10 | C | 100 | 0,08 | 2 |
| 11 | C | 25 | 0,05 | 2 |
| 12 | C | 75 | 0,05 | 2 |
| 13 | C | 50 | 0,05 | 2 |

Bei der **ELR-Prüfung (Europäischer Lastannahmetest)** wird die Trübung des Abgases eines warmgelaufenen Motors mit Hilfe eines Trübungsmessers gemessen. Diese Prüfung besteht aus einer Folge von instationären Belastungsschritten bei unterschiedlichen Drehzahlen (**Bild 7.1**).

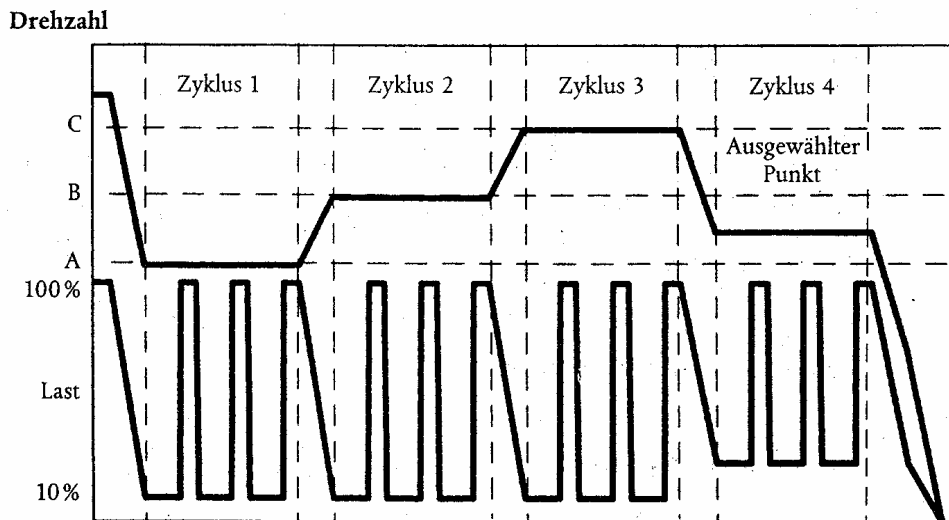


Bild 7.1: ELR-Prüfung, Abfolge der Belastungsschritte

Die **ETC-Prüfung (Europäischer Transienttest)** besteht aus einer Abfolge von instationären, jede Sekunde wechselnden Prüfphasen. Dieser Zyklus basiert auf einem Fahrprogramm, das in guter Näherung den Straßenfahrbetrieb von Hochleistungsmotoren in Lastkraftwagen und Bussen beschreibt (**Bild 7.2**).

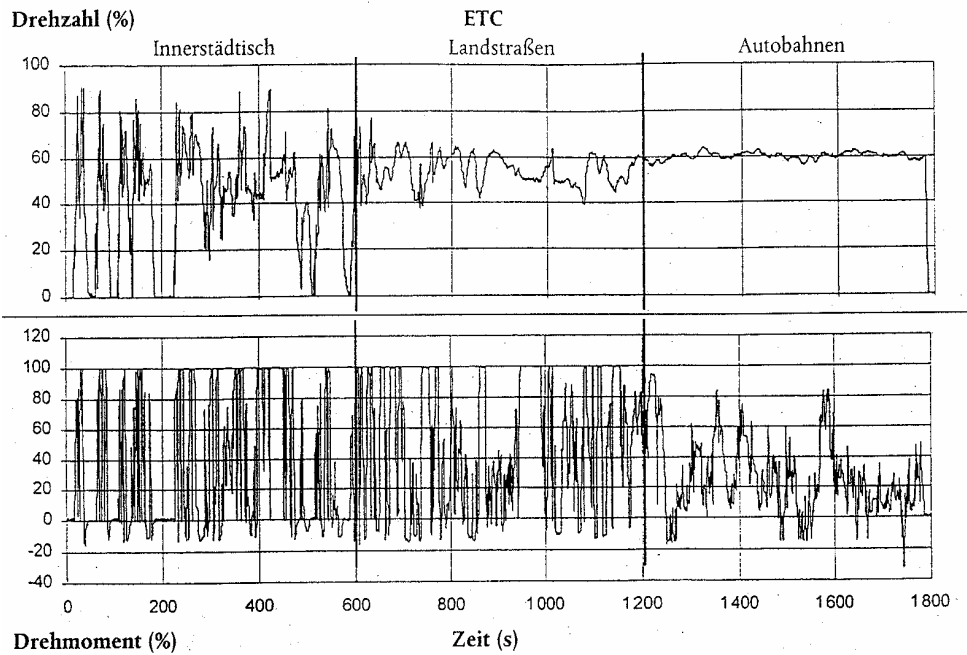


Bild 7.2: ETC-Prüfung, Ablaufplan für den Leistungsprüfstand

Die Emissionsgrenzwerte, die LKW-Motoren einhalten müssen, werden in den Jahren 2001 bis 2009 verschärft. Die in der Folge angegebenen Termine gelten für die Zulassung, den Verkauf, die Inbetriebnahme oder die Benutzung von neuen, durch einen Diesel- oder Gasmotor angetriebenen Fahrzeugen über 3,5 t. Für die EG-Typgenehmigung derartiger Fahrzeuge oder Motoren sind die Grenzwerte schon ein Jahr früher einzuhalten.

Für die Zwecke der Typgenehmigung in Bezug auf die Zeile A der **Tabelle 7.4** sind die Emissionen in ESC- und ELR-Prüfungen mit herkömmlichen Dieselmotoren, eingeschlossen solche mit elektronischer Kraftstoffeinspritzung, Abgasrückführung (AGR) und/oder Oxidationskatalysatoren, zu messen. Dieselmotoren, die mit modernen Systemen zur Abgasnachbehandlung, beispielsweise deNO_x-Katalysatoren und/oder Partikelfiltern ausgestattet sind, müssen zusätzlich einer ETC-Prüfung unterzogen werden.

Für die Zwecke der Typgenehmigung in Bezug auf die Zeile B 1 oder B 2 oder die Zeile C der **Tabelle 7.4** sind die Emissionen im Rahmen von ESC-, ELR- und ETC-Prüfungen zu messen.

Bei Gasmotoren sind die gasförmigen Emissionen mittels ETC-Prüfung zu messen.

Die in der **Tabelle 7.4** angegebenen Grenzwerte sind für voranstehend genannte Voraussetzungen ab dem folgenden Zeitpunkt einzuhalten:

- ab 1. Oktober 2001: Zeile A
- ab 1. Oktober 2006: Zeile B 1
- ab 1. Oktober 2009: Zeile B 2

Fahrzeuge, die die in Zeile C angegebenen Grenzwerte einhalten können, gelten als besonders umweltfreundliche Fahrzeuge. Diese Grenzwerte werden jedoch nicht verbindlich vorgeschrieben.

Tabelle 7.4: Emissionsgrenzwerte für die ESC-, ELR- und ETC-Prüfung

Grenzwerte für die ESC- und ELR-Prüfung

| Zeile | CO g/kWh | HC g/kWh | NO _x g/kWh | Partikel g/kWh | Rauch- trübung m ⁻¹ |
|----------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| A (2001) | 2,1 | 0,66 | 5,0 | 0,10 0,13 ¹⁾ | 0,8 |
| B 1 (2006) | 1,5 | 0,46 | 3,5 | 0,02 | 0,5 |
| B 2 (2009) | 1,5 | 0,46 | 2,0 | 0,02 | 0,5 |
| C (freiwillig) | 1,5 | 0,25 | 2,0 | 0,02 | 0,15 |

Grenzwerte für die ETC-Prüfung²⁾

| Zeile | CO g/kWh | NMHC g/kWh | Methan ³⁾ (CH ₄) g/kWh | NO _x g/kWh | Partikel ⁴⁾ g/kWh |
|----------------|-------------|---------------|---|--------------------------|---------------------------------|
| A (2001) | 5,45 | 0,78 | 1,6 | 5,0 | 0,16 0,21 ¹⁾ |
| B 1 (2006) | 4,0 | 0,55 | 1,1 | 3,5 | 0,03 |
| B 2 (2009) | 4,0 | 0,55 | 1,1 | 2,0 | 0,03 |
| C (freiwillig) | 3,0 | 0,40 | 0,65 | 2,0 | 0,02 |

¹⁾ Für Motoren mit einem Hubraum von unter 0,75 dm³ je Zylinder und einer Nennleistungsdrehzahl von über 3000 U/min.

²⁾ Die Bedingungen für die Überprüfung der Annehmbarkeit der ETC-Prüfung, mit der die Einhaltung der in Zeile A festgelegten Grenzwerte bei den Emissionen mit Gas betriebener Motoren gemessen wird, werden überprüft und erforderlichenfalls geändert.

³⁾ Nur für Erdgasmotoren.

⁴⁾ Gilt nicht für mit Gas betriebene Motoren in Stufe A und Stufen B 1 und B 2.

Zusätzlich müssen ab dem 1. Oktober 2005 alle neuen Fahrzeugtypen mit einem On-Board-Diagnose-System (OBD) oder einem On-Board-Messsystem (OBM) zur Überprüfung der Abgasemissionen im Betrieb ausgestattet sein; ab dem 1. Oktober 2006 gilt diese Bestimmung für alle Fahrzeugtypen.

Weiters muss ab dem 1. Oktober 2005 bei Typgenehmigungen für neue Fahrzeugtypen und Motoren auch die Funktionstüchtigkeit der emissionsrelevanten Einrichtungen während der normalen Lebensdauer des Fahrzeugs oder Motors bestätigt werden; ab dem 1. Oktober 2006 gilt diese Bestimmung für alle Fahrzeugtypen und Motoren.

7.4 US-EPA Transient-Test

Gänzlich anders als die europäischen Tests ist das US-Verfahren zur Zertifizierung schwerer Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. Der "US-EPA **H**heavy **D**uty **D**iesel **T**ransient **C**ycle" (HDDTC) sieht einen Quasi-Fahrzustand auf dem Motorprüfstand vor /7.3/. Dieser Test dauert 1200 Sekunden und deckt praktisch das gesamte Last-Drehzahlkennfeld eines Motors ab. Es sind drei unterschiedliche Phasen enthalten, die unterschiedlichen amerikanischen Fahrbedingungen Rechnung tragen sollen, nämlich die Abschnitte New York Non-Freeway mit raschen Beschleunigungen aus tiefer Last und tiefer Drehzahl, Los Angeles Non-Freeway, charakterisiert durch häufige Last- und Drehzahlwechsel, sowie Los Angeles Freeway mit überwiegend hohen Dreh-

zahlen bei wechselnder Last. Im letzten Viertel der Testdauer wird der New York Non-Freeway wiederholt. Drehmoment und Drehzahl sind in **Bild 7.3** dargestellt.

Der gesamte Test wird zweimal durchfahren: Erst Start mit kaltem Motor, das heißt Öl- und Kühlwassertemperatur zwischen 20 und 30 °C; 20 Minuten nach dem Ende dieses Abschnittes erfolgt ein Start mit warmem Motor. Der Kaltstart-Test ist zu 1/7 gewichtet, der Warmstart-Test zu 6/7.

Die US-EPA Testvorschrift /7.3/ gibt für jede Sekunde ein Wertepaar für normierte Drehzahl und normierte Last an. Wie aus **Bild 7.3** ersichtlich, sind auch Schlepp-Phasen des Motors vorgesehen.

Diese Art des Testens erfordert teure Prüfstandseinrichtungen. Einerseits werden hochdynamische Bremsen gebraucht, andererseits müssen die gesamten Motorabgase in einen Verdünnungstunnel geleitet werden, wo sie mit Frischluft vermengt werden. Im verdünnten Abgas werden die gasförmigen Emissionen und die Partikel gemessen.

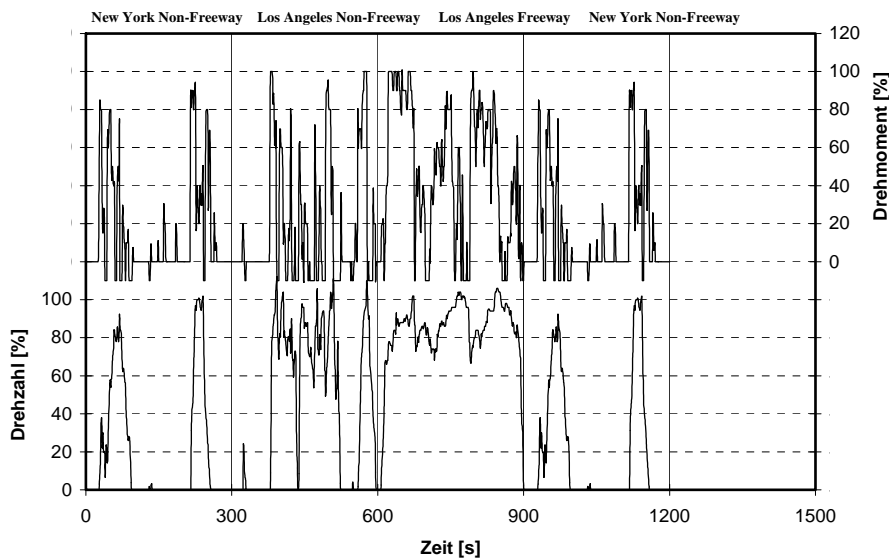


Bild 7.3: US-EPA Heavy Duty Diesel Transient Cycle

7.5 US-EPA Rauchtest

Analog zum europäischen Beschleunigungsrauchtest ECE R24 sieht die amerikanische Umweltschutzbehörde EPA einen Rauchtest für schwere Dieselmotoren vor /7.3/. Angesichts der sehr strengen Partikelgrenzwerte kommt diesem Test keine große Bedeutung zu. Motoren, welche den Anforderungen des Rauchtests nicht genügen, können auch das Limit für Partikel nicht erfüllen.

7.6 ECE R15-Test

In der EG wurden Anfang der Siebziger Jahre erstmals Abgasgrenzwerte für PKW eingeführt. Die Messungen werden seither auf Rollenprüfständen durchgeführt. Auch der Messzyklus hat sich nur wenig geändert. Der ECE R15-Test (auch UDC, Urban Driving Cycle genannt) beschreibt eine Stadtfahrt mit einer Maximalgeschwindigkeit von 50 km/h und dauert 780 Sekunden.

den, wobei 4 Kilometer zurückgelegt werden. In der ursprünglichen Version, die bis 1996 anzuwenden war, wurde der Test mit betriebswarmem Motor gestartet. Es handelt sich um einen synthetischen Zyklus mit konstanten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, und wurde nicht aus gemessenen Fahrkollektiven ermittelt.

7.7 ECE EUDC

Zur Ergänzung des ECE R15 wurde ein „Außerortszyklus“ (Extra Urban Driving Cycle) geschaffen, bei dem Fahrten Überland und auf Autobahnen simuliert werden. Mit der Änderung der EU-Abgasgesetze 1996 (94/12/EG) wurden UDC und EUDC zu einem Zyklus zusammengefasst. Dieser Zyklus nennt sich nun NEDC (New European Driving Cycle). Weiters werden die Messungen seither mit kaltem Motor begonnen.

7.8 US-EPA Rollenprüfstandtests

In den USA wurden schon frühzeitig Abgastests entwickelt, die auf dem Rollenprüfstand zu absolvieren waren. In Österreich waren diese Tests bis 1994 für PKW und leichte Nutzfahrzeuge verpflichtend. Es wird, wie bei den entsprechenden Testvorschriften in der EU, das Fahrverhalten in Städten und auf Freilandstraßen simuliert.

7.9 Stationärtests für Motoren für mobile Maschinen und Geräte

Die ISO-Norm 8178 /7.4/ sieht für verschiedene Anwendungsfälle Stationärtests vor. Die Wichtung der einzelnen Lastpunkte soll die Einsatzbedingungen widerspiegeln, wie am Beispiel des Prüfzyklusses Typ C1 (Fahrzeuge – ausgenommen Straßenfahrzeuge – und Industriegeräte mit Dieselmotor) in der **Tabelle 7.5** gezeigt wird.

Tabelle 7.5: ISO 8178-Test C1

| Stufe Nr. | Drehzahl | Drehmoment % | Wichtung % |
|-----------|--------------------|--------------|------------|
| 1 | Nenndrehzahl | 100 | 15 |
| 2 | Nenndrehzahl | 75 | 15 |
| 3 | Nenndrehzahl | 50 | 15 |
| 4 | Nenndrehzahl | 10 | 10 |
| 5 | Zwischendrehzahl | 100 | 10 |
| 6 | Zwischendrehzahl | 75 | 10 |
| 7 | Zwischendrehzahl | 50 | 10 |
| 8 | Niedriger Leerlauf | 0 | 15 |

Im Zuge der Normung nach ISO 8178 wurde der Versuch unternommen, für alle „Nicht-Straßen-Anwendungen“ verbindliche Zertifizierungstests zu schaffen. Die bei solchen Tests einzuhaltenen Grenzwerte werden erst in Zukunft festgelegt werden.

Für die Emission von gasförmigen Schadstoffen und Partikeln aus Motoren mit Kompressionszündung, die zum Einbau in mobile Maschinen und Geräte bestimmt sind, wurden bereits Grenzwerte festgelegt. Die diesbezügliche Richtlinie 97/68/EG wurde mit der Verordnung BGBl. II Nr. 185/1999 umgesetzt /7.5, 7.6/. Unter diese Verordnung fallen beispielsweise Kompressoren, Radlader, Hebebühnen und Mobilkrane, jedoch keine Stromerzeugungsaggregate.

Die Grenzwerte werden gestaffelt nach der Leistung bis zum 31.12.2002 verschärft und sind nach dem in **Tabelle 7.5** angeführten Zyklus zu ermitteln. Ab dem 1.1.2003 gelten dann für die Typgenehmigung von Motoren die in **Tabelle 7.6** angeführten Werte. Für das Inverkehrbringen von bereits hergestellten Motoren gelten andere Fristen.

Tabelle 7.6: Emissionsgrenzwerte gemäß Punkt 4.2.3 der Richtlinie 97/68/EG

| Nutzleistung kW | CO g/kWh | HC g/kWh | NO _x g/kWh | Partikel g/kWh |
|-----------------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------------|
| $130 \leq P \leq 560$ | 3,5 | 1,0 | 6,0 | 0,2 |
| $75 \leq P < 130$ | 5,0 | 1,0 | 6,0 | 0,3 |
| $37 \leq P < 75$ | 5,0 | 1,3 | 7,0 | 0,4 |
| $18 \leq P < 37$ | 5,5 | 1,5 | 8,0 | 0,8 |

8 Entstehung von Schadstoffen

8.1 Herkunft unverbrannter Kohlenwasserstoffe im Motor

Kohlenwasserstoffemissionen HC können wie folgt entstehen:

- unvollkommene Verbrennung; Gründe für unvollkommene Verbrennung können sein:
 - * kurze zur Verbrennung zur Verfügung stehende Zeit;
 - * unvollständige Vermischung des Kraftstoffes mit der Verbrennungsluft;
 - * Betrieb von Ottomotoren mit angefettetem Gemisch (Luftmangel) bei niedriger Drehzahl und im Leerlauf; dies führt zu erhöhten CO- und HC-Emissionen;
 - * überfettetes Gemisch beim Kaltstart von Ottomotoren mit denselben Auswirkungen wie voranstehend beschrieben;
 - * Flammenverlöschten (flame quenching);
 - * aus Einspritzdüsen ausdampfender Kraftstoff.
- Schmieröleintrag aus Motorbauteilen (Büchse, Ventilschäfte).
- Verdunstungsemissionen:
 - * beim Stillstand des Motors (Tank);
 - * beim Betrieb des Motors (running losses);
 - * bei Betankungsvorgängen.

8.2 Entstehung der Partikel

Wie in Abschnitt 3 bereits angeführt, bestehen Diesel-Partikel aus mehreren Komponenten. Ein wesentlicher Bestandteil ist *Ruß*, welcher als Produkt der Luftmangelverbrennung entsteht. Der Dieselmotor wird zwar mit Luftüberschuss betrieben, doch sind wegen der Heterogenität des Gemisches stets Zonen mit Luftmangel vorhanden. Eine völlig rußfreie Verbrennung von Dieselmotorkraftstoff ist daher nicht vorstellbar. Je besser der Kraftstoff in der (gewöhnlich im Überfluss) vorhandenen Luft verteilt wird, desto geringer ist die Neigung zur Rußbildung. Eine nicht ausreichend gute Verteilung kann teilweise durch höhere Luftüberschusszahlen kompensiert werden. Weiters wird die Rußbildung durch hohe Temperatur und hohen Druck begünstigt. Genau diese Bedingungen führen jedoch bei Anwesenheit von Sauerstoff zur Oxidation von Kohlenstoff.

An die Rußteilchen lagern sich *Kohlenwasserstoffe* an, welche die organisch lösliche Phase der Partikel bilden. Dabei handelt es sich vor allem um die höhersiedenden Kraftstoffmoleküle und um Schmieröl. Die Entstehung dieser Komponenten sind in Abschnitt 3 näher erläutert.

Die *anorganische Fraktion der Partikel* entsteht vornehmlich aus der Verbrennung des in Kraftstoff und Schmieröl enthaltenen Schwefels sowie aus Phosphor und Additiven.

Das bei der Verbrennung entstehende *Wasser*, welches mit SO₂ und SO₃ schwefelige Säure und Schwefelsäure bildet, kann auf den Filtern gesammelt werden und ist den Partikeln zuzurechnen. Maßnahmen, welche die Bildung von SO₃ fördern, erhöhen die Partikel-Emission. Das ist bei der Verwendung von Oxidationskatalysatoren in bestimmten Bereichen der Abgastemperatur der Fall.

Daneben werden noch in der Ansaugluft enthaltene *Feststoffe* und *Abriebmetalle* sowie *Rost-* und *Zunderteilchen* aus dem Auspuffsystem auf den Filtern gefunden. Der Anteil dieser Feststoffe ist in der Regel gering.

8.3 Entstehung von Stickstoffoxiden

Man unterscheidet hinsichtlich der Bildung drei Arten von NO:

- Brennstoff-NO
- Promptes NO
- Thermisches NO.

8.3.1 Brennstoff-NO

Stickstoffoxid wird während des Verbrennungsprozesses aus dem im Kraftstoff gebundenen Stickstoff gebildet. Aufgrund des geringen Stickstoffgehaltes im Kraftstoff ist der Beitrag des Brennstoff-NO zur gesamten Stickstoffoxidemission von heutigen Verbrennungsmotoren zu vernachlässigen.

8.3.2 Promptes NO

In der dünnen Flammenfront entstehen, speziell bei vorgemischten sauerstoffarmen Flammen, Kohlenwasserstoff-Radikale, die mit Stickstoffmolekülen Cyanide bilden, woraus in Nebenreaktionen NO entsteht /8.1, 8.2/. In der Literatur wird der Beitrag des prompten NO zur Gesamtemission als untergeordnet angesehen /8.3, 8.4/.

8.3.3 Thermisches NO

In einer stark endothermen Reaktion wird NO aus den in der Verbrennungsluft enthaltenen Elementen Stickstoff und Sauerstoff gebildet. Diese Reaktion läuft bei entsprechender Energiezufuhr auch in Luft ab, sie ist also nicht an die Verbrennung eines Kraftstoffes gebunden. Die Bildung von NO ist zeitabhängig. Erst nach unendlich langer Zeit stellt sich ein temperaturabhängiger Gleichgewichtszustand ein. Für die Brenndauer in Verbrennungskraftmaschinen ist dieser Temperatur-Zeit-Zusammenhang von großer Bedeutung.

Die dominierenden Einflussfaktoren bei der Bildung von thermischem NO sind also:

- Temperatur
- Sauerstoffkonzentration am Ort der Verbrennung
- Verweilzeit am Ort der Verbrennung.

Daraus ist abzuleiten, dass der Lastzustand (Last und Drehzahl) eines Motors in hohem Maße dessen Stickstoffoxidemissionen beeinflusst.

9 Abgasnachbehandlung

Neben den innermotorischen Möglichkeiten (Primärmaßnahmen) gibt es Verfahren, die Schadstoffkonzentration durch Nachbehandlung des Abgases (Sekundärmaßnahmen) zu verringern. Bei Motoren mit Verbrennung bei Luftüberschuss ($\lambda > 1$) besteht das Hauptproblem in der Verminderung der Stickstoffoxide. Die bei lamdageregelten Ottomotoren als Reduktionsmittel fungierenden Moleküle C_mH_n , CO und H_2 , die im Abgas vorhanden sind, werden bei Luftüberschuss vorzeitig verbraucht, weil die Oxidationsreaktionen schneller ablaufen als die Reduktionsmechanismen. Es sind in solchen Fällen Reduktionsmittel erforderlich, die nur mit dem Stickstoffmonoxid selektiv reagieren. Prozessbedingt kommen daher bei Dieselmotoren nur selektive Verfahren in Frage. Eine Aufstellung der Reduktionsverfahren zeigt **Bild 9.1**:

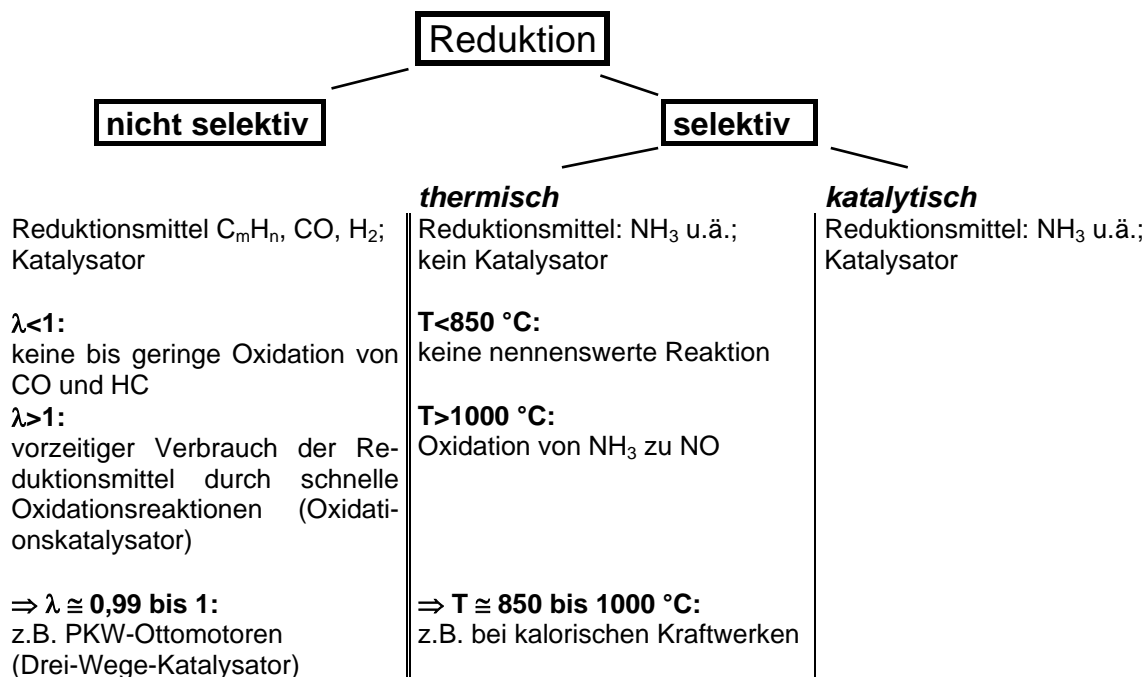


Bild 9.1: Reduktionsverfahren

9.1 Nicht selektive katalytische Verfahren

9.1.1 Oxidationskatalysator

Zur Verminderung der CO- und HC-Emissionen werden bei Dieselmotoren mit Erfolg Oxidationskatalysatoren eingesetzt. Auch die organische Fraktion der Partikel wird durch diese Maßnahme deutlich verringert. Zudem werden Geruchsprobleme deutlich entschärft. Vor allem bei Dieselmotoren, die mit RME (Rapsöl-Methyl-Ester, „Biodiesel“) betrieben werden, ist dies ein wichtiger Aspekt.

9.1.2 Drei-Wege-Katalysator

Am bekanntesten und weitesten verbreitet ist die nicht selektive katalytische Reduktion, die neben Oxidationsreaktionen im Abgaskatalysator von lamdageregelten Ottomotoren stattfindet (Drei-Wege-Katalysatoren). Gemessene Konvertierungsraten (Umwandlungsraten) eines Drei-Wege-Katalysators zeigt **Bild 9.2** gemäß /9.1/.

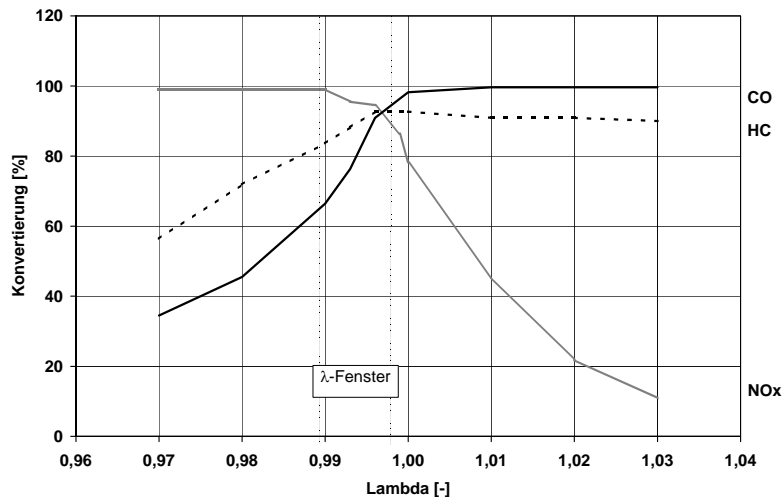


Bild 9.2: Konvertierungsraten, 3-Wege-Katalysator

9.2 Selektive katalytische Reduktion

Bei der Reduktion von NO zu N₂ und O₂ ($2\text{NO} \rightleftharpoons \text{N}_2 + \text{O}_2$) tritt das Problem auf, dass diese Reaktion nur bei Temperaturen >850 °C und nur sehr langsam abläuft. Als Lösung bietet sich die Verwendung eines Reduktionsmittels an, um auf Umwegen über schnellere Reaktionen bei tieferen Temperaturen die Zerlegung von NO-Molekülen zu erreichen. Bislang ist nämlich kein Katalysator bekannt, der diese Reaktion ohne Zuhilfenahme eines Reduktionsmittels beschleunigt.

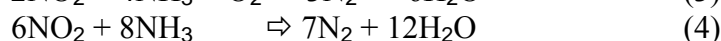
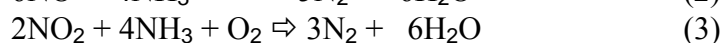
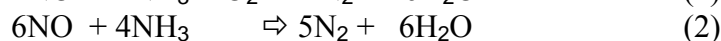
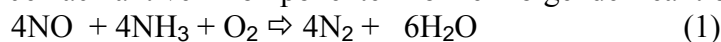
Beim Verfahren der selektiven katalytischen Reduktion - allgemein bekannt als SCR-Verfahren (Selective Catalytic Reduction) - werden die Stickstoffoxide unter Zugabe eines Reduktionsmittels katalytisch in Stickstoff (N₂) und Wasser umgewandelt. Als Reduktionsmittel werden Ammoniak (NH₃), Ammoniak in wässriger Lösung oder Harnstoff ((NH₂)₂CO) in wässriger Lösung eingesetzt. Andere Reduktionsmittel wie Methan (CH₄), CO oder H₂ reagieren bei den heute vorwiegend eingesetzten Katalysatoren entweder zu träge mit NO_x oder zu stark mit O₂, also nicht-selektiv. Es gibt allerdings auch Versuche mit stickstofffreien Reduktionsmitteln auf HC-Basis.

Das SCR-Verfahren hat sich im Einsatz bei Stationärbetrieb bewährt.

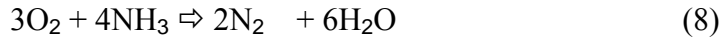
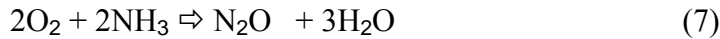
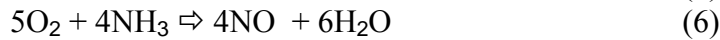
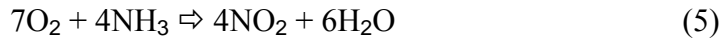
9.2.1 Reaktionen bei der selektiven katalytischen Reduktion

Die Funktionsweise des SCR-Verfahrens wird am Beispiel der Ammoniakeinspritzung in das Abgas vor dem Katalysator erläutert.

Je nach aktiven Komponenten können folgende Reaktionen ablaufen:



Bei hoher Temperatur treten zudem unerwünschte Nebenreaktionen auf, die zu hohem NH_3 -Verbrauch und unerwünschten Schadstoffemissionen führen:

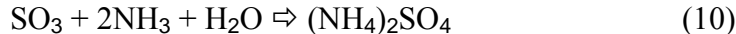


Bei einer Überdosierung tritt NH_3 unverbraucht aus dem Katalysator aus. Diese Erscheinung wird NH_3 -Schlupf genannt und ist äußerst unerwünscht. Eine technisch mögliche Nachverbrennung des Ammoniaks würde erneut zu NO_x -Bildung führen.

Im Stationärbetrieb wird die Ammoniakendösung so dosiert, dass ein Schlupf von < 30 ppm NH_3 verlässlich eingehalten wird.

Abgesehen von Nebenreaktionen ist der Mechanismus der Stickstoffoxidreduktion bei Verwendung von Harnstoff identisch der Verwendung von Ammoniak, da nach Einspritzung dieses Reduktionsmittels in das heiße Abgas eine selbsttätige Pyrolyse/Hydrolyse zu NH_3 einsetzt.

Da der Katalysator nicht immer völlig selektiv arbeitet, kommt es unter Umständen zu einer Konvertierung von SO_2 zu SO_3 . Bei niedrigen Temperaturen werden Folgereaktionen begünstigt, die zur Bildung von Ammoniumsulfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ und Ammoniumhydrogensulfat NH_4HSO_4 führen /9.2/:



Die Ablagerung dieser Sulfate an der Katalysatoroberfläche ist unerwünscht, da die Katalysatoraktivität dadurch verringert werden kann.

9.2.2 Katalysatoren

Für Dieselmotoren werden Katalysatoren in Form von Wabenkörpern eingesetzt. Es gibt sowohl Vollkatalysatoren als auch Trägerkatalysatoren mit aktiver Beschichtung. Als aktives Material werden hauptsächlich Titandioxid (TiO_2), Oxide von Vanadium, Molybdän, Wolfram und Chrom sowie Konstruktionen auf Eisen- und Zeolithbasis eingesetzt. Zeolithe sind kristalline, hydratisierte Alumosilikate, deren Eigenschaften durch Temperaturbehandlung, Änderung des Verhältnisses $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, Zusatz von Platin und Wahl der Geometrie sehr stark verändert werden können. Das Poren-, Hohlraum- und Kanalsystem kann so abgestimmt werden, dass nur Moleküle der gewünschten Größe in das Innere des Zeolithen gelangen können. Auch dadurch wird eine selektive Wirkung erzielt.

Die Wirkung der Zeolithe besteht in der Schwächung der Bindung jener Moleküle, die sich an saure Zentren der Kristallstruktur anlagern. Dies sind hauptsächlich NH_3 -Moleküle, die in der Folge mit NO reagieren.

9.2.3 Verhalten der SCR-Katalysatoren im Motorbetrieb

Die Konvertierungsraten in SCR-Katalysatoren sind stark temperaturabhängig. In **Bild 9.3** sind der NO_x -Umsatz sowie das Verhältnis SO_2/SO_3 (aus der Oxidation von SO_2 zu SO_3) für verschiedene Katalysatoren (A, B, C) nach /9.3/ dargestellt.

Es ist klar ersichtlich, dass bei hohen Konvertierungsraten für NO_x auch die Umsetzung von SO_2 zu SO_3 signifikante Ausmaße annehmen kann.

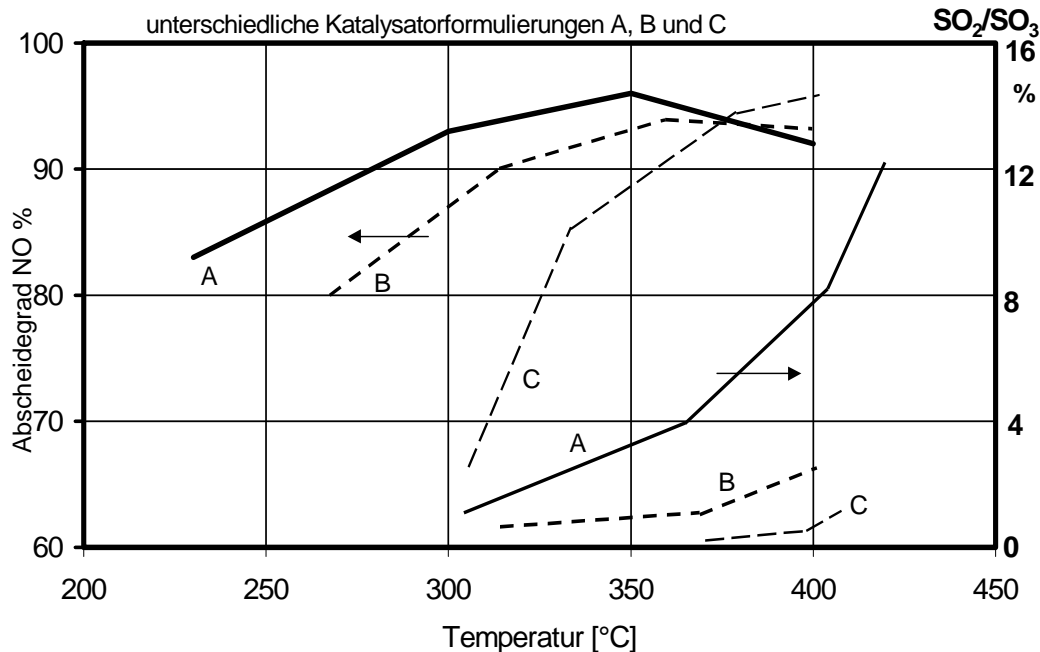


Bild 9.3: Einfluss von Temperatur und Zusammensetzung auf den Konvertierungsgrad

Weiters benötigt ein SCR-Katalysator nach der ersten Einspritzung von NH_3 eine bestimmte Zeit, bis die Stickstoffoxid-Konvertierung von Null auf den Höchstwert ansteigt, welcher der jeweiligen Formulierung (Zusammensetzung) des Katalysators entspricht. Je nach Katalysator nimmt dieser Anstieg nach /9.2/ bei 300 °C Katalysatortemperatur zwischen 150 Sekunden und mehreren Minuten in Anspruch, wie in **Bild 9.4** für stationären Motorbetrieb dargestellt ist. Umgekehrt kann nach Beendigung der Eindüsung von NH_3 noch einige Zeit eine Stickstoffoxidkonvertierung auf hohem Niveau beobachtet werden. Das bedeutet, dass eine bestimmte Menge an Ammoniak im Katalysatorvolumen gespeichert sein muss.

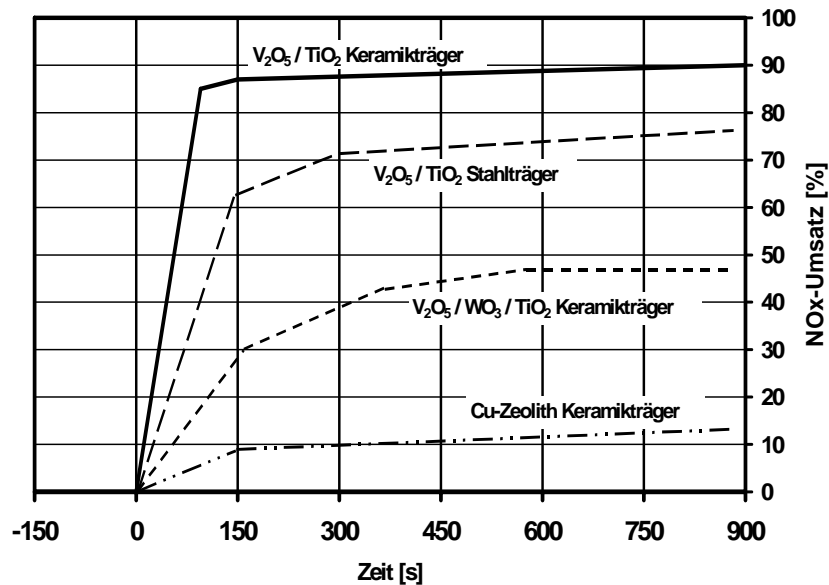


Bild 9.4: Zeit-Konvertierungs-Zusammenhang

Bei konstantem Motorbetrieb halten sich zudosiertes und verbrauchtes NH_3 das Gleichgewicht. Bei einem Lastsprung hingegen muss die Dosierung neben dem NO_x -Niveau dem temperaturabhängigen Wirkungsgrad des Katalysators und der gespeicherten Ammoniakmenge angepasst werden. Aufgrund der Systemträgheiten lassen sich Werte für den Ammoniakslupf, die deutlich über den Konzentrationen des Stationärbetriebs liegen und Umsatzraten für NO_x , die deutlich unter dem stationär möglichen Wert liegen, nicht vermeiden.

Aus diesen Zusammenhängen ist abzuleiten, dass bei SCR-Systemen für den instationären Motorbetrieb neben optimierten Katalysatorformulierungen und Geometrien die Regelstrategie (Motor-, Katalysatorregelung) eine dominierende Rolle spielt.

Erste Erfolge wurden bereits dadurch erzielt, dass Fährschiffe mit der SCR-Technologie ausgerüstet wurden. Die Laständerungen bei Schiffsmotoren sind moderat und deshalb leichter beherrschbar als beispielsweise in Straßenfahrzeugen.

Im Bereich der Nutzfahrzeuge sind in jüngster Zeit intensive Anstrengungen zur Entwicklung von SCR-Katalysatoren und geeigneter Regelung zu verzeichnen /9.4/.

Es wird berichtet, dass durch die Kombination eines Titanoxid-Wolframoxid-Katalysators mit einer rechnergesteuerten Eindüsung von Harnstoff in das Abgas Stickstoffoxidminderungen von bis zu 70 % im ECE R49-Test und mindestens 60 % im Fahrbetrieb erreicht werden /9.4/. Die Dosierung des Reduktionsmittels erfolgt unter Verwendung von Motor- und Katalysatorkennfeldern, wobei die aktuellen Motorbetriebsdaten und die Abgastemperaturen verarbeitet werden. Die Emission von Reduktionsmittel und Folgeprodukten (besonders Lachgas - N_2O) erfolgt nicht. Der spezifische Harnstoffverbrauch beträgt rund 4 % des Kraftstoffverbrauches. Die Weiterentwicklung des Systems zielt auf fahrzeugtaugliche Sensoren für Stickstoffoxide und Ammoniak sowie die Verwirklichung eines geschlossenen Regelkreises (Closed-Loop-Regelung; Dosierung des Reduktionsmittels in Abhängigkeit des NO_x - und Ammoniakgehaltes nach Katalysator) ab.

9.2.4 HC-SCR Katalysatoren

Ende der achtziger Jahre wurde erstmals über HC-SCR-Verfahren berichtet. Die NO-Reduktion erfolgt mittels Kupfer-Zeolith- oder Edelmetall-Katalysatoren (z.B. Platin) unter Beigabe von stickstofffreien Reduktionsmitteln, vornehmlich Ethen oder Propen. Daraus leitet sich die Bezeichnung des Verfahrens ab (HC = Kohlenwasserstoffe). Erstere Katalysatoren zeigen ein Konvertierungsmaximum für NO bei vergleichsweise hohen Temperaturen, weshalb sie der Kategorie der Hochtemperatur-Katalysatoren (HT) zugeordnet werden. Niedertemperatur-Katalysatoren (LT) auf Edelmetallbasis weisen einen sehr engen Arbeitsbereich auf und verhalten sich oberhalb einer bestimmten Temperatur wie Oxidationskatalysatoren.

Grundsätzlich sind die Reduktionsreaktionen auch mit Dieselkraftstoff als Reduktionsmittel möglich. Allerdings sind die Konvertierungsraten für NO vergleichsweise niedrig. Das führt zu hohem Kraftstoffverbrauch. Bessere Ergebnisse lassen sich mit niedrigsiedenden Fraktionen des Dieselkraftstoffes erzielen /9.5/.

Während an HT-Katalysatoren keine nennenswerten Mengen an Distickstoffmonoxid (N₂O) gebildet werden, tendieren platinhaltige LT-Konverter zu ausgeprägter Bildung von unerwünschtem, umweltschädlichem N₂O. Das Problem des HC-Schlupfes hingegen ist bei der LT-Technologie weit geringer.

Zur Vermeidung der erwähnten Nachteile ist eine serielle Anordnung von HT- und LT-Katalysatoren möglich.

9.2.5 Adsorberkatalysatoren

Adsorber sind Materialien, die NO_x bei überstöchiometrischen Luftverhältnissen (mageres Gemisch) dadurch speichern, dass diese Moleküle an der Oberfläche adsorbiert werden. Bei fetten Luftverhältnissen werden Stickstoffoxide desorbiert und reduziert. Die sauren Stickstoffoxide haften an den basischen Oxiden des Adsorbers, z.B. Bariumoxid BaO. Die Funktionsweise von Adsorber- oder Speicherkatalysatoren wird im Folgenden am Beispiel von BaO erläutert.

Im Abgas kommt NO_x in Form von NO und NO₂ vor. Letzteres wird leichter adsorbiert. NO wird zum Teil adsorbiert, zum Teil oxidiert:



Weiters erfolgt eine Adsorption von NO₂:



(12) und (13) sind „magere“ Adsorptionsreaktionen.

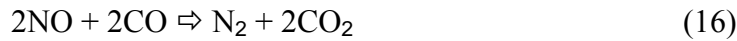
Die Speicherfähigkeit des Adsorbers ist nach einer bestimmten Menge von NO bzw. NO₂ erschöpft. Es ist deshalb ein Desorptionsprozess notwendig. Dieser benötigt Energie zum Lösen der Bindung, die beispielsweise aus der Verbrennung von CO oder HC (aus Dieselkraftstoff) gewonnen wird:



Diese exotherme Reaktion ermöglicht die Rückreaktion von (12):



Wenn diese Reaktion bei Luftmangel an der Oberfläche eines Edelmetallkatalysators (z.B. Pt) durchgeführt wird, kann CO (oder HC aus Dieselmotoren) als Reduktionsmittel fungieren (siehe **Bild 9.2**):



Die Reaktion (16) würde auch unter mageren Bedingungen ablaufen. Es muss allerdings das NO_x zu N_2 reduziert werden, weshalb Luftmangelbedingungen notwendig sind. Bei Sauerstoffüberschuss würde ein Großteil des Reduktionsmittels vorzeitig durch die schnellen Oxidationsreaktionen verbraucht. Dies erhöht den Reduktionsmittelverbrauch.

Das Speichervermögen des Adsorbers ist temperaturabhängig. Es nimmt mit zunehmender Temperatur ab, weil $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ thermisch instabil wird.

Ein „Adsorbergift“ stellt der im Kraftstoff enthaltene Schwefel dar, der in Form von SO_2 mit dem Bariumoxid das überaus stabile Bariumsulfat BaSO_4 bildet:



Das Bariumsulfat kann kaum mehr vom Adsorber entfernt werden und blockiert somit die für NO und NO_2 erforderlichen Plätze.

Auch auf dem Gebiet der Adsorber- oder Speicherkatalysatoren sind intensive Entwicklungsarbeiten für den Fahrzeugeinsatz im Gange.

9.3 Rußreduktionssysteme

Gegensätzlich zu den bisher beschriebenen Abgasnachbehandlungssystemen versuchen die nachfolgend beschriebenen Systeme die zweite kritische Schadstoffkomponente – den Ruß - im Abgas des Dieselmotors zu reduzieren.

Ruß entsteht bei Dieselmotoren bei hoher Last und insbesondere niedrigen Drehzahlen, verstärkt bei Motoren mit Turboaufladung. Gründe hierfür sind:

- geringer Einspritzdruck bei niedriger Drehzahl
- schlechte Gemischaufbereitung,
- geringer Ladedruck.

Im Bereich des besten Wirkungsgrades ist die Gemischbildung optimiert, die Rußbildung daher gering. Kraftfahrzeugmotoren werden aber überwiegend instationär betrieben. Bei der Emissionsoptimierung eines solchen Motors muss daher sowohl auf die NO_x - als auch auf die Rußbildung geachtet werden.

Hinsichtlich Stationärmotoren ergeben sich hingegen folgende Erkenntnisse:

- Stationärmotoren werden überwiegend in einem schmalen Drehzahlbereich betrieben. Auf diesen Drehzahlbereich werden die Motoren optimiert (z.B. Synchrongenerator). Dadurch ergeben sich geringer Verbrauch und meist geringe Rußbildung. Die NO_x -Emissionen sind deshalb in diesem Bereich eher hoch.

- Bei instationärer Betriebsweise von ortsfesten Motoren kann aber auch die Rußbildung ein Problem darstellen.

9.3.1 CRT Filter System (Continuous Regeneration Trap)

Das CRT Filter System wurde im Jahre 1997 von der britischen Firma Johnson&Matthey entwickelt. Das Verfahren beruht darauf, dass durch Serienschaltung eines Platinkatalysators und eines speziellen Rußfilters bei entsprechender Abgaszusammensetzung und einer bestimmten Mindesttemperatur die Rußpartikel um bis zu 95 % vermindert werden.

Im ersten Teil des CRT-Systems wird Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid oxidiert. Den zweiten Teil des Systems bildet ein beschichtetes "Stahlwolle"-Geflecht, an dem sich Rußpartikel fangen, die ab einer bestimmten Temperatur durch den Sauerstoff bzw. durch NO₂ oxidiert werden.

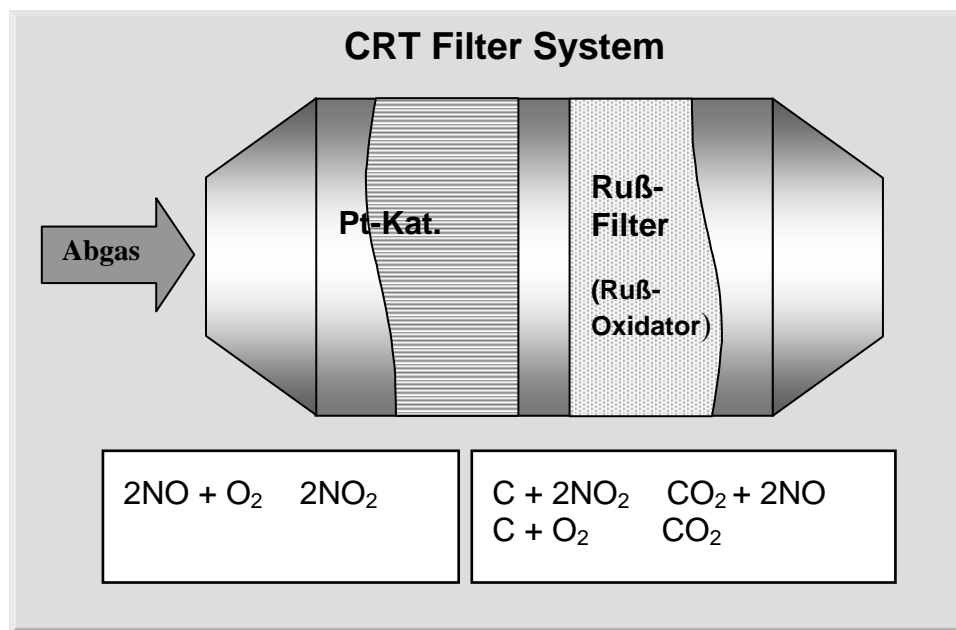


Bild 9.5: CRT Filter System

Die chemischen Formeln zeigen, dass der NO-Ausstoß theoretisch konstant bleibt und das Verhältnis zwischen Stickstoffoxid- und Rußausstoß für optimalen Betrieb aufeinander abgestimmt werden muss.

Prüfstandsmessungen zeigten folgendes Ergebnis:

Table 9.1: Vergleichsmessungen mit und ohne CRT Filter System

| | | ohne CRT | mit CRT |
|---------------------|-------|----------|---------|
| NO _x | g/kWh | 2,42 | 2,37 |
| Partikel (Ruß, ...) | g/kWh | 0,18 | 0,015 |
| HC | g/kWh | 0,125 | 0,010 |
| CO | g/kWh | 1,083 | 0,072 |
| b _e | g/kWh | 210,5 | 212,5 |

mit: b_e ... spezifischer Kraftstoffverbrauch

Nachteil des Systems:

Für die Funktion des Systems ist ein schwefelarmer Kraftstoff (S < 10 ppm) erforderlich. Die NO_x- und die Partikelemissionen des Motors müssen in Betriebsbereichen mit hohem Rußausstoß aufeinander abgestimmt werden.

In Skandinavien, insbesondere Finnland, wird dieses System zur Zeit in Omnibussen und LKW flächendeckend im Testbetrieb eingesetzt.

9.3.2 PSA Partikelfilter System

Das PSA Partikelfilter System wird von PSA Peugeot Citroen seit 1999 in Serie bei HDI-Motoren angeboten.

Ähnlich dem CRT-System werden die Rußpartikel auch hier in einem dem Oxidationskatalysator nachgeschalteten Filtersystem aufgefangen und gesammelt. Die notwendige Abbrandtemperatur von 550 °C würde erst bei Lastzuständen von mehr als 80 % der Volllast erreicht werden. Beim PSA-System wird zur Absenkung der Abbrandtemperatur auf 450 °C nach dem Tankvorgang dem Kraftstoff ein Zusatzstoff beigemischt. Die Abbrandtemperatur wird nun bei Lasten über ~50 % erreicht. Die Motorelektronik misst kontinuierlich den Beladungsgrad des Filters und löst die Regenerationsphase aus. Sollte in dieser Phase die Last unter 50 % bzw. die Abgastemperatur unter 450 °C fallen, wird die sich durch das Common-Rail-Einspritzsystem bietende Möglichkeit der Nacheinspritzung ausgenutzt. Dabei wird nach der Haupteinspritzung nochmals eine geringe Menge Kraftstoff eingespritzt, was eine höhere Abgastemperatur zur Folge hat.

Als Kraftstoffzusatz kommt „Eolys“ - eine Verbindung auf Cerinbasis - zur Verwendung, wobei ein Mischungsverhältnis von 37,5 ml auf 60 l Kraftstoff eingehalten wird. Die Beimischung erfolgt aus einem Zusatztank mittels elektronischer Steuerung, die den Füllstand des Tanks misst. Der Zusatztank fasst 5 l und reicht für ca. 80.000 km.

Für höher belastete Stationärmotoren wäre dies ein brauchbares und relativ kostengünstiges System zur Senkung der Rußemissionen. Ein Motor mit einer Leistung von 200 kW bräuchte unter Volllast ca. 4 Liter dieses Zusatzstoffes je 100 Betriebsstunden.

10 Abgasmessdaten

10.1 Allgemeines

Die aufgrund der Motorauslegung möglichen Bereiche für Last und Drehzahl werden durch das Kennfeld eines Motors beschrieben. Üblich sind Kennfelder für den Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von Drehzahl und Last, ferner für Abgasemissionen, Luftverbrauch und dergleichen.

Die Abgasemission eines Verbrennungsmotors wird maßgeblich durch die Lage des Betriebspunktes im Kennfeld der Maschine bestimmt. Abgaskennfelder sind aber nur in Einzelfällen außerhalb der Entwicklungsstätten verfügbar. Die gesetzlich vorgeschriebenen Zertifizierungswerte geben praktisch keinen Aufschluss über das Emissionsverhalten eines Motors unter variierenden Lastzuständen, da die Ergebnisse jeweils als Einzahlenangaben für einen Test mit mehreren Lastpunkten vorliegen. Lediglich die Zertifizierungsstelle hat Einblick in die Detailergebnisse, die auf dem Prüfstand erzielt werden. Deshalb sollen in diesem Abschnitt grundlegende Zusammenhänge für das Emissionsverhalten im Kennfeld dargelegt werden.

10.2 Messergebnisse Salzburg

Messungen an nachfolgend angeführten Anlagen wurden durch das Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 16, Umweltschutz durchgeführt.

Die Emissionskonzentrationen sind bezogen auf Normzustand (0 °C, 1013 mbar und bezogen auf 5 % Sauerstoff, trockenes Abgas), NO_x angegeben als NO₂.

10.2.1 Dieselaggregat mit Abgasnachbehandlung

Fabrikat Perkins

Type unbekannt

Elektrische Leistung 177 kW_{el}

Abgasnachbehandlung: SCR mit Harnstoffeindüsung

10.2.1.1 Messung 1997 bei ausgefallener Harnstoffeindüsung

Betriebszustand: Volllast

Einspritzpumpe für Harnstofflösung war defekt.

| Messstellen | O ₂ % | CO ₂ % | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ | Abgas- temperatur °C |
|-------------|---------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| vor SCR | 6,8 | 7,7 | 412 | 3188 | 550 |
| nach SCR | 7,0 | 7,7 | 168 | 3025 | 305 |

10.2.1.2 Kontrollmessung 1999 mit instandgesetzter Harnstoffeindüsung

Betriebszustand: 100 bis 150 kW_{el}
 Abgastemperatur: 230 bis 250 °C

| Messstellen | O ₂ % | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ | Abgas- temperatur °C |
|-------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| nach SCR | 9,0 | 14 | 907 | 230 bis 250 |
| nach SCR | 9,1 | 15 | 967 | 230 bis 250 |

10.2.2 Dieselaggregate ohne Abgasnachbehandlung

10.2.2.1 Aggregat 1

Fabrikat Volvo
Type Penta TWD 1211 GH (R 6-Zylinder)
Leistung 220 kW_{el}

| elektrische Leistung kW _{el} | O ₂ % | CO ₂ % | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ |
|---|---------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 150 | 10,5 | 5,8 | 224 | 5068 |
| 180 | 10,0 | 6,0 | 246 | 5917 |

Der Massenstrom an NO_x beträgt ca. 5 kg/h.

10.2.2.2 Aggregat 2

Fabrikat Cummins
Type KTA 50 G3 (V 16-Zylinder)
Leistung 1050 kW_{el}

Abgastemperatur: 336 °C
 errechnetes Abgasvolumen: ca. 7500 m³/h
 Elektrische Leistung: ca. 650 kW_{el}

| Messung | O ₂ % | CO ₂ % | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ |
|---------|---------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 8,7 | 6,6 | 1029 | 3804 |
| 2 | 9,6 | 6,2 | 861 | 3769 |

Der Massenstrom an NO_x beträgt ca. 20 kg/h.

10.2.2.3 Aggregat 3

Fabrikat Caterpillar
Type 3306B ATTAC
Leistung: 200 kW_{el}

Kraftstoffverbrauch seit Inbetriebnahme: 31.000 l

Betriebsstunden: 1029

Abgastemperatur: 342 bis 362 °C

| Elektrische Leistung kW _{el} (ca.) | O ₂ % | CO ₂ % | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ |
|---|------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 40 | 10,9 | 5,5 | 413 | 2483 |
| 65 | 8,5 | 6,8 | 725 | 2325 |

10.2.3 Gasmotoren in einer Kläranlage

Fabrikat Ford
Type Power-Torque S16B
Leistung: jeweils 71 kW_{el}

Brennstoff: Klärgas

| | O ₂ % | org.-C mg/m ³ | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ |
|---------|------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Motor 1 | 0,8 | 1500 | >5000 | 2070 |
| Motor 2 | 1,8 | 3900 | >5000 | 1515 |

Lastzustand des Motors 1 war höher als der des Motors 2.

10.3 Messergebnisse Wien

Nachfolgende Emissionskonzentrationen sind bezogen auf Normzustand (0 °C, 1013 mbar und bezogen auf 5 % Sauerstoff, trockenes Abgas), NO_x angegeben als NO₂.

10.3.1 Diesellaggregat mit Abgasnachbehandlung

Die Messungen wurden an folgendem Aggregat durchgeführt:

Fabrikat Deutz MWM
Type TBD 604 BV 16
Motorleistung 1760 kW
Abgasnachbehandlung: dreistufiger Denox und einstufiger Oxidationskatalysator

10.3.1.1 Forschungsinstitut, November 1995

| Leistung | Staub mg/Nm ³ | NH ₃ mg/Nm ³ | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ |
|----------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 100 % | 28,3 | 2,9 | 69 | 203 |
| 75 % | 26,7 | 2,0 | 70 | 122 |
| 50 % | 26,2 | 0,89 | 41 | 110 |

10.3.1.2 Zivilingenieurbüro, Juni 1996

Abgastemperatur: 380 °C

Generatorleistung: 1000 kW

| | Staub mg/Nm ³ | NH ₃ mg/Nm ³ | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ |
|------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Mittelwert | 27,7 | 1,4 | 39 | 104 |

10.3.1.3 Akkreditierte Versuchsanstalt, September 1997

Elektrische Leistung: 1500 kW

| | Staub mg/Nm ³ | NH ₃ mg/Nm ³ | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ |
|------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Mittelwert | 9,2 | 0,16 | 104,4 | 119,5 |

10.3.1.4 Büro für Umwelttechnik, Juni 1998

Diese Messung erfolgte nach 902 Betriebsstunden.

Abgasvolumen: 8557 m³ bei 1600 kW und
5742 m³ bei 1000 kW Motorleistung

| Motor- leistung kW | Rohgas NO _x mg/Nm ³ | Rohgas CO mg/Nm ³ | Reingas NH ₃ mg/Nm ³ | Reingas CO mg/Nm ³ | Reingas NO _x mg/Nm ³ |
|--------------------------|---|------------------------------------|--|-------------------------------------|--|
| 1600 | 3937 | 213 | 4,2 | 147 | 702 |
| 1300 | 4079 | 162 | | 88 | 642 |
| 1000 | 3710 | 213 | 4,3 | 90 | 154 |
| 600 | 3707 | 252 | | 47 | 316 |

10.3.1.5 Büro für Umwelttechnik, November 1998

Diese Messung erfolgte nach Waschen der Katalysatoren.

Abgasvolumen: 8243 m³ bei 1600 kW und
5643 m³ bei 1000 kW Motorleistung

| Motorleistung | O ₂ | Reingas NH ₃ | Reingas CO | Reingas NO _x |
|---------------|----------------|----------------------------|---------------|----------------------------|
| | | | | |

| kW | % | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ |
|------|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1600 | 11,9 | 2,5 | 132 | 162 |
| 1300 | 11,3 | | 72 | 203 |
| 1000 | 11,6 | 1,8 | 60 | 121 |
| 600 | 12,6 | | 29 | 184 |

10.3.1.6 Ziviltechnikerprüfungsgemeinschaft, Oktober 1998

Abgastemperatur: 365 °C

Lastentnahme: 1500 kW

| | Staub mg/Nm ³ | NH ₃ mg/Nm ³ | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ |
|------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Mittelwert | 15 | 1,6 | 89 | 26 |

10.3.2 Diesellaggregate ohne Abgasnachbehandlung

10.3.2.1 Messung eines Iveco-Motors

Die Messungen wurden an folgendem Aggregat mit Minilyzer durchgeführt:

Fabrikat Iveco
Type 8361 Sri 15
Motorleistung 131 kW

| elektrische Leistung kW _{el} | O ₂ % | CO ₂ % | NO _x mg/Nm ³ | Abgas- temperatur °C |
|---|---------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| 45 | 12,9 | 5,9 | 3660 | 332 |
| 80 | 13,3 | 5,6 | 3073 | 401 |
| 0 | 18,1 | 2,1 | 831 | 170 |

10.3.2.2 Messung eines Volvo-Motors

Die Messungen wurden durchgeführt mit Testo 33 an folgendem Aggregat:

Fabrikat Volvo
Type TAD 1030 G
Leistung 200 kW_{el}

Abgastemperatur: 346 °C

Abnahme durch Einspeisung ins Netz: annähernd 100 %

| | O ₂ % | CO ₂ % | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ |
|------------|---------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Mittelwert | 12,8 | 5,9 | 103 | 3437 |

Die Staubmessung mit einem Rauchgastester Bosch RTT 100 ergab 5 mg/Nm³.

10.3.2.3 Messung durch akkreditierte Prüfanstalt

Die Messungen wurden an folgendem Aggregat durchgeführt:

**Fabrikat Volvo Penta
Type TWD 1010 G**

| Elektrische Leistung kW (ca.) | Abgasvolumen Nm ³ /h | Abgastemperatur °C | Staub mg/Nm ³ | HC mg/Nm ³ | CO mg/Nm ³ | NO _x mg/Nm ³ |
|-------------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 95 | 466 | 359 | 19,1 | 70 | 224 | 4345 |
| 143 | 586 | 418 | 22,9 | 60 | 412 | 3749 |
| 190 | 713 | 456 | 44,5 | 50 | 1303 | 3254 |
| 209 | 786 | 474 | 65,0 | 47 | 1715 | 3197 |
| 228 | 827 | 494 | | 36 | 1674 | 3086 |

10.4 Messergebnisse Tirol

10.4.1 Messungen an einem Dieselmotor

Die Messungen wurden vor und nach Ausrüstung des Aggregates mit einem SCR-Katalysator an folgendem Motor vorgenommen:

**Fabrikat Perkins
Type 3012 TAG 3A
4-Takt-Dieselmotor
12 Zylinder
Hubraum 26,11 l
Direkteinspritzung
Turbolader mit Ladeluftkühler
mechanische Leistung bei Vollast 741 kW bei 1500 U/min
Bj. 1996**

SCR-OXIKAT-Anlage: HUG EM 16-4, Bj. 1998

Messungen vor Katalysatoreinbau am 16.4.1997, nach Katalysatoreinbau am 5.3.1998.

Während der Messdauer wurde der Motor zwischen Leerlauf und „Normallast“ (674 kW) betrieben. Der Leerlaufanteil betrug rund 30 % der Messdauer.

Sämtliche Messwerte [mg/m³] sind auf 5 % O₂, trockenes Abgas und 1013 mbar bezogen.

| Schadstoff | ohne Kat. | mit Kat. | Grenzwert lt. Bescheid ^{*)} |
|------------|-----------|----------|--------------------------------------|
|------------|-----------|----------|--------------------------------------|

| | | | |
|-------------------------------------|------|-----|-----|
| CO | 663 | 60 | 150 |
| NO _x als NO ₂ | 2767 | 258 | 400 |
| org.-C | 224 | 5,6 | - |
| Staub | 39 | 13 | 50 |

*) bei üblicherweise vorherrschenden Betriebszuständen entsprechend LRV-K 1989, BGBl. Nr. 19/1989, i.d.F. BGBl. II Nr. 324/1997.

10.4.2 Messungen an einem Gas-Otto-Motor

Bei einer Anlage sind zwei BHKW-Module (je 90 kW elektrisch, 180 kW thermisch) installiert, die mit Erdgas betrieben werden:

Motoren:

Fabrikat Scania
Type DS/DN 11, 4-Takt-Gas-Ottomotor
6 Zylinder
Hubraum 11 l
mechanische Leistung bei Volllast 97 kW bei 1530 U/min
Bj. 1994
ausgerüstet mit 3-Wege-Katalysator

Messung 1: vor Katalysatorerneuerung am 11.3.1999 (Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. ESA)

Sämtliche Messwerte (Halbstundenmittelwerte) sind auf trockenes Abgas bei 0 °C und 1013 mbar bezogen, Modul 1 bei 83 kW elektrisch, Modul 2 bei 86 kW elektrisch.

| Schadstoff | Modul 1 [mg/m ³] | Modul 2 [mg/m ³] | Grenzwert lt. Bescheid [mg/m ³] |
|-------------------------------------|---------------------------------|---|--|
| CO | 26 bei 10 % O ₂ | >392 ^{*)} bei 6 % O ₂ | 150 bei 5 % O ₂ |
| NO _x als NO ₂ | >2150* bei 10 % O ₂ | 605 bei 6 % O ₂ | 100 bei 3 % O ₂ |
| HC | - | - | 75 bei 5 % O ₂ |
| O ₂ | 10 % | 6 % | |

*) Messbereichsüberschreitung

Messung 2: Tausch der Lambdasonden und der Steuergeräte am 30.12.1999. Messungen durch die Errichterfirma nach Katalysatorerneuerung (keine genauen Angaben über Last und Messzeitraum). Messwerte bezogen auf 0 °C und 1013 mbar, Bezugssauerstoff lt. Grenzwertfestlegung.

| Schadstoff | Modul 1 [mg/m ³] | Modul 2 [mg/m ³] | Grenzwert lt. Bescheid [mg/m ³] |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| CO | 52 bei 5 % O ₂ | 39 bei 5 % O ₂ | 150 bei 5 % O ₂ |
| NO _x als NO ₂ | 67 bei 3 % O ₂ | 64 bei 3 % O ₂ | 100 bei 3 % O ₂ |
| HC | - | - | 75 bei 5 % O ₂ |

10.5 Prüfstandsergebnisse

10.5.1 LKW-Motoren

Nachfolgend sind die Schadstoffemissionswerte von zwei untersuchten LKW-Motoren in Tabellenform angeführt. Beide sind Entwicklungsstand 1999. Ersterer erreicht annähernd EURO III ($\text{NO}_x = 5,0 \text{ g/kWh}$), der zweite EURO II ($\text{NO}_x = 7,0 \text{ g/kWh}$). Der nachfolgend angeführte Motor wurde zudem mit verschiedenen alternativen Kraftstoffen betrieben (100 % AME ~ RME).

Motor 1:

Hubraum: 12 l

Nennleistung: 300 kW bei 1800 U/min

Common-Rail, Vorserie

| DIESEL | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------|----------|-------|------|-----|-----|-----|------|--------|--------|--------|---------|----------|---------|
| Nr. | n | Last | P | RW | HC | NOx | CO | O2 | HC | NOx | CO | HC 5%O2 | NOx 5%O2 | CO 5%O2 |
| - | Upm | % | kW | FSN | ppm | ppm | ppm | % | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n |
| 1 | 610 | 0 (LL) | 0,3 | 0,05 | 104 | 201 | 72 | 19,8 | 167 | 413 | 90 | 2174 | 5369 | 1171 |
| 2 | 1200 | 100 (VL) | 220,4 | 0,55 | 109 | 696 | 83 | 6,4 | 175 | 1429 | 104 | 192 | 1565 | 114 |
| 3 | 1500 | 50 | 138,2 | 0,55 | 80 | 612 | 72 | 11,5 | 129 | 1257 | 90 | 217 | 2123 | 152 |
| 4 | 1500 | 75 | 208,3 | 0,24 | 76 | 679 | 58 | 10,0 | 122 | 1394 | 73 | 178 | 2034 | 106 |
| 5 | 1200 | 25 | 109 | 0,84 | 74 | 635 | 126 | 9,9 | 119 | 1304 | 158 | 171 | 1871 | 226 |
| 6 | 1200 | 75 | 163,8 | 0,55 | 73 | 699 | 104 | 7,7 | 117 | 1435 | 130 | 141 | 1726 | 156 |
| 7 | 1200 | 50 | 54,8 | 0,74 | 74 | 514 | 79 | 13,9 | 119 | 1056 | 99 | 269 | 2389 | 223 |
| 8 | 1500 | 100 (VL) | 273 | 0,49 | 67 | 664 | 66 | 9,1 | 108 | 1364 | 83 | 145 | 1833 | 111 |
| 9 | 1500 | 25 | 69,2 | 0,58 | 74 | 502 | 64 | 14,3 | 119 | 1031 | 80 | 284 | 2462 | 191 |
| 10 | 1800 | 100 (VL) | 295,8 | 0,3 | 64 | 629 | 64 | 10,1 | 103 | 1292 | 80 | 150 | 1887 | 117 |
| 11 | 1800 | 25 | 73,4 | 0,11 | 70 | 560 | 48 | 14,9 | 113 | 1150 | 60 | 293 | 2992 | 156 |
| 12 | 1800 | 75 | 218,1 | 0,28 | 61 | 526 | 60 | 11,5 | 98 | 1080 | 75 | 165 | 1817 | 126 |
| 13 | 1800 | 50 | 146,1 | 0,54 | 62 | 463 | 62 | 12,9 | 100 | 951 | 78 | 196 | 1871 | 153 |

| SCHWEFELARMER DIESEL | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|------|----------|-------|------|-----|-----|-----|------|--------|--------|--------|---------|----------|---------|
| Nr. | n | Last | P | RW | HC | NOx | CO | O2 | HC | NOx | CO | HC 5%O2 | NOx 5%O2 | CO 5%O2 |
| - | Upm | % | kW | FSN | ppm | ppm | ppm | % | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n |
| 1 | 611 | 0 (LL) | 0,3 | 0,05 | 64 | 206 | 51 | 19,8 | 103 | 423 | 64 | 1338 | 5503 | 829 |
| 2 | 1200 | 100 (VL) | 220,4 | 0,43 | 81 | 723 | 77 | 6,4 | 130 | 1485 | 96 | 143 | 1629 | 106 |
| 3 | 1500 | 50 | 138 | 0,48 | 48 | 629 | 68 | 11,6 | 77 | 1292 | 85 | 131 | 2192 | 144 |
| 4 | 1500 | 75 | 207,7 | 0,19 | 46 | 695 | 58 | 10,1 | 74 | 1427 | 73 | 109 | 2097 | 107 |
| 5 | 1200 | 25 | 109,6 | 0,66 | 42 | 653 | 111 | 10,0 | 68 | 1341 | 139 | 98 | 1942 | 201 |
| 6 | 1200 | 75 | 164 | 0,41 | 43 | 722 | 91 | 7,8 | 69 | 1483 | 114 | 84 | 1799 | 138 |
| 7 | 1200 | 50 | 55 | 0,58 | 40 | 531 | 69 | 14,1 | 64 | 1090 | 86 | 148 | 2510 | 199 |
| 8 | 1500 | 100 (VL) | 273 | 0,43 | 38 | 689 | 64 | 9,2 | 61 | 1415 | 80 | 83 | 1914 | 108 |
| 9 | 1500 | 25 | 68,3 | 0,49 | 41 | 515 | 62 | 14,4 | 66 | 1058 | 78 | 160 | 2572 | 188 |
| 10 | 1800 | 100 (VL) | 295,9 | 0,28 | 38 | 654 | 65 | 10,1 | 61 | 1343 | 81 | 90 | 1973 | 119 |
| 11 | 1800 | 25 | 73,4 | 0,05 | 40 | 624 | 46 | 14,9 | 64 | 1281 | 58 | 169 | 3361 | 151 |
| 12 | 1800 | 75 | 218,4 | 0,2 | 33 | 555 | 57 | 11,6 | 53 | 1140 | 71 | 90 | 1930 | 121 |
| 13 | 1800 | 50 | 145,6 | 0,42 | 33 | 473 | 61 | 12,9 | 53 | 971 | 76 | 105 | 1926 | 151 |

| 5% AME-Beimischung | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|------|----------|-------|------|-----|-----|-----|------|--------|--------|--------|---------|----------|---------|
| Nr. | n | Last | P | RW | HC | NOx | CO | O2 | HC | NOx | CO | HC 5%O2 | NOx 5%O2 | CO 5%O2 |
| - | Upm | % | kW | FSN | ppm | ppm | ppm | % | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n | mg/m³n |
| 1 | 609 | 0 (LL) | -0,1 | 0,07 | 90 | 181 | 67 | 19,8 | 145 | 372 | 84 | 1866 | 4796 | 1081 |
| 2 | 1200 | 100 (VL) | 218 | 0,54 | 98 | 732 | 86 | 6,1 | 158 | 1503 | 108 | 169 | 1617 | 116 |
| 3 | 1500 | 50 | 138,2 | 0,53 | 66 | 645 | 69 | 11,5 | 106 | 1325 | 86 | 179 | 2233 | 145 |
| 4 | 1500 | 75 | 208,2 | 0,22 | 64 | 723 | 59 | 10,0 | 103 | 1485 | 74 | 150 | 2166 | 108 |
| 5 | 1200 | 25 | 109,5 | 0,71 | 63 | 680 | 112 | 9,9 | 101 | 1396 | 140 | 146 | 2020 | 203 |
| 6 | 1200 | 75 | 164,2 | 0,46 | 63 | 746 | 96 | 7,7 | 101 | 1532 | 120 | 122 | 1847 | 145 |
| 7 | 1200 | 50 | 54,7 | 0,61 | 64 | 546 | 74 | 14,0 | 103 | 1121 | 93 | 236 | 2574 | 212 |
| 8 | 1500 | 100 (VL) | 271 | 0,46 | 58 | 711 | 62 | 9,2 | 93 | 1460 | 78 | 126 | 1976 | 105 |
| 9 | 1500 | 25 | 69,3 | 0,51 | 66 | 536 | 62 | 14,4 | 106 | 1101 | 78 | 256 | 2652 | 187 |
| 10 | 1800 | 100 (VL) | 293,8 | 0,27 | 57 | 676 | 64 | 10,2 | 92 | 1388 | 80 | 135 | 2051 | 118 |
| 11 | 1800 | 25 | 73,2 | 0,09 | 62 | 606 | 48 | 14,9 | 100 | 1244 | 60 | 261 | 3254 | 157 |
| 12 | 1800 | 75 | 218,4 | 0,26 | 54 | 561 | 61 | 11,6 | 87 | 1152 | 76 | 147 | 1955 | 129 |
| 13 | 1800 | 50 | 145,9 | 0,46 | 55 | 485 | 63 | 13,0 | 88 | 996 | 79 | 176 | 1980 | 157 |

| RME | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|-----|-----|-----|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Nr. | n | Last | P | RW | HC | NOx | CO | O2 | HC | NOx | CO | HC 5%O2 | NOx 5%O2 | CO 5%O2 |
| - | Upm | % | kW | FSN | ppm | ppm | ppm | % | mg/m ³ n | mg/m ³ n | mg/m ³ n | mg/m ³ n | mg/m ³ n | mg/m ³ n |
| 1 | 602 | 0 (LL) | 0 | 0,01 | 53 | 184 | 82 | 19,6 | 85 | 378 | 103 | 960 | 4258 | 1155 |
| 2 | 1200 | 100 (VL) | 196,8 | 0,11 | 73 | 747 | 50 | 6,7 | 117 | 1534 | 63 | 131 | 1713 | 70 |
| 3 | 1500 | 50 | 127,6 | 0,08 | 41 | 648 | 53 | 11,7 | 66 | 1331 | 66 | 114 | 2297 | 114 |
| 4 | 1500 | 75 | 191,7 | 0,03 | 37 | 724 | 48 | 10,3 | 59 | 1487 | 60 | 89 | 2217 | 89 |
| 5 | 1200 | 25 | 98,2 | 0,09 | 33 | 705 | 67 | 10,6 | 53 | 1448 | 84 | 82 | 2236 | 129 |
| 6 | 1200 | 75 | 146,7 | 0,07 | 33 | 763 | 58 | 8,3 | 53 | 1567 | 73 | 67 | 1968 | 91 |
| 7 | 1200 | 50 | 48,5 | 0,14 | 34 | 507 | 57 | 14,5 | 55 | 1041 | 71 | 133 | 2543 | 174 |
| 8 | 1500 | 100 (VL) | 248 | 0,1 | 33 | 732 | 51 | 9,5 | 53 | 1503 | 64 | 74 | 2086 | 88 |
| 9 | 1500 | 25 | 64,2 | 0,15 | 32 | 493 | 55 | 14,5 | 51 | 1012 | 69 | 127 | 2504 | 170 |
| 10 | 1800 | 100 (VL) | 268,8 | 0,05 | 31 | 686 | 50 | 10,6 | 50 | 1409 | 63 | 77 | 2169 | 96 |
| 11 | 1800 | 25 | 66,8 | 0 | 30 | 669 | 37 | 15,0 | 48 | 1374 | 46 | 128 | 3633 | 122 |
| 12 | 1800 | 75 | 200,5 | 0,01 | 28 | 710 | 40 | 11,7 | 45 | 1458 | 50 | 77 | 2508 | 86 |
| 13 | 1800 | 50 | 133,7 | 0 | 27 | 789 | 36 | 12,9 | 43 | 1620 | 45 | 86 | 3208 | 89 |

AME ... Altspeiseölmethylester; RME ... Rapsölmethylester

Motor 2:

Hubraum: 10 l

Nennleistung: 250 kW bei 1950 U/min

PDE-Einspritzsystem (Pumpe-Düse-Einspritzung)

| n | Last | λ | O2 | HC | NOx | HC | NOx | HC 5%O2 | NOx 5%O2 |
|-------|----------|-----------|-------|-----|-----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| min-1 | % | - | % | ppm | ppm | mg/m ³ n | mg/m ³ n | mg/m ³ n | mg/m ³ n |
| 1950 | 100 (VL) | 2,08 | 10,58 | 100 | 680 | 161 | 1396 | 247 | 2144 |
| 1950 | 75 | 2,34 | 11,71 | 116 | 616 | 186 | 1265 | 321 | 2178 |
| 1950 | 50 | 2,73 | 13,01 | 131 | 513 | 211 | 1053 | 421 | 2109 |
| 1950 | 25 | 3,67 | 15,02 | 190 | 317 | 305 | 651 | 817 | 1742 |
| | | | | | | | | | |
| 1600 | 100 (VL) | 1,85 | 9,33 | 105 | 810 | 169 | 1663 | 231 | 2280 |
| 1600 | 75 | 2,02 | 10,28 | 105 | 743 | 169 | 1526 | 252 | 2277 |
| 1600 | 50 | 2,31 | 11,59 | 122 | 635 | 196 | 1304 | 333 | 2217 |
| 1600 | 25 | 3,2 | 14,16 | 154 | 404 | 248 | 830 | 579 | 1940 |
| | | | | | | | | | |
| 1250 | 100 (VL) | 1,53 | 6,98 | 87 | 972 | 140 | 1996 | 160 | 2279 |
| 1250 | 75 | 1,65 | 7,96 | 91 | 889 | 146 | 1826 | 180 | 2241 |
| 1250 | 50 | 1,95 | 9,91 | 109 | 743 | 175 | 1526 | 253 | 2201 |
| 1250 | 25 | 2,84 | 13,31 | 133 | 481 | 214 | 988 | 445 | 2055 |

10.5.2 PKW-Dieselmotoren

Nachfolgend werden die Emissionswerte für zwei moderne Dieselmotoren angeführt. Beide sind im Jahre 1999 in Serie gegangen. Die Ergebnisse sind als Vorserienwerte anzusehen, die sich jedoch kaum von den Serienergebnissen unterscheiden. Beim 4-Zylindermotor wurden speziell die Synchron Drehzahlen betrachtet.

Motor 1:

V6-2,5 l

Verteilereinspritzpumpe BOSCH VP44, DDE3

Modell 1999

Vollast

Vorserienstand

| n min-1 | M Nm | Last % | P kW | HC ppm | NOx ppm | CO ppm | λ - | O2 ~% | HC 5%O2 mg/m ³ n | NOx 5%O2 mg/m ³ n | CO 5%O2 mg/m ³ n |
|------------|---------|-----------|---------|-----------|------------|-----------|----------------|----------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1000 | 173 | 100 | 18 | 44 | 741 | ----- | 1,23 | 3,73 | 66 | 1410 | ---- |
| 1250 | 258 | 100 | 34 | 27 | 857 | 2476 | 1,35 | 5,20 | 44 | 1782 | 3134 |
| 1500 | 303 | 100 | 48 | 28 | 929 | 543 | 1,4 | 5,74 | 47 | 2000 | 712 |
| 1750 | 299 | 100 | 55 | 26 | 1058 | 111 | 1,51 | 6,81 | 47 | 2449 | 156 |
| 2000 | 293 | 100 | 61 | 30 | 1117 | 90 | 1,58 | 7,41 | 57 | 2701 | 132 |
| 2500 | 296 | 100 | 77 | 33 | 1064 | 107 | 1,59 | 7,49 | 63 | 2588 | 158 |
| 3000 | 288 | 100 | 90 | 29 | 974 | 129 | 1,52 | 6,89 | 53 | 2269 | 183 |
| 3500 | 282 | 100 | 103 | 18 | 845 | 172 | 1,48 | 6,53 | 32 | 1919 | 238 |
| 4000 | 257 | 100 | 108 | 29 | 805 | 163 | 1,52 | 6,89 | 53 | 1875 | 231 |
| 4200 | 242 | 100 | 106 | 20 | 761 | 147 | 1,54 | 7,07 | 37 | 1795 | 211 |

Motor 2:**4-Zylinder Common-Rail, DDE4 (Digitale-Diesel-Elektronik)****Modell 1999****Vorserienstand**

| n | % Last | P | NOx | CO | HC | NOx | CO | HC | O2 | NOx | CO | HC | FSN |
|-------------|---------|-------------|------|------|------|---------------------|---------------------|---------------------|------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|
| min-1 | - | kW | ppm | ppm | ppm | mg/m ³ n | mg/m ³ n | mg/m ³ n | % | mg/m ³ n | mg/m ³ n | mg/m ³ n | Bosch |
| 1000 | 100%-VL | 14,3 | 831 | - | 41 | 1707 | - | 66 | 0,9 | 1358 | - | 67 | 2,99 |
| 1500 | 7% | 2,5 | 91 | 852 | 40 | 187 | 1065 | 64 | 15 | 498 | 4666 | 219 | 0,56 |
| 1500 | 14% | 5,0 | 144 | 786 | 35 | 296 | 983 | 56 | 14,5 | 728 | 3973 | 177 | 0,61 |
| 1500 | 21% | 7,5 | 188 | 561 | 24 | 386 | 701 | 39 | 13,1 | 782 | 2333 | 100 | 1,15 |
| 1500 | 29% | 10,0 | 249 | 452 | 19 | 511 | 565 | 31 | 12,3 | 940 | 1707 | 72 | 1,1 |
| 1500 | 36% | 12,5 | 332 | 383 | 16 | 682 | 479 | 26 | 11,8 | 1186 | 1368 | 57 | 0,81 |
| 1500 | 43% | 15,0 | 417 | 298 | 12 | 856 | 373 | 19 | 10,7 | 1330 | 951 | 38 | 0,94 |
| 1500 | 50% | 17,5 | 528 | 251 | 10 | 1084 | 314 | 16 | 9,5 | 1509 | 717 | 29 | 1,02 |
| 1500 | 57% | 20,0 | 658 | 278 | 8 | 1351 | 348 | 13 | 8,3 | 1702 | 719 | 21 | 1,33 |
| 1500 | 64% | 22,5 | 841 | 514 | 7 | 1727 | 643 | 11 | 6,9 | 1960 | 1198 | 16 | 1,5 |
| 1500 | 71% | 25,0 | 1070 | 938 | 8,5 | 2197 | 1173 | 14 | 5,7 | 2298 | 2014 | 18 | 1,58 |
| 1500 | 79% | 27,5 | 1164 | 1796 | 12 | 2390 | 2245 | 19 | 4,7 | 2346 | 3620 | 24 | 2,2 |
| 1500 | 86% | 30,0 | 1171 | 3938 | 14 | 2405 | 4923 | 23 | 3,4 | 2186 | 7352 | 26 | 2,23 |
| 1500 | 93% | 32,5 | 1110 | - | 11 | 2279 | - | 18 | 2,7 | 1993 | - | 20 | 3,33 |
| 1500 | 100%-VL | 35,0 | 957 | - | 11 | 1965 | - | 18 | 1,6 | 1621 | - | 19 | 4,31 |
| 2000 | 100%-VL | 54,3 | 1231 | 366 | 14 | 2528 | 458 | 23 | 5,6 | 2626 | 781 | 30 | 0,47 |
| 2500 | 100%-VL | 67,1 | 1071 | 297 | 17,5 | 2199 | 371 | 28 | 10,8 | 3450 | 957 | 56 | 1,06 |
| 3000 | 45% | 35,0 | 307 | 743 | 14 | 630 | 929 | 23 | 13,1 | 1277 | 3090 | 58 | 1,3 |
| 3000 | 51% | 40,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |
| 3000 | 58% | 45,0 | 532 | 613 | 16 | 1093 | 766 | 26 | 11,7 | 1880 | 2166 | 57 | 0,78 |
| 3000 | 64% | 50,0 | 664 | 576 | 19 | 1364 | 720 | 31 | 10,9 | 2160 | 1874 | 62 | 0,64 |
| 3000 | 71% | 55,0 | 756 | 526 | 19 | 1553 | 658 | 31 | 10 | 2258 | 1571 | 57 | 0,71 |
| 3000 | 77% | 60,0 | 885 | 517 | 23 | 1817 | 646 | 37 | 9,2 | 2464 | 1440 | 64 | 0,66 |
| 3000 | 83% | 65,0 | 950 | 463 | 23 | 1951 | 579 | 37 | 8,3 | 2458 | 1198 | 60 | 0,87 |
| 3000 | 90% | 70,0 | 1050 | 417 | 22 | 2156 | 521 | 35 | 7,4 | 2537 | 1007 | 53 | 1,08 |
| 3000 | 96% | 75,0 | 1078 | 372 | 19 | 2214 | 465 | 31 | 6,4 | 2426 | 837 | 43 | 1,42 |
| 3000 | 100%-VL | 78,0 | 1084 | 363 | 16 | 2226 | 454 | 26 | 5,6 | 2313 | 774 | 34 | 1,91 |
| 3500 | 100%-VL | 85,8 | 1143 | 184 | 6,5 | 2347 | 230 | 10 | 6,1 | 2521 | 406 | 14 | 2,12 |
| 4000 | 100%-VL | 86,0 | 1069 | 238 | 6,5 | 2195 | 298 | 10 | 6 | 2342 | 521 | 14 | 3,15 |

Alle schattiert hinterlegten Schadstoffwerte stellen auf 5 % O₂ korrigierte Emissionswerte dar. NO_x wurde als NO₂ berechnet.

Die Ergebnisse an diesem Motor zeigen, dass die Betriebsdrehzahlen eine überaus wichtige Größe darstellen. Bei 1500 U/min ist der Turbolader noch ohne Wirkung. Er setzt erst ab ~1700 U/min ein. Um den Übergang zum Ladebetrieb zu vergleichmäßigen, wird der Motor bei dieser Drehzahl angefettet. Dies führt zu extrem hohem CO-Ausstoß und hohen Rauchwerten.

11 SCHALLEMISSION

11.1 Begriffsbestimmungen

Schalldruckpegel (L_p): zehnfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses der Quadrate der Effektivwerte der Schalldruckes und des Bezugsschalldruckes, ausgedrückt in Dezibel.

Der Bezugsschalldruck p_0 beträgt 20 μPa (Hörschwelle).

$$L_p = 10 \lg (p^2/p_0^2) \text{ dB}$$

A-bewerteter Schalldruckpegel ($L_{p,A}$): der mit A-Bewertung ermittelte Schalldruckpegel.

Schalleistungspegel (L_w): zehnfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses der Effektivwerte der Schalleistung und der Bezugsschalleistung, ausgedrückt in Dezibel.

Die Bezugsschalleistung W_0 beträgt 1 pW.

$$L_w = 10 \lg (W/W_0) \text{ dB}$$

A-bewerteter Schalleistungspegel ($L_{w,A}$): der mit A-Bewertung ermittelte Schalleistungspegel.

Oktavband-Schalldruckpegel ($L_{p,Okt}$): die in den genormten Oktavmittelfrequenzen ermittelten Schalldruckpegel.

11.2 Messverfahren

Bei der Ermittlung der Schallemissionswerte sind die nachstehenden Normen zugrunde zu legen:

ÖNORM S 5083 „Besondere Festlegung für die Bestimmung der Schalleistung von Verbrennungsmotoren“;

DIN 45 635 „Geräuschmessung an Maschinen; Luftschallemission, Hüllflächen-Verfahren, Verbrennungsmotoren“;

ISO 6798 „Reciprocating internal combustion engines - Measurement of emitted airborne noise - Engineering method and survey method“.

11.3 Geräuschquellen

Die Luftschallemissionen eines Verbrennungsmotors ergeben sich aus der Schallabstrahlung nachstehend angeführter Teilschallquellen (siehe **Bild 11.1**):

- Schallemission der Motoroberfläche, einschließlich des Geräuschanteils der am Motor fest angebauten Nebenaggregate (Teil 3);
- Oberflächengeräusch des Luftfilters oder des Ansaugschalldämpfers (Teil 2);
- Geräuschemission der Ansaugöffnung (Teil 1);
- Oberflächengeräusch des Abgasschalldämpfers (Schalldämpferoberflächengeräusch, Teil 4);
- Geräuschemission der Abgasaustrittsöffnung (Teil 5);
- Geräuschemission des Kühlgebläses (Teil 6).

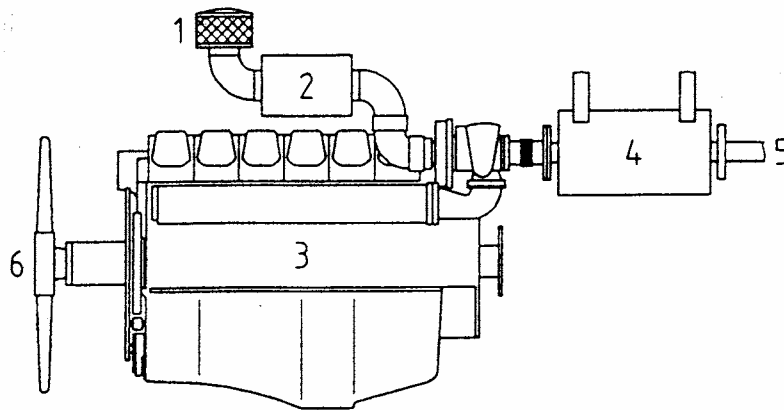


Bild 11.1: Geräuschquellen bei Verbrennungsmotoren (schematisch)

11.4 Typische Emissionskennwerte

Die Darstellung der Schallemissionskennwerte erfolgt in den **Bildern 11.2 bis 11.7**.

In den **Bildern 11.2 bis 11.5** sind die gemessenen A-bewerteten Schallleistungspegel von Einzelmaschinen einschließlich ihrer Streuungen dargestellt. Die eingetragenen Parallelen zur Regressionsgeraden im Abstand ΔL sagen aus, dass sich etwa zwei Drittel der ausgewerteten Daten innerhalb dieses Bereiches befinden.

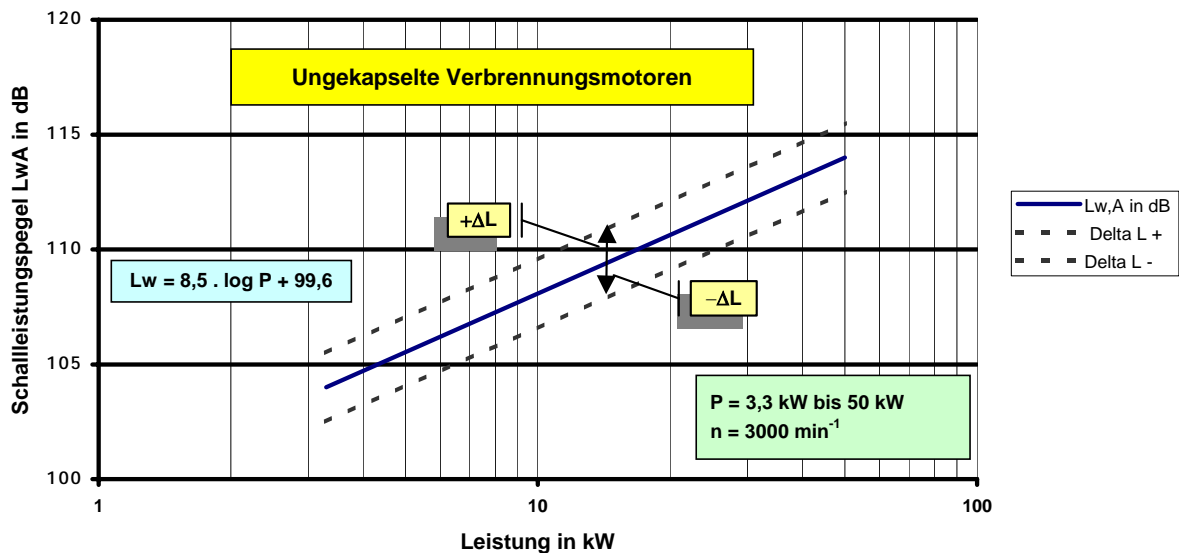


Bild 11.2: Schallemissionskennwerte von ungekapselten Verbrennungsmotoren 3,3 kW bis 50 kW

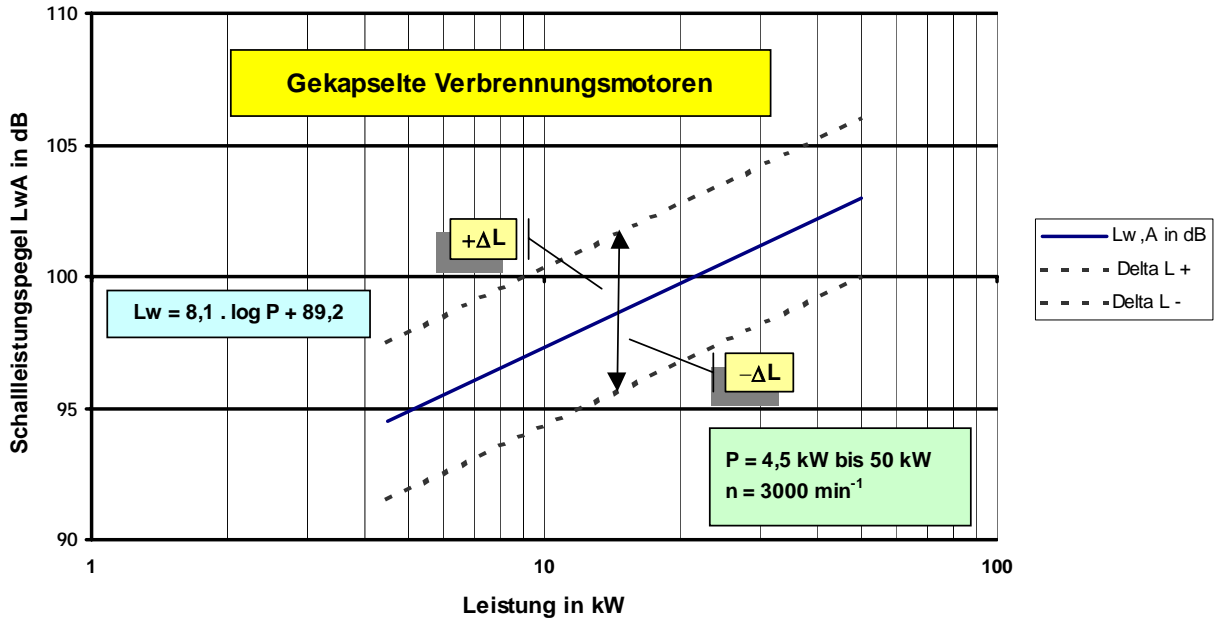


Bild 11.3: Schallemissionskennwerte von serienmäßig gekapselten Verbrennungsmotoren 4,5 kW bis 50 kW

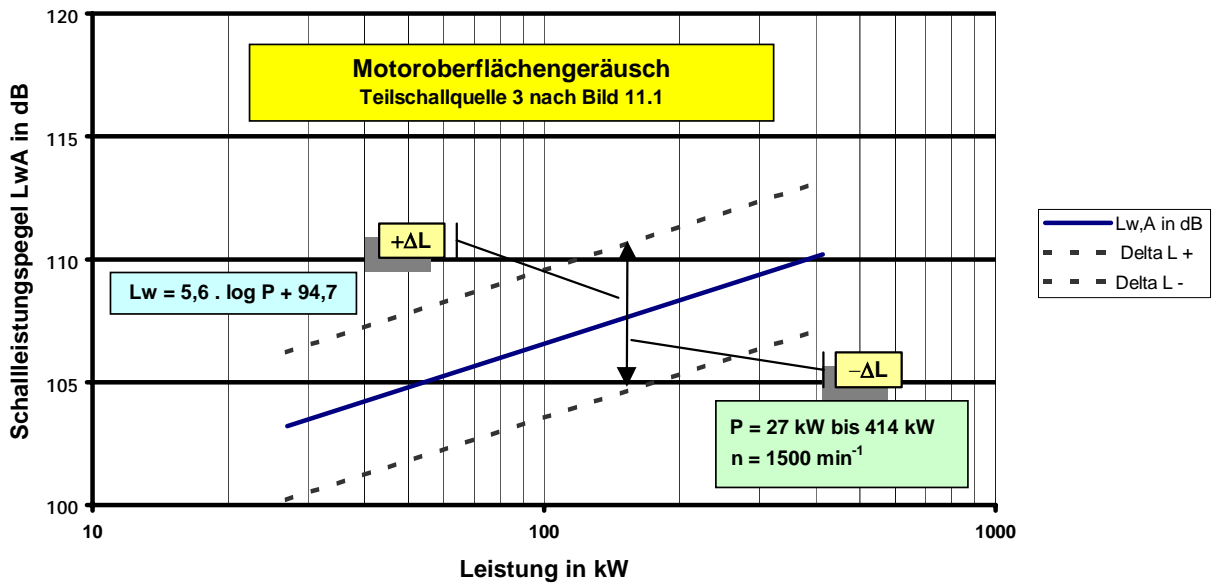


Bild 11.4: Schallemissionskennwerte von Verbrennungsmotoren 27 kW bis 414 kW

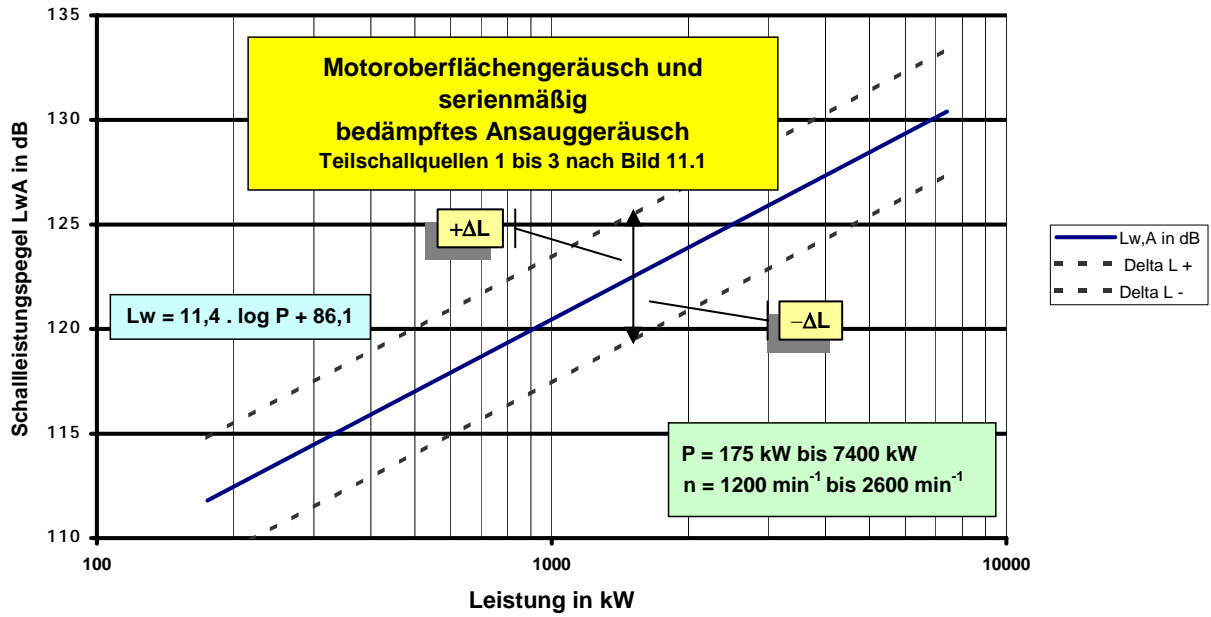


Bild 11.5: Schallemissionskennwerte von Verbrennungsmotoren
175 kW bis 7400 kW

Die **Bilder 11.6** und **11.7** geben noch Abschätzungen über die Schallminderung bei abnehmender Drehzahl sowie ein typisches normiertes Oktavbandspektrum eines Verbrennungsmotors wieder.

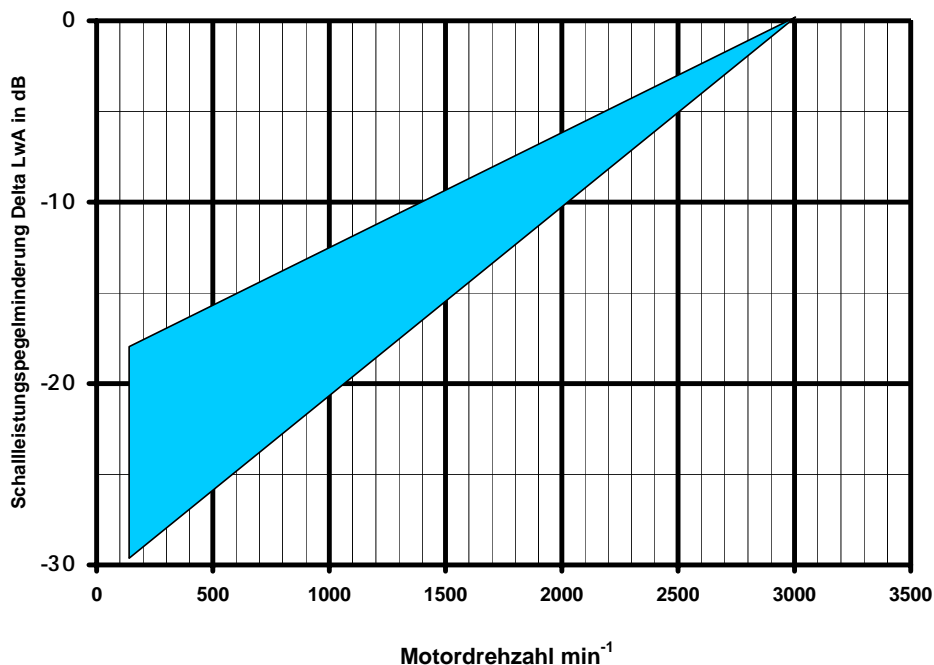


Bild 11.6: Schallminderung bei abnehmender Drehzahl

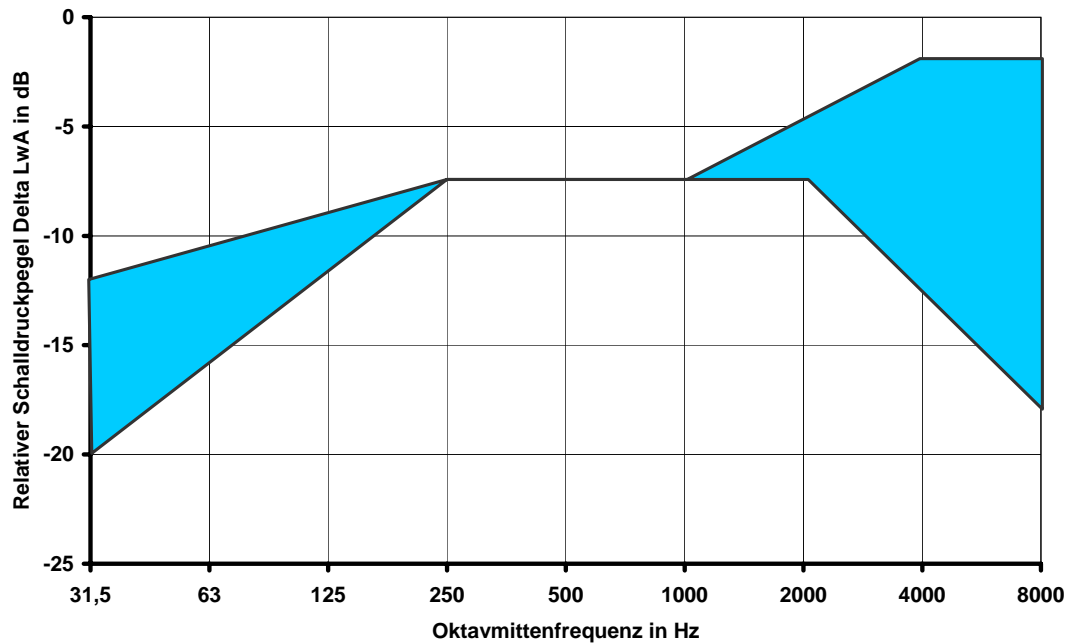


Bild 11.7: Typisches normiertes unbewertetes Oktavbandspektrum eines Verbrennungsmotors

11.5 Gesetzliche Grenzwerte für Kraftstromerzeuger

Aufgrund des § 71 Abs. 3 bis 6 der Gewerbeordnung 1994 BGBl. Nr. 194 wurde die 793. Verordnung: Baumaschinenlärm-Sicherheitsverordnung BSV 1994 vom 30.9.1994 erlassen. In § 7 dieser Verordnung sind die zulässigen Schalleistungspegel für Kraftstromerzeuger geregelt:

Von Kraftstromerzeugern, die in Verkehr gebracht werden, dürfen die in der nachstehenden **Tabelle 11.1** angegebenen zulässigen Schalleistungspegel nicht überstiegen werden. In zugelassenen Prüfstellen haben die Messungen entsprechend den Regelungen des Anhangs I der in § 1 Abs. 3 Z 2 angeführten Richtlinie 79/113/EWG in der Fassung der Richtlinien 81/1051/EWG und 85/405/EWG und entsprechend den spezifischen Regelungen des Anhangs I der in § 1 Abs. 3 Z 6 angeführten Richtlinie 84/536/EWG in der Fassung der Richtlinie 85/408/EWG durchzuführen und dürfen nur bei Einhaltung zumindest der angegebenen zulässigen Werte eine Baumusterprüfbescheinigung ausstellen.

Tabelle 11.1: Zulässige Schalleistungspegel für Kraftstromerzeuger

| Elektrische Leistung des Kraftstromerzeugers (P) | Zulässiger Schalleistungspegel $L_{w,A}$ in dB |
|--|--|
| $P \leq 2 \text{ kVA}$ | 102 |
| $2 \text{ kVA} < P \leq 8 \text{ kVA}$ | 100 |
| $8 \text{ kVA} < P \leq 240 \text{ kVA}$ | 100 |
| $P > 240 \text{ kVA}$ | 100 |

11.6 Schallminderungsmaßnahmen

Mögliche Schallminderungsmaßnahmen an den einzelnen Teilschallquellen sind nachstehend beschrieben. Zu diesem Themengebiet wird auch auf die einschlägige Literatur verwiesen /11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 11.6/.

11.6.1 Motoroberfläche

Grundsätzlich wird die Gehäusestruktur von den Motorenherstellern so gestaltet, dass das Quadrat der Schwingschnelle und des Abstrahlgrades möglichst gering bleibt. Verbesserungen sind durch die Gestaltung der Gehäusewände nur um einige dB möglich.

Sind höhere Schallminderungen erforderlich, so muss der Motor mit einer Kapselung versehen werden, die unmittelbar an diesem angebracht wird. Dadurch ist eine Reduktion von bis zu 10 dB zu erreichen. Selbsttragende Konstruktionen mit schalldämmenden Kapselungen erzielen Einfügungsdämmmaße bis zu 25 dB, schwere Ausführungen sogar 40 dB.

11.6.2 Ansaugöffnung

Bei Maßnahmen zur Verringerung des Ansauggeräusches muss zwischen Saugmotoren und aufgeladenen Motoren unterschieden werden. Bei Saugmotoren befinden sich die Pegelmaxima im mittleren Frequenzbereich, während diese bei aufgeladenen Motoren im höheren Frequenzbereich liegen. Dies muss bei der Auswahl der Bedämpfung beachtet werden.

Ansaugfilter aus einem Metallgestrick weisen meist nur eine geringe Dämpfungswirkung auf, während Filter mit Papierpatronen das Ansauggeräusch besonders bei hohen Frequenzen so stark dämpfen, dass das Ansauggeräusch das von der Motoroberfläche emittierte Geräusch eines aufgeladenen Motors meist nicht mehr übersteigt.

Können Verbrennungsluftfilter die Ansauggeräusche - vor allem wenn sie direkt ins Freie abstrahlen - nicht ausreichend dämpfen, müssen zusätzlich speziell abgestimmte Schalldämpfer eingesetzt werden. Für Saugmotoren eignen sich Schalldämpfer nach dem Reflexionsprinzip, für aufgeladene Motoren solche nach dem Absorptionsprinzip. Ist genügend Raum vorhanden, so können durch solche Maßnahmen auch strenge schalltechnische Anforderungen erfüllt werden.

11.6.3 Abgasaustrittsöffnung

Im Gegensatz zur Geräuschemission der Ansaugöffnung zeigt die Frequenzanalyse des ungedämpften Abgasgeräusches bei beiden Motorenarten ausgeprägte Schallpegelmaxima im tiefen Frequenzbereich, bis etwa 200 Hz. Für die Bedämpfung dieser Geräusche können verschiedene Schalldämpferbauarten verwendet werden. Da Reflexionsschalldämpfer ihr Dämpfungsmaximum vor allem im tiefen Frequenzbereich besitzen, werden diese meist in Kombination mit Absorptionsschalldämpfern zur Schallpegelminderung eingesetzt.

Bei sehr hohen schalltechnischen Anforderungen muss darauf geachtet werden, dass der Pegel an der Austrittsöffnung nicht vom Strömungsgeräusch des austretenden Gasstrahls bestimmt wird.

11.6.4 Körperschallabstrahlung durch die Motorlagerung

Abhängig von der Art der Motorlagerung wird ein Teil des vom Motor abgestrahlten Körperschalls in die nachfolgenden Strukturen eingeleitet und von diesen dann als Luftschall abgestrahlt. Die Größe des weitergeleiteten Anteils hängt vom akustischen Übertragungsverhalten der gewählten Federelemente und der Eingangsimpedanz der Motorfundamente ab. Bei sehr hohen Anforderungen an die Körperschalldämmung können schnell laufende Motoren auch „doppelt-elastisch“ gelagert werden. In diesem Fall steht der elastisch gelagerte Motor auf einer Zwischenmasse, welche ihrerseits wieder elastisch auf dem eigentlichen Motorfundament aufgestellt ist.

Durch sorgfältige Auswahl der Federelemente und der Zwischenmasse können mit einem solchen System höchste akustische Anforderungen bei einem resonanzfreien Motorbetrieb erfüllt werden.

11.7 Zukünftige Verminderung der Geräuschemission

Jüngere Forschungen über Maßnahmen zur Geräuschminderung von Dieselmotoren lassen für die Zukunft ein Minderungspotential von ca. 6 dB erwarten. Ein erheblicher Teil dieses Potentials wurde experimentiell bereits nachgewiesen.

12 Literatur

- /5.1/ BMUJF: „Emissionsbegrenzung und Anwendungsbereiche von stationären Motoren“, Band 4/1999, Schriftenreihe des BMUJF, ISBN 3-901 271-90-2
- /6.1/ Richtlinie 1999/99/EG der Kommission vom 15. Dezember 1999 zur Anpassung der Richtlinie 80/1269/EWG des Rates über die Motorleistung von Kraftfahrzeugen an den technischen Fortschritt
- /7.1/ Richtlinie 88/77/EWG des Rates vom 3. Dezember 1987 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe aus Dieselmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen; geändert durch 91/542/EWG sowie 96/1/EG und 1999/96/EG
- /7.2/ Richtlinie 1999/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 1999 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus Selbstzündungsmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen und die Emission gasförmiger Schadstoffe aus mit Erdgas oder Flüssiggas betriebenen Fremdzündungsmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 88/77/EWG des Rates
- /7.3/ Code of Federal Regulations, Protection of Environment, Title 40, Parts 86 to 99
- /7.4/ ÖNORM EN ISO 8178-4: „Hubkolben-Verbrennungsmotoren; Abgasmessung; Teil 4: Prüfzyklen für verschiedene Motorverwendungen“
- /7.5/ Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte
- /7.6/ Verordnung BGBl. II Nr. 185/1999 über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte
- /8.1/ H. Kremer: „Grundlagen der NO_x-Entstehung und -minderung“, Gas Wärme International, Band 35, 1986
- /8.2/ C.P. Fenimore: „Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames“, 13th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1971
- /8.3/ J. Kolar: „Stickstoffoxide und Luftreinhaltung“, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-50935-6, 1990
- /8.4/ K.J. Wu, R.C. Peterson: „Correlation of Nitric Oxide Emission from a Diesel Engine with Measured Temperature and Burning Rate“, SAE-Paper 861566
- /9.1/ Shell-Lexikon Verbrennungsmotor, Supplement der ATZ und MTZ, Folge 20, 1997
- /9.2/ G. Hüthwohl, Q. Li, G. Lepperhoff: „Untersuchung der NO_x-Reduzierung im Abgas von Dieselmotoren durch SCR-Katalysatoren“, MTZ 54, 1993
- /9.3/ J. Kolar: „Stickstoffoxide und Luftreinhaltung“, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-50935-6, 1990
- /9.4/ G. Fränkle et al.: „SINOx - Ein Abgasreinigungssystem für Nutzfahrzeuge“, VDI Fortschrittberichte Reihe 12, 18. Internat. Wiener Motorensymposium, 1997
- /9.5/ T. Wahl, E. Jakob, W. Weisweiler: „NO_x-Verminderung bei Dieselmotoren, Teil 1“, MTZ 57, 1996
- /11.1/ VDI Richtlinie 2567: „Schallschutz durch Schalldämpfer“, derzeit Entwurf
- /11.2/ DIN EN ISO 14163: „Akustik - Richtlinien für den Schallschutz durch Schalldämpfer“ (ISO/DIS 14163 : 1996) Deutsche Fassung prEN ISO 14163 : 1996
- /11.3/ VDI Richtlinie 2711: „Schallschutz durch Kapselung“
- /11.4/ VDI Richtlinie 3753: „Emissionskennwerte technischer Schallquellen; stationäre Verbrennungsmotoren“

- /11.5/ Heckl, M.: „Schallentstehung und Schallminderung bei Diesel- und Ottomotoren“. In Taschenbuch der Technischen Akustik, Herausgeber: Heckl, M., u. H. A. Müller, 2. Aufl., Berlin, Springer Verlag, 1994
- /11.6/ Spessert, Bruno: „Fortschritte in der Dieselmotorenakustik - ein kritisches Resümee der letzten 30 Jahre“, Zeitschrift für Lärmbekämpfung 46 (1999) Nr. 1