



Jürg Schlatter 18 Juni 2010

Nanopartikelmessgerät für Baumaschinen

1 Hintergrund und rechtliche Grundlagen

Seit 15 Jahren werden die Rauchemissionen von Strassenfahrzeugen mit Selbstzündungsmotoren periodisch mit Trübungsmessgeräten (Opazimeter) überprüft. Die obligatorische periodische Abgaswartung ist im Artikel 35 der Verordnung vom 19. Juni 1995 über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge (VTS, [SR 741.41](#)) vorgeschrieben. Für die Homologation von Fahrzeugen werden auf einem Prüfstand Dieselrauchemissionen bei genau definierten Prüfzyklen gemessen, wie diese im Anhang 2 der VTS beschrieben sind. Im Feld wurden solche Prüfzyklen aufgrund der fehlenden Infrastruktur durch eine einfache dynamische Messung ersetzt (siehe auch Punkt 4.1). Beim Testzyklus der „freien Beschleunigung“ wird das Gaspedal der Maschine schnell durchgedrückt und während ein paar Sekunden gehalten. Der Motor erhöht dabei die Drehzahl vom Leerlauf zum maximalen Wert. Bei diesem Vorgang wird eine Rauchwolke ausgestossen (siehe Abbildung 1). Dies äussert sich durch einen Spitzenwert in der Rauchtrübung (Opazität). Bei Dieselfahrzeugen, welche mit “On-Board Diagnostic (OBD)” ausgerüstet sind, wird seit 2004 bei der Abgaswartung keine Trübungsmessung mehr durchgeführt.

Die Anforderungen sowie die Verfahren zur Erhaltung der Messbeständigkeit von Trübungsmessgeräten sind im Abschnitt 3 der Verordnung des EJPD vom 19. März 2006 über Abgasmessgeräte für Verbrennungsmotoren geregelt (VAMV, [SR 941.242](#)). Trübungsmessgeräte für amtliche Messungen unterliegen einer Zulassungsprüfung nach nationalem Recht und müssen jährlich geeicht werden.

In der [Baurichtlinie Luft](#) aus dem Jahre 2002 wird im Anhang 2 der Einsatz von Trübungsmessgeräten auch für die periodischen Emissionskontrollen von Verbrennungsmotoren auf Baustellen empfohlen. Seit 1. Januar 2009 gelten in der Schweiz einheitliche Vorschriften für die Emissionen von Baumaschinen und Geräten auf Baustellen. Der Bundesrat hat eine entsprechende Änderung der Luftreinhalte-Verordnung (LRV, [SR 814.318.124.1](#)) verabschiedet. Baumaschinen müssen, zusätzlich zu den Vorschriften nach der Richtlinie 97/68/EG, einen Partikel-Anzahl-Grenzwert von 1×10^{12} 1/kWh einhalten (Anhang 4 Ziffer 31 LRV). Nach dem heutigen Stand der Technik kann dieser Grenzwert nur mit einem wirksamen, d.h. geschlossenen Partikelfiltersystem erreicht werden.

Die revidierte LRV schreibt vor, dass die Rauchemissionen der Baumaschinen nach wie vor mit Trübungsmessgeräten periodisch kontrolliert werden (Anhang 4 Ziffer 32 LRV). Die Trübungsmessung genügt jedoch nicht mehr, um die Emissionen von modernen Motoren oder Motoren mit wirksamen Partikelfiltersystemen zu messen. Die Emissionen sind dann derart gering, dass man sich unterhalb der Nachweisgrenze von Opazimetern befindet. Bei modernsten Baumaschinen können diese Geräte einen Defekt des Partikelfilters nicht mehr nachweisen, was Kontrollmessungen mit Trübungsmessgeräten wenig sinnvoll macht. Das bedeutet, dass neue empfindlichere Messinstrumente benötigt werden.

Aus diesem Grund evaluieren das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und das Bundesamt für Metrologie (METAS) Messgeräte, die es ermöglichen, die Partikel-Anzahl-Konzentration im Abgasstrom von

Dieselmotoren zu messen. Ein solches Gerät muss feldtauglich sein, damit es bei Kontrollen auch ausserhalb des Prüfstands eingesetzt werden kann, beispielsweise bei Kontrollen der Baumaschinen direkt auf Baustellen, wie sie die Kantone im Rahmen des Vollzugs oder das BAFU im Rahmen der Vollzugaufsicht bzw. der Marktüberwachung durchführen.

Die Messung der Partikelanzahl-Konzentration wird auch in anderen Bereichen als bei Baumaschinen zunehmend an Bedeutung gewinnen, da zukünftige Abgasvorschriften für PKW oder LKW ebenfalls Partikelanzahl-basiert sind.

2 Anwendung des Messmittels

Dieselmotoren stossen grosse Mengen von ultrafeinen Partikeln aus. Diese bestehen hauptsächlich aus elementarem Kohlenstoff und sind gesundheitsschädigend. Um Menschen, Tiere und Pflanzen vor diesen schädlichen Effekten zu schützen, konzentriert die Schweiz ihre Aktivitäten auf die Verminderung der Partikelemission aus Dieselmotoren und anderen Verbrennungsprozessen. Die effektivsten Verfahren zur Verminderung der Ultrafeinpartikel aus Dieselmotoren sind geschlossene Partikelfilter-Systeme. Geprüfte und zugelassene Systeme, welche in der Schweiz für die Nachrüstung von Dieselmotoren empfohlen sind, werden in der [BAFU-Filterliste](#) veröffentlicht.

Damit die Emissionen von Baumaschinen den Anforderungen der LRV genügen, müssen mindestens alle 24 Monate Abgasmessungen und gegebenenfalls Verbesserungen an der Maschine durchgeführt werden.

Die dabei verwendeten Messmittel können für folgende Prüfungen verwendet werden:

- Überwachung der Emissionen von dieselbetriebenen Baumaschinen im Feld
- Erkennen von Defekten in Partikelfiltersystemen im Feld
- Typenprüfung und Zulassung von Baumaschinen und Partikelfilter
- Konformitätsprüfung bei der Produktion und im Betrieb von nachgerüsteten Partikelfiltern
- Periodische Abgasprüfung von Dieselmotoren und bei direkt eingespritzten Benzinmotoren bei Strassenfahrzeugen, Off-Road-Fahrzeugen, Maschinen, Stationärmotoren
- Prüfung von Brennern und anderen Verbrennungsprozessen

3 Testzyklen für die Abgasuntersuchung

Für die Messung der Partikel-Anzahlkonzentration muss ein geeignetes Messverfahren (Testzyklus) festgelegt werden. Es gibt dazu verschiedene Varianten:

- Maximale Partikelkonzentration bei der „freien Beschleunigung“ des Motors
- Integral der Partikelkonzentration bei der „freien Beschleunigung“ des Motors
- Partikelkonzentration bei einer Auswahl oder einer Abfolge von reproduzierbaren, stationären Betriebszuständen, wie beispielsweise unterer Leerlauf, oberer Leerlauf oder Vollast

3.1 Spitzenwert bei einer „freien Beschleunigung“

Der Testzyklus „freie Beschleunigung“ ist im Detail in der Schweizer Regel zur Prüfung von Partikelfiltersystemen für Verbrennungsmotoren ([SNR 277205](#)) beschrieben. Ursprünglich wurde der Testzyklus für den Bereich Motorfahrzeuge in der Richtlinie ECE R 24 entwickelt. Seit 1994 wird der Zyklus in der Schweiz für die Abgasnachkontrolle bei Dieselfahrzeugen mit Trübungsmessgeräten verwendet. Die Messmittel sind in der VAMV geregelt. Sie benötigen eine Zulassung und müssen periodisch durch kantonale Stellen (Eichämter) geeicht werden.

In der „freien Beschleunigung“ wird die Drehzahl des ausgekuppelten Motors raschmöglichst bis zur obersten Drehzahl (Abregeldrehzahl) hochgefahren. In dieser kurzen Beschleunigungsphase muss der Motor seine Trägheit überwinden, erreicht dabei eine kurze Volllastsituation und bläst einen Rauchstoss aus (Abbildung 1, schwarze Kurve). Im Testzyklus „freie Beschleunigung“ wird das Maximum der Trübung gemessen (schwarzer Punkt).

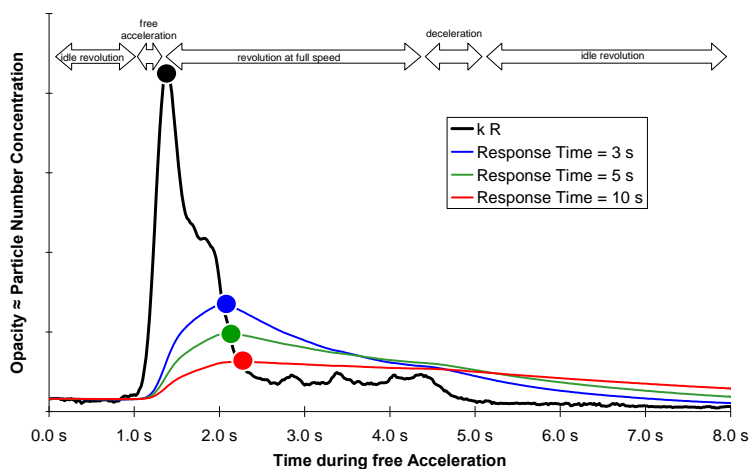


Abbildung 1: Typischer Verlauf des Rauchtrübung (Opazität) beim Testzyklus der „freien Beschleunigung“ eines Dieselmotors (schwarze Kurve). Vergleich des Verlaufs bei verschiedenen Ansprechzeiten des Messgeräts (farbige Kurven). Je kürzer die Ansprechzeit desto höher ist der Spitzenwert (Punkte). Bei der Abgasmessung von Strassenfahrzeugen ist eine Ansprechzeit von 1 s vorgeschrieben.

Das Messmittel erfasst den Verlauf der Rauchemission mit einer konstruktiv bedingten Ansprechzeit. Die Trübungsmessgeräte gemäss VAMV müssen eine Ansprechzeit von unter einer 1 s aufweisen. Dass die Ansprechzeit das Messergebnis stark beeinflusst, ist in den farbigen Kurven für höhere Ansprechzeiten in Abbildung 1 zu erkennen. Deshalb muss die Messung bei der freien Beschleunigung mit Messgeräten durchgeführt werden, welche eine kleine und gut definierte Ansprechzeit aufweisen.

Die Methode der freien Beschleunigung hat sich für die Opazimetrie als praxistauglich erwiesen. Sie ist in der Branche bekannt und etabliert. Deshalb würde dieser Testzyklus auch für die Messung der Partikel-Anzahlkonzentration mit einem portablen Messmittel bevorzugt. Partikelzähler weisen wesentlich höhere Ansprechzeiten auf und ermöglichen somit keine genügend empfindliche Messung bei der freien Beschleunigung.

3.2 Integral bei einer „freien Beschleunigung“

Beim Testzyklus „freie Beschleunigung“ können im Prinzip auch integrierende Messverfahren eingesetzt werden.

Das bekannteste Beispiel ist die Messung der Filterschwärzung einer Probe über einen Beschleunigungszyklus. Die Probe wird mit der sogenannten Boschpumpe genommen. Hier werden die Partikel des gesamten Gasstosses auf dem Filter gesammelt. Sie wurde bei Strassenfahrzeugen 1994 durch die empfindlichere Spitzenwertmessung mit Opazimetern abgelöst.

Als integrierende Methode könnte grundsätzlich auch ein Opazimeter oder ein Partikelzähler eingesetzt werden, indem der Trübungsverlauf über den gesamten Beschleunigungszyklus integriert würde. Dieses Verfahren hätte den Vorteil, dass das Ergebnis weniger empfindlich auf die Ansprechzeit des Messgeräts reagiert, aber der Nachteil, dass sie stark von der Handhabung abhängt, weil die Zeitpunkte für den Start der Messung, die Dauer der Beschleunigung und die Dauer der oberen Drehzahl massgebend das Resultat beeinflussen.

3.3 Stationärmessungen bei unterem, oberem Leerlauf, Teil- oder Volllast

Die Messung der Emissionen im stationären Betrieb wurde auch bei Strassenfahrzeugen verschiedentlich durchgeführt. Der Vorteil einer Messung bei gleichbleibenden Bedingungen ist, dass das Messergebnis wesentlich weniger empfindlich gegenüber dem Ansprechverhalten der Messmittel ist.

Bei Baumaschinen ist ein stationäres Verfahren aus der Sicht der Maschine ausserdem dann unerlässlich, wenn sie aus technischen Gründen keine „freie Beschleunigung“ zulässt. In diesem Fall ist bei jeder Maschine zu definieren, welcher oder welche stationäre Lastpunkte für die Messung verwendet werden. Bei dieser Variante ist die Beschreibung des Lastpunkts und damit die Reproduzierbarkeit der Messung die grösste Herausforderung.

Da die Nanopartikel-Messmittel zu langsam für die freie Beschleunigung sind und das Integral weniger genau definiert werden kann, ist diesem Verfahren bei allen Baumaschinen den Vorzug zu geben.

4 Anforderungen an Partikelmessmittel in anderen Vorschriften

4.1 ECE R83

Die internationalen Vorschriften für die Zulassung von Personenmotorwagen beinhalten auch Partikelanzahlkonzentrationsmessungen. Die für Prüfstandmessungen im Detail festgelegten Messsysteme enthalten einen Verdünner, einen Abscheider für flüchtige Stoffe und einen Kondensationskernzähler (PNC, auf Basis von Butanol). Diese Systeme sind aus drei Gründen nicht für einen Einsatz im Feld geeignet: Empfindlichkeit gegenüber Transporten, Grösse/Gewicht sowie Kosten.

Dennoch geben die Vorschriften wichtige Impulse für das Feldmessgerät:

- Empfindlichkeitskurve bei kleinsten Partikeln (z.B. 50 % Effizienz bei 23 nm),
- Entfernen von flüchtigen Bestandteilen (sog. Nukleationspartikel),
- Grössen- und Konzentrationsbereich,
- Ansprechverhalten.

4.2 SNR 277205

Die Schweizer Regel SNR 277205 beschreibt die Prüfung von Partikelfiltern. Darin werden auch die Messgrösse Partikelanzahlkonzentration sowie die zu verwendenden Partikelmessgeräte definiert. Diese Anforderungen sind zu wenig detailliert und können nicht direkt auf ein Feldmessgerät angewandt werden.

5 Entwurf für Anforderungen an ein Feldmessgerät

Aus den oben genannten Ausführungen ergeben sich die folgenden Anforderungen an ein feldtaugliches Partikelanzahl-Messmittel gemäss des Entwurfs zur Änderung der VAMV.

Die wichtigsten metrologischen Anforderungen sind:

Messgrösse:	Partikelanzahlkonzentration
Messbereich:	10^3 cm^{-3} bis 10^7 cm^{-3}
Effizienz:	Die Effizienz E bezeichnet den Quotienten der angezeigten Anzahlkonzentration und der Eingangskonzentration. Sie repräsentiert die grössenabhängigen Bereiche der zulässigen Messabweichung: a) Nanopartikel von 23 nm: $E < 50 \%$ b) Nanopartikel von 80 nm: $80 < E < 120 \%$ c) Nanopartikel von 120 nm: $80 < E < 120 \%$ d) Nanopartikel von 250 nm: $E < 200 \%$ e) Tetracontantröpfchen (30 nm) $E > 10 \%$
Ansprechzeit	Dauer der Sprungantwort von 10 % auf 90 % der Konzentrationsänderung bei einer rechteckförmigen Änderung der Eingangskonzentration (bei auf- und absteigender Konzentration) 4.5 s bis 5.5 s
Verzögerungszeit:	Dauer des Aerosoleintritts bei der Probenahme bis zur Anzeige der Anzahlkonzentration: < 10 s
Messbeständigkeit	Gegenüber äusseren Einflussgrössen wie Wärme, Feuchtigkeit, Wasser, Vibration, elektromagnetische Strahlung
Ausdruck der Daten	Fälschungs- und manipulationssicherer Datenausdruck mit folgendem Inhalt: Datum, Zeit, Geräteidentifikation (Typ, S/N), Fahrzeugidentifikation, Messergebnisse für „offizielle Messung“
Offizielle Messung	Bei der offiziellen Messung, welche manuell ein- und wieder ausgeschaltet wird, wird der Spitzenwert der Anzahlkonzentration ermittelt.