

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Emissionsuntersuchungen an einem Euro IV-Nutzfahrzeugmotor mit Partikelfiltersystem

Prof. Dr.-Ing. Axel Munack
Prof. Dr. Jürgen Krahl
Dipl.-Chem. Yvonne Ruschel
Dipl.-Chem. Olaf Schröder
Hans Schönfeld
Dipl.-Ing. Hermann Speckmann

Braunschweig und Coburg im Dezember 2007

Gefördert durch den Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e.V.

Inhaltsverzeichnis

0	Zusammenfassung	3
1	Aufgabenstellung	5
2	Umweltrelevanz von Dieselmotoremissionen	6
2.1	Kohlenwasserstoffe (HC).....	6
2.2	Kohlenmonoxid (CO)	6
2.3	Stickoxide (NO _x).....	7
2.4	Partikel	8
2.5	Partikelanzahlverteilung.....	10
2.6	Aldehyde und Ketone	11
3	Material und Methoden	13
3.1	Motorprüfstand	13
3.2	Motor.....	15
3.3	Motortestbedingungen	17
3.3.1	Bestimmung der Vollastkurve	17
3.3.2	ESC-Test	17
3.3.3	ETC-Test.....	18
3.4	Versuchsablauf.....	21
3.5	Kraftstoffeigenschaften.....	21
3.6	Analysenmethoden.....	23
3.6.1	Gesetzlich limitierte Abgasparameter.....	23
3.6.2	Gesetzlich nicht limitierte Abgasparameter	25
4	Ergebnisse	30
4.1	Motorleistung.....	30
4.2	Motoröl	32
4.3	Abgastemperatur	35
4.4	Abgasgegendruck.....	36
4.5	Kohlenmonoxidemissionen.....	38
4.6	Kohlenwasserstoffemissionen.....	41
4.7	Stickoxidemissionen	44
4.8	Partikelmassemmissionen	47
4.9	Partikelanzahlverteilung.....	48
4.10	Aldehyde	53
5	Literaturverzeichnis	54

0 Zusammenfassung

Ziel des Projektes war es, einen modernen MAN Nutzfahrzeugmotor (Euro 4) des Typs D 0836 LFL 51 mit PM-Kat[®] einem 500-Stunden-Test mit Biodiesel nach Norm EN 14214 zu unterziehen und dabei die Abgasgüte in regelmäßigen Abständen zu überwachen. Neben der Bestimmung der gesetzlich limitierten Emissionen (Kohlenmonoxid, Stickoxide, Kohlenwasserstoffe und Partikelmasse) wurden auch die Partikelgrößenverteilung und der Aldehydausstoß untersucht. Darüber hinaus erfolgten vergleichende, singuläre Messungen mit Dieselmotorkraftstoff.

Im Projektrahmen wurde zunächst ein neuer Motorprüfstand im Institut für Technologie und Biosystemtechnik aufgebaut. Diese Maßnahme erlaubte es, transiente Motorbelastungen wie den ETC-Test durchzuführen. Dazu wurde auf einer Aufspannplatte eine Asynchron-Vierquadranten-Motorenbremse installiert und diese mit der dazugehörigen Steuerelektronik verbunden. An diese Bremse wurde der MAN-Motor gekoppelt, der zusammen mit einem PM-Kat[®] mit der Abgasstufe Euro IV zertifiziert ist. Die Ansteuerung erfolgte mit einer eigens für diesen Motor angefertigten und programmierten Regeleinheit, da die vom Hersteller der Motorbremse mitgelieferte Regelung die gewünschte Dynamik nicht erreichte. Mit diesem Aufbau war es möglich, neben dem europäischen stationären Testzyklus (ESC-Test) auch den dynamischen europäischen transienten Testzyklus (ETC-Test) zu fahren.

Während des Versuchs lief der Motor störungsfrei mit Biodiesel. Es traten keine unvorhergesehenen Ereignisse auf, die auf den alternativen Kraftstoff zurückzuführen sind.

Über dem Test blieb der Kraftstoffverbrauch nahezu konstant, während die mittlere Abgastemperatur um ca. 15°C anstieg.

Die Abgasgedrücke wurden über dem Test in zwei Betriebspunkten erfasst und zeigten leichte Anstiege. Die Öltemperatur blieb hingegen konstant.

Die Emissionen änderten sich nur leicht mit zunehmender Testdauer: Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Aldehyde wurden durch den sich im PM-Kat[®] befindlichen Oxidationskatalysator über die gesamte Versuchsdauer effektiv aus dem Abgas entfernt. Teilweise lag die Konzentration der Kohlenwasserstoffe unter der Hintergrundkonzentration. Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe fanden sich weit unter den Grenzwerten.

Die Stickoxidemissionen waren erwartungsgemäß im Betrieb mit Biodiesel ca. 10% höher als mit Dieselmotorkraftstoff und überschritten im ESC-Test knapp den Euro IV-Grenzwert. Ein leichter Anstieg konnte im Laufe des 500-Stunden-Tests beobachtet werden.

Die Partikelemissionen nahmen im Verlauf des 500-Stunden-Tests ebenfalls tendenziell zu. Dabei wurden Werte gemessen, die den Euro IV-Grenzwert überschritten. Bei der Bestimmung der Partikelemissionen bestand jedoch eine Varianz von bis zu 20%, so dass diese Überschreitung nicht zwingend signifikant sein muss. Jedoch ist festzustellen, dass nach

der Hälfte des Versuchsprogramms ausschließlich Werte oberhalb des Grenzwertes ermittelt wurden.

Dieser leichte Anstieg der Partikelemissionen wurde auch durch die Messung der Partikelanzahl in allen Größenklassen mit dem ELPI bestätigt. Ebenfalls stiegen die Gesamtpartikelanzahlen über den Test an. Auch die mittels SMPS ermittelte Partikelgrößenverteilung stieg über dem Test leicht an. Allerdings zeigte sie gegenüber anderen Motoren ohne Abgasnachbehandlungssystem keine erheblichen Auffälligkeiten.

Die Aldehydemissionen ließen keine Änderung während des Testverlaufs erkennen.

Zusammenfassend hat sich der Versuchsmotor für den Betrieb mit Biodiesel über dem Testzeitraum als geeignet erwiesen. Es traten keine Störungen auf.

Im Betrieb mit Biodiesel wurde ein sehr leichter Anstieg von Stickoxiden, Partikelmasse und Partikelzahlen festgestellt. Ob diese Anstiege auf den Motor oder auf den Kraftstoff zurückzuführen sind, ist nicht eindeutig zuzuordnen.

Der Motor könnte vermutlich durch Anpassung des Motormanagements auf den Biodieselbetrieb weniger Stickoxide emittieren. Die Frage, wie die gravimetrisch ermittelte Partikelmasse ohne Stickoxiderhöhung abzusenken ist, bleibt offen. Jedoch ist der Motor auch im Biodieselbetrieb nah an den gültigen Abgasgrenzwerten.

1 Aufgabenstellung

Ein MAN D 0836 Euro IV-Nutzfahrzeugmotor mit PM-Kat[®] sollte hinsichtlich seiner umweltrelevanten Emissionen im RME-Betrieb getestet werden. Von besonderem Interesse war dabei, wie sich der 500 Stunden RME-Dauerbetrieb auf den Partikelfilter, der zum Erreichen der Euro IV-Grenzwerte erforderlich ist, auswirkt.

Der dynamische Prüfzyklus „European Transient Cycle“ (ETC) ist neben dem stationären „European Steady state Cycle“ (ESC) zur Bestimmung der Abgasemissionen vorgeschrieben. Zur Durchführung des Tests musste ein neuer Motorprüfstand aufgebaut werden, der auch dynamische Prüfzyklen fahren kann.

Der Versuchsmotor wurde in einem 500-Stunden-Test ausschließlich mit RME betrieben. Während des Tests wurden Abgasemissionen im ETC- und ESC-Test bestimmt. Berücksichtigt wurden sowohl limitierte Abgasemissionen (CO, HC, NO_x, und PM) als auch einige nicht limitierte Parameter wie Partikelgrößenverteilung und Partikelanzahl, sowie Aldehyde und Ketone.

Darüber hinaus wurden das Motoröl und der Partikelfilter auf Veränderungen überprüft.

2 Umweltrelevanz von Dieselmotoremissionen

Seit dem 2. Weltkrieg werden Dieselmotoren in vielen Industriezweigen sowie im Bereich Transport und Verkehr eingesetzt. Neben ihrer guten energetischen Effizienz wurde zunächst auch auf die besondere Umweltverträglichkeit der Emissionen verwiesen, die bei CO und HC vergleichsweise niedrig sind. Mitte der 80er Jahre wurden mit Dieselmotoren betriebene Pkw daher steuerlich begünstigt.

In den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts gelangte der Dieselmotor jedoch wegen seiner Emissionen in das Kreuzfeuer der Kritik. Dabei stehen noch heute insbesondere die NO_x- und Partikelemissionen im Vordergrund. Während den gasförmigen Stickoxiden eindeutige Gesundheits- und Umweltwirkungen zugeschrieben werden können, gestaltet sich eine Beurteilung der Rußemissionen weit vielschichtiger.

Neben diesen Komponenten sind noch eine Vielzahl weiterer Substanzen im Abgas vorhanden, die für die Schädlichkeit von Dieselmotorabgasen verantwortlich sind. In diesem Projekt wird aufgrund der Aufgabenstellung jedoch nur auf die gesetzlich limitierten Abgaskomponenten sowie einige ausgewählte nicht limitierte Substanzen eingegangen.

2.1 Kohlenwasserstoffe (HC)

Die Verbrennung von organischem Material verläuft idealerweise unter Bildung von Kohlendioxid und Wasser gemäß der Bruttoreaktionsgleichung



Bei der Verbrennung im Motor wird diese ideale Umsetzung des Kraftstoffs zu Wasser und Kohlendioxid nicht erreicht. Je nach Motor und Betriebsbedingungen (Lastpunkt, Motortemperatur etc.) können teiloxydierte Verbindungen entstehen oder un- bzw. teilverbrannter Kraftstoff emittiert werden. Fast alle dieser Komponenten werden als Summenparameter erfasst.

Kohlenwasserstoffemissionen können toxikologisch wenig relevant sein (z. B. Alkane oder Alkene) oder aber kanzerogen wirken wie z. B. Benzol. Darüber hinaus sind sie in der atmosphärischen Chemie (Sommersmogbildung) von Bedeutung. Eine Korrelation zwischen einem HC-Gesamtemissionswert und den daraus resultierenden Gesundheits- und Umweltschäden kann aufgrund der komplexen Zusammensetzung dieser Stoffgruppe nicht vorgenommen werden.

2.2 Kohlenmonoxid (CO)

Wie bei den Kohlenwasserstoffen entsteht CO durch eine unvollständige Verbrennung des Kraftstoffs. Neben motorischen Prozessen sind weitere Hauptemissionsquellen Verbrennungsprozesse in Haushalt und Industrie. Ein etwa ebenso großer Anteil wie aus Verbrennungsprozessen stammt aus der Oxidation von Methan in der Troposphäre. Außerdem wird es

beim Abbau von Chlorophyll freigesetzt. In der Atmosphäre wird CO ständig über die Oxidation mit Hydroxylradikalen zu CO₂ umgesetzt oder aus der Atmosphäre durch Bodenbakterien eliminiert. Die mittlere Verweildauer in der Troposphäre ist kürzer als ein halbes Jahr. Durch den hohen Umsatz von CO in der Atmosphäre liegt die Hauptgefahr weniger im globalen als im lokalen Bereich und besonders in geschlossenen Räumen.

Kohlenmonoxid ist ein farb- und geruchloses Gas. Es bindet sich um den Faktor 250 stärker an das Hämoglobin als Sauerstoff. Deshalb besteht bei einer erhöhten CO-Konzentration in der Atemluft die Gefahr des Erstickens. Akute Vergiftungen treten ab 2000 ppm, subakute schon ab 500 ppm CO auf.

2.3 Stickoxide (NO_x)

Die Stickstoffoxide NO und NO₂ sind Nebenprodukte der vollständigen Verbrennung. So entsteht Stickstoffmonoxid, das einen Anteil von über 90 % an der Gesamtstickoxidemission im Rohabgas hat, als sogenanntes "thermisches NO" in sauerstoffreichen Gebieten der Flamme bzw. in der Nachreaktionszone (Baumbach, 1993) gemäß



Die Reaktion setzt bei ca. 1300 °C in Folge der beginnenden Sauerstoffdissoziation ein. Im motorischen Bereich wird eine nennenswerte NO_x-Bildung jedoch erst ab ca. 1900 °C festgestellt (Mattes et al., 1999).

Zum anderen entsteht das als "promptes NO" bezeichnete Stickstoffoxid, welches aus der Reaktion von CH-Radikalen mit Luftstickstoff und intermediär gebildeter Blausäure entsteht (Warnatz et al., 2001). Letzteres spielt quantitativ jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

Charakteristisch für NO ist sein großes Bestreben, mit Sauerstoff – und besonders schnell mit Ozon – zu NO₂ zu reagieren. Dadurch wirkt NO "ozonzehrend". Reines NO besitzt keine Lungenreizwirkung, bildet aber, sofern keine Umwandlung zu NO₂ stattfindet, nach Resorption über den Atemtrakt Methämoglobin. NO ist ein endogener Modulator des Blutgefäßtonus und deshalb physiologisch-metabolisch eine gut untersuchte Substanz (Lenz et al., 1993).

Stickstoffdioxid ist ein Gas mit stechendem Geruch und rot-brauner Farbe. Es wirkt bereits bei geringen Konzentrationen als Lungenreizgas und ist schleimhautreizend. Als freies Radikal ist NO₂ grundsätzlich in der Lage, Wasserstoffatome von Fettsäuren zu abstrahieren und so die Lipidperoxidation einzuleiten. Diese Peroxidationen führen letztlich zum Funktionsverlust von biologischen Membranen. Die Membranzerstörung gilt als übergeordnetes Toxizitätsprinzip, wobei die Lipidperoxidation eine Initialreaktion darstellt. Diesem Prozess arbeiten in der lebenden Zelle jedoch Schutz- und Reparaturmechanismen entgegen, so dass er erst bei extrem hohen, in der freien Atmosphäre kaum erreichbaren Konzentrationen

onen von NO_2 eintritt. NO_2 disproportioniert in Gegenwart von Wasser zu salpetriger Säure und Salpetersäure. Die salpetrige Säure (HNO_2) oder ihre Salze können mit sekundären Aminen zu mutagenen Nitrosaminen reagieren. Nitrit in der Blutbahn kann das Hämoglobin zu Methämoglobin oxidieren, wobei dann Kapazitäten für den Sauerstofftransport verloren gehen. Ebenso wirkt NO_2 wahrscheinlich durch die entstehende Salpetersäure (HNO_3) als Zellgift im Respirationstrakt. Eine Exposition gegenüber $9 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_2$ bewirkt eine verminderte Fluidität von Plasmamembranen. Veränderungen der Membranfluidität betreffen eine Reihe fundamentaler zellulärer Funktionen wie den transmembranen Transport, bestimmte Enzymaktivitäten und Rezeptor-Ligand-Interaktionen. Eine Aktivierung antioxidativer Enzyme und Lipidperoxidation werden nach Exposition gegenüber ca. $0,7 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_2$ festgestellt (Marquart und Schäfer, 1994). Von Bedeutung ist darüber hinaus die Eigenschaft von NO_2 , als Vorläufersubstanz für die Fotooxidantienbildung, insbesondere für Ozon, zu dienen. Der Austrag der Stickoxide aus der Atmosphäre erfolgt über gebildete salpetrige Säure oder Salpetersäure und deren anschließende nasse Deposition als sogenannter saurer Regen.

2.4 Partikel

Eine allgemeine Definition für Dieselpartikel existiert nicht. Entsprechend der Definition der Bundesumweltbehörde der USA (EPA) sollen im Folgenden unter Partikelmasse (PM) alle Stoffe verstanden werden, die bei Temperaturen unter $51,7 \text{ °C}$ (entsprechend 125 °F) im verdünnten Abgas in fester oder flüssiger Form vorhanden sind und auf einem Filter abgeschieden werden können (Code of Federal Regulations). Durch die Begrenzung der Abgasproben temperatur soll sichergestellt werden, dass alle höhersiedenden, eventuell gesundheitlich bedenklichen organischen Verbindungen an die Rußpartikel adsorbiert sind und bei der Analyse erfasst werden. Die Temperaturabsenkung der Abgasprobe soll dabei durch Vermischung mit Luft in einem Abgasverdünnungssystem erreicht werden. Auf diese Weise wird der Austritt der Abgase in die Umgebung simuliert.

Die emittierten Partikelmassen bestehen aus einer Vielzahl von organischen und anorganischen Substanzen. Die Hauptbestandteile der organischen Substanzen sind Ruß (Kohlenstoff), unverbrannter oder nur unvollständig verbrannter Kraftstoff und Schmieröl (Munack et al., 2003a). Zu den anorganischen Substanzen zählen Sulfate, Wasser und Metallverbindungen. Eine generelle quantitative Aussage über die Partikelzusammensetzung in Dieselmotoremissionen ist nicht möglich, da sie stark vom Motor, Kraftstoff, Betriebspunkt, Abgasnachbehandlungssystem und vom Schmierölverbrauch abhängt. Beim Nutzfahrzeugmotor, der bei höheren Lasten betrieben wird, überwiegt der Elementarkohlenstoff. Die Reaktionen, die zur Ruß- bzw. Partikelbildung führen, sind quantitativ nur unvollständig geklärt. Als wahrscheinlichste Hypothese gilt die Acetylen-Theorie (Klingenberg et al., 1992).

Die Bildung von Ruß ist eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung von Dieselpartikeln. Hohe Temperaturen im Brennraum bewirken bei extremem Luftmangel ein

Zerbrechen (Cracken) der Kraftstoffmoleküle in Radikale und Acetylen (C_2H_2) unter Abscheiden von Wasserstoff (Vanhaelst, 2003). Durch Anlagerungsprozesse entstehen aus dem Acetylen unter weiterer Wasserstoffabspaltung zyklische und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Weitere Additions- und Dehydrierungsreaktionen führen zu einem Anwachsen des Kohlenstoffanteils in den Molekülen. Auf diese Weise entstehen Primärpartikel mit Durchmessern von 0,01 bis 0,08 μm (Lipkea und Johnson, 1978; Amann und Siegla, 1982; Jing et al., 1996). Es kommt zu einer Anreicherung dieser Partikel im Brennraum, da die Verbrennungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt der beteiligten Moleküle sinkt. Im Anschluss wachsen diese Partikel erst durch Oberflächenwachstum und anschließende Koagulation weiter an, bis schließlich Partikel mit Durchmessern von einigen hundert Nanometer vorliegen.

Bei der Betrachtung der Partikelbildung wird grundsätzlich zwischen den Vorgängen im Brennraum, im Abgasstrang sowie bei der Vermischung von Abgas mit der Umgebungsluft unterschieden.

Bei der Partikelbildung im Brennraum ist die praktisch gleichzeitig mit der Rußbildung einsetzende Rußoxidation von großer Bedeutung. Die Geschwindigkeiten der die Rußbildung einleitenden Crackreaktionen sowie der Oxidationsreaktionen sind stark von Druck, Temperatur und Luftverhältnis abhängig. Bei hohen Temperaturen und geringem Sauerstoffangebot (kleine Luftverhältnisse) ist die Geschwindigkeit der Crackreaktionen höher als die der Oxidationsreaktionen, was zu einer verstärkten Rußbildung führt. Bei hohen Temperaturen und großen Luftverhältnissen ist hingegen die Oxidationsgeschwindigkeit größer, so dass eine nachträgliche Rußverbrennung möglich ist (Meurer, 1966; Hühn, 1970; Houben und Lepperhoff, 1990).

Eine inhomogene Gemischaufbereitung von Kraftstoff und Luft im Brennraum führt bei Dieselmotoren zwangsläufig zur Partikelbildung. Diese sind demnach als Produkte der unvollständigen Verbrennung zu betrachten, die durch hohe Temperaturen – allerdings zu Lasten einer erhöhten NO_x -Emission – verminderbar sind. Diese unausweichliche Gegenläufigkeit gilt derzeit als eines der größten Probleme direkt einspritzender Dieselmotoren und wird als sogenanntes "Diesel-Dilemma" bezeichnet. Es deutet sich jedoch erwartungsgemäß auch an, dass moderne direkt einspritzende Ottomotoren ein tendenziell analoges Verhalten zeigen (Lake et al., 1999). Zur Lösung dieses Problems werden simultan drei voneinander unterschiedliche Wege beschritten: die Feinabstimmung von Motor und Einspritzsystem, die Abgasnachbehandlung und die Optimierung von Kraftstoffen. Dabei sind die drei genannten Optionen jeweils aneinander anzupassen, um die Partikel- und Stickoxidemissionen gleichzeitig zu vermindern.

2.5 Partikelanzahlverteilung

Während die Werte für die Partikelmasse einer Begrenzung unterliegen, besteht für die Partikelgrößenverteilung noch keinerlei gesetzliche Limitierung. Jedoch ist die Partikelgröße im Hinblick auf ihre gesundheitliche Wirkung von besonderer Bedeutung. So können die ultrafeinen Partikel von ihrer Anzahl einen bedeutenden Beitrag liefern, obwohl sie kaum einen Einfluss auf die Partikelmasse haben (Shi et al., 1999). Wird für die Teilchen die Einheitsdichte 1 g/cm^3 und kugelförmige Geometrie angenommen, so gilt, dass ein Partikel der Größe $1 \text{ }\mu\text{m}$ dieselbe Masse besitzt wie 8000 Partikel mit einem Durchmesser von 50 nm . Es werden drei verschiedene Größenklassen bei den Partikeln unterschieden: die ultrafeinen, die feinen und die groben Partikel. Unter dem Begriff der ultrafeinen Partikel werden Partikel zusammengefasst, deren Durchmesser kleiner als $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ ist. Feine Partikel weisen einen aerodynamischen Durchmesser zwischen $0,1$ und $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ auf. Die groben Partikel besitzen Durchmesser größer $2,5 \text{ }\mu\text{m}$. Während die feinen und ultrafeinen Partikel größtenteils durch Verbrennungsprozesse entstehen oder unverbrannter Kraftstoff sind (Munack et al., 2007), kann die Bildung der groben Partikel auf mechanische Prozesse zurückgeführt werden, die nicht auf Verbrennungen beruhen.

Typischerweise haben die meisten Partikel aus heutigen Dieselmotoren, die mit konventionellem Dieselkraftstoff betrieben werden, einen Durchmesser von 10 bis 300 nm .

Die gesundheitliche Wirkung der Partikel hängt sehr stark von ihrem Durchmesser ab, was die Messung der Partikelverteilung besonders notwendig macht.

Aus epidemiologischen Untersuchungen verschiedenster Forschungsinstitutionen geht hervor, dass die Wirkung von Ultrafeinpartikeln (UFP) auf den menschlichen Organismus möglicherweise stärker einzustufen ist als die Wirkung größerer Partikel (Bünger et al., 2007; Penttinen et al., 2001; Voshaar et al., 2005; Wichmann et al., 2000). Grund hierfür ist das mögliche Vordringen dieser Partikel bis in die Bronchiolen und Alveolen der menschlichen Lunge und den anschließenden Eintritt in die Blutbahn. An der Partikeloberfläche sind eine Reihe von Substanzen wie Radikale, Übergangsmetalle, flüchtige organische Verbindungen und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe gebunden, welche alle in Verbindung mit Entzündungsreaktionen, die durch Partikel hervorgerufen werden, gebracht werden (Bond et al., 1988; Health Effects Institute, 1995).

Wie die Dieselpartikel im Körper wirken, ist noch nicht vollständig geklärt. Es werden jedoch folgende Hypothesen im Zusammenhang zwischen der Partikelbelastung und der Mortalität diskutiert (Marhold, 2003):

- Gesteigerte Anfälligkeit für Infektionen aufgrund geschwächter Immunabwehr
- Entzündung der Atemwege
- Entzündung der Alveolen, hervorgerufen durch Ultrafeinpartikel, die zu einem erhöhten Herzinfarkttrisiko führen
- Verkürzte Lebenserwartung wegen schwächerer Lungenfunktion

Aufgrund dessen fordern viele Wissenschaftler aus der Toxikologie und verwandten Fachgebieten, neben den bereits in der Abgasgesetzgebung beschränkten Partikelmasse-

emissionen auch einen Grenzwert für die Anzahl der emittierten Fein- und Ultrafeinpartikel festzulegen.

2.6 Aldehyde und Ketone

Aldehyde und Ketone entstehen aufgrund der unvollständigen Verbrennung von Kraftstoff im Motor. Eine vollständige Oxidation von Kohlenwasserstoffen zu Kohlendioxid und Wasser wird bei der Entstehung von Aldehyden und Ketonen vorzeitig abgebrochen. Somit bleiben Verbindungen zurück, die nur teilweise oxidiert sind. Der bei Ottokraftstoffen beobachtete eindeutige Zusammenhang zwischen dem Aromatengehalt des Kraftstoffs und der Carbonylmission ist bei Dieselmotoren nicht nachweisbar. So liegen keine gesicherten Erkenntnisse über die Aldehydbildung in Dieselmotorenmissionen (DME) vor (Prescher et al., 1997). Aldehyde und Ketone haben zum großen Teil einen stechenden, schleimhautreizenden Geruch. Der bekannteste Vertreter dieser Klasse ist das Formaldehyd, dessen negative Wirkung auf die menschliche Gesundheit als erwiesen gilt (Informationsschrift Umweltpolitik, 1992). Form- und Acetaldehyd zählen neben 1,3-Butadien, Benzol und partikulärem organischem Material gemäß dem US-Clean Air Act zu den relevantesten luftgetragenen toxischen Komponenten (Gorse et al., 1991). 1998 wurden diese sogenannten „airtoxics“ um DME erweitert.

Acrolein, das sich bei einigen Motoren im Betrieb mit Rapsölmethylester (RME) als charakteristisch erwiesen hat (Wurst et al., 1990; Krahl, 1993; Schäfer et al., 1998), gilt ebenfalls als potenzielles Kanzerogen (Office of Health and Environmental Assessment, 1990).

Im Folgenden werden die Wirkungen von Formaldehyd als Hauptbestandteil der Aldehydemissionen eines Dieselmotors näher erläutert.

Formaldehyd ist bei Raumtemperatur ein farbloses, stechend riechendes Gas. Unter atmosphärischen Bedingungen einschließlich Sonnenlicht wird Formaldehyd u.a. in CO₂ umgewandelt. In Gegenwart von NO₂ hat es eine Halbwertszeit von 35 Minuten, ohne NO₂ von 50 Minuten. Am längsten bekannt ist seine Verwendung in Medizin und Naturwissenschaft als Mittel zur Desinfektion, Sterilisation und Konservierung. Die Formaldehydkonzentrationen in der Außenluft liegen zwischen 0,1 µg/m³ (Reinluftgebiet, maritim) und 160 µg/m³ (Ballungszentrum).

Die Wahrnehmungsschwelle des stechenden Geruchs von Formaldehyd liegt je nach Proband im Bereich von 0,06 bis 0,22 mg/m³. Bekannte Effekte durch Formaldehydeinwirkungen sind Schleimhautreizungen am Auge und im Bereich der oberen Atemwege. Die Wirkungsschwelle für Reizungen am Auge liegt bei 0,06 und die der Atemwege bei 0,12 mg/m³. Asthmatiker, aber auch gesunde Menschen, können auf Formaldehyd mit Atemwegsbeschwerden reagieren. Dabei handelt es sich dann um Konzentrationen, die ohnehin zu Reizerscheinungen der Augen führen. Aufgrund seines sensibilisierenden Effekts kann eine subakute Exposition am Arbeitsplatz sowie im privaten Innenraumbereich zu asthmaartigen Anfällen führen, die bei wiederholter Exposition erneut auftreten können. Bei längerfristiger Exposition gegenüber Formaldehyd in der Innenraumluft kann es zur

Beeinträchtigung des Gedächtnisses, der Konzentrationsfähigkeit und des Schlafverhaltens kommen (Marquardt und Schäfer, 1994).

Die bei Arbeitern festgestellte Häufung von Tumoren im Bereich von Nase und Nasenrachenraum wird auf den direkten inhalativen Kontakt mit Formaldehyd zurückgeführt. Diese Häufung zeigte eine direkte Abhängigkeit von der Exposition. Der Verdacht, dass Formaldehyd auch Leukämie und Tumore des zentralen Nervensystems auslöst, hat sich nicht bestätigt. Im Gegensatz zum Tier, für das die Kanzerogenität als ausreichend gesichert eingestuft wird, ist die Kanzerogenität des Formaldehyds beim Menschen nicht eindeutig belegt. Auch die International Agency for Research on Cancer (IARC) hat bislang keine in Dieselmotoremissionen auftretenden Aldehyde oder Ketone als für den Menschen als krebserregend eingestuft. Von einer gesicherten krebsauslösenden Wirkung beim Menschen kann bei den Aldehyden und Ketonen im Dieselmotorabgas also keinesfalls die Rede sein (Bünger et al., 2000).

Die direkt gesundheitsbeeinträchtigenden Effekte von Formaldehyd sind jedoch nicht allein ausschlaggebend für die Umweltrelevanz der im Motorabgas emittierten Carbonylverbindungen, die ohnehin nur eine kurze Halbwertszeit in der Atmosphäre aufweisen (Lofti et al., 1990). Wesentlich ist darüber hinaus, dass Aldehyde und Ketone in Gegenwart von NO_x über ein großes Potenzial zur Bildung von Fotooxidantien verfügen (Carter und Bufalini, 1991; Carter, 2007).

3 Material und Methoden

3.1 Motorprüfstand

Zur Durchführung des Projektes wurde zunächst ein neuer Motorprüfstand installiert. Kernstück dieses Prüfstandes ist eine Asynchron-Vier-Quadrantenbremse DynoRoad 205/3,5 SL der Firma AVL. Damit können gemäß der Richtlinie 2005/55/EG der Europäischen Union der europäische stationäre Zyklus (European Steady State Cycle, ESC) und der europäische transiente Zyklus (European Transient Cycle, ETC) automatisch gefahren werden.

Die Asynchron-Vier-Quadrantenbremse besteht im Wesentlichen aus dem Schaltschrank, der Leistungsbremse und dem Steuerrechner EMCON 400. Der Schaltschrank wandelt die abgegebene Leistung in 50 Hz Netzspannung um. Zur Einspeisung dieser Leistung in das FAL-interne Stromnetz wurde eine ca. 100 m lange Kabeltrasse zum nächststehenden Transformator verlegt. Die notwendige Kühlung wurde durch die Installation einer leistungsfähigen Lüftung für den Schaltschrankraum erreicht.

Die Verkabelung von Schaltschrank, Leistungsbremse und EMCON 400 erfolgte endgültig nach mehrmaligem Überarbeiten des Plansatzes durch AVL nach der 3.Version. Die wesentlichen Verbindungen sind in Abbildung 3-1 aufgeführt.

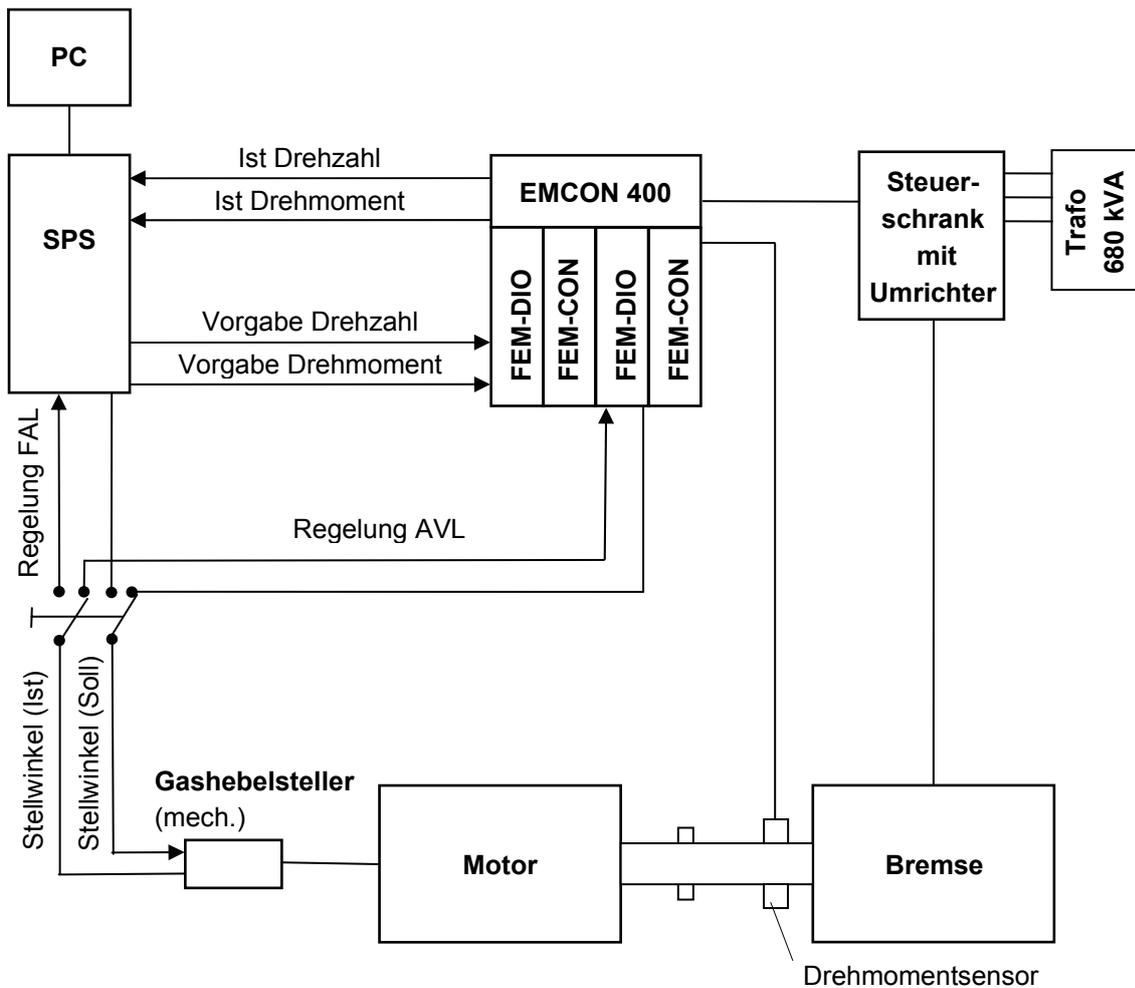


Abbildung 3-1: Aufbau (Verkabelung) des Motorprüfstandes.

Die Steuerung der Bremse kann entweder durch Handeinstellung am EMCON 400 Steuergerät oder durch eine elektronische Vorgabe am FEM-CON erfolgen. Zum Fahren von reproduzierbaren ESC- und ETC-Läufen ist eine Vorgabe von Drehmoment und Drehzahl erforderlich. Dies geschieht durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS).

Die Leistungsbremse und der Motor sind auf einer luftgefederten Aufspannplatte montiert. Die Kupplung von Motor und Bremse erfolgt mit einer Kupplungswelle der Firma Voith. Dazu passend wurde von AVL ein Wellenschutz produziert und von der FAL montiert. Dieser Wellenschutz war zuerst nicht zur Leistungsbremse kompatibel und musste erneut gefertigt werden. Somit kam es leider zu einer erheblichen Verzögerung des Messbetriebs.

3.2 Motor

Die Untersuchungen erfolgten an einem MAN Motor D0836 LFL 51 (206 kW) mit Turbolader und Ladeluftkühlung (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Technische Daten des MAN Motor D0836 LFL 51.

Nennleistung	206 kW
Nenndrehzahl	2300 min ⁻¹
Maximales Drehmoment	1100 Nm bei 1200 – 1800 min ⁻¹
Anzahl Zylinder	6
Zylinderhub	125 mm
Zylinderbohrung	108 mm
Hubvolumen	6871 cm ³
Verdichtung	18,0:1
Einspritzung	Common-Rail
Abgasnorm	EURO IV
Weitere Eigenschaften	Ladeluftkühlung Turbolader Abgasrückführung PM-Kat [®]

Der Sechszylinder-Reihenmotor arbeitet mit einem Common-Rail-Einspritzsystem. In der am Emissionsprüfstand montierten Ausführung ist der Motor nach den geltenden Emissionsgrenzwerten von EURO IV zertifiziert. Zur Abgasnachbehandlung ist ein kontinuierlich arbeitender Partikelfilter, ein so genannter PM-Kat[®] angeschlossen. Es handelt sich dabei um ein Partikelabscheidesystem im Edelstahlschalldämpfer, das verstopfungs- und damit wartungsfrei arbeitet und ohne zusätzlichen Betriebsstoff auskommt. Mit dem MAN PM-KAT[®] soll eine ca. 60%ige Reduzierung der Gesamtpartikelmasse erreicht werden. Zudem ist in diesem Filter ein Oxidationskatalysator enthalten, der unverbrannte Kohlenwasserstoffe eliminieren soll (MAN 2007).

Für den 500-stündigen Dauerlauf waren noch verschiedene Anbauteile notwendig:

- Zur Kühlung von Ladeluft und Kühlwasser wurde ein kombinierter Kühler von MAN geliefert. Da der Versuchsmotor stationär aufgebaut ist, wurde ein Kühler eines leistungsstärkeren Motors gewählt, um die notwendige Kühlleistung zu erzielen. Hier war eine zeitaufwendige Anpassung der Anschlussleitungen notwendig.
- Für die Öltemperatur wurde ein PT-100 Temperatursensor in die Ölwanne eingebaut.

- Direkt vor dem PM-Kat[®] wurde der vorhandene Temperatursensor in das Datenaufzeichnungssystem einbezogen und die Anschlussstelle für den Abgasgegendruck mit einem Drucksensor verbunden.
- Die Kraftstoffversorgung erfolgte über einen 50-Liter-Vorratskanister, der auf einer Waage mit 1 g Auflösung steht. Das Gewicht wird fortlaufend protokolliert. Die vom Motor rücklaufende Kraftstoffmenge wird mit einem Wärmetauscher gekühlt. Die Kraftstofftemperatur im Kraftstofftank wird fortlaufend protokolliert.

Die Regelung des Gashebels erfolgt über einen Stellmotor von Froude-Hofmann. Die Umsetzung des Eingangssignals von der Steuerung in die entsprechende Gashebelstellung erfolgt mit einer im Institut für Technologie und Biosystemtechnik entwickelten elektronischen Schaltung. Die Ansteuerung kann wahlweise von der AVL-Regelung des EM-CON Steuergeräts oder von der SPS übernommen werden (FAL-Regelung).

Um Daten des Motorsteuergerätes auslesen zu können, wurde ein INKA-System der Firma Etas verwendet. Es wurden folgende Daten protokolliert:

- Öldruck
- Drehzahl
- Wassertemperatur
- Ladelufttemperatur
- Ladedruck
- Ladedruck Sollwert (ohne DT1 Anteil)
- Atmosphärendruck
- Kraftstoffdruck
- Kraftstoffdruck Sollwert
- Kraftstoffmasse (berechnet)
- Kraftstoffversorgungsdruck
- Ventilposition Abgasrückführung
- Ventilposition Abgasrückführung Sollwert
- Beginn der Haupteinspritzung
- Fahrpedalstellung

3.3 Motortestbedingungen

3.3.1 Bestimmung der Volllastkurve

Um die im ESC- und ETC-Test festgelegten Messpunkte und Messverläufe bestimmen zu können, muss eine Volllastkurve gefahren werden. Die in der Literatur (MAN, 2006) beschriebene Kurve gibt den Verlauf nur recht unvollständig wieder. Daher wurde die Volllastkurve vor den Versuchen bestimmt (Abbildung 3-2).

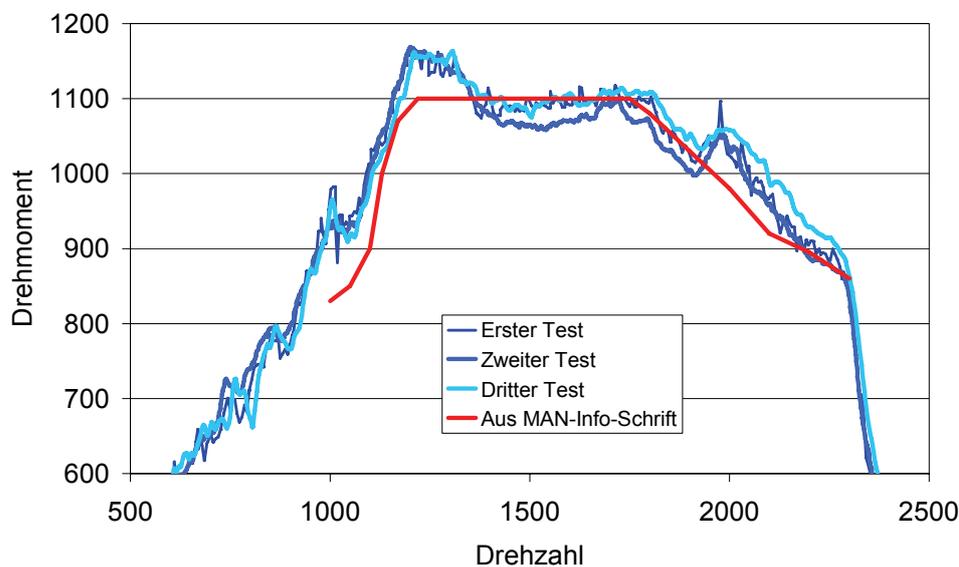


Abbildung 3-2: Volllastkurve des MAN-Motors (Kraftstoff: DK).

3.3.2 ESC-Test

Aus der Volllastkurve wurden die Prüfpunkte ermittelt. Für den ESC-Test ergaben sich nach der Richtlinie 2005/55/EG der Europäischen Union (EU, 2005; EWG 88/77, 1992) neben der Leerlaufdrehzahl die Drehzahlen 1025, 1450 und 1875 min^{-1} . Das entsprechende Drehmoment bezieht sich jeweils auf das bei dieser Drehzahl mit Dieselmotorkraftstoff maximal erreichbare Drehmoment. Damit ergibt sich für einen realen ESC-Test der in Abbildung 3-3 gezeigte Verlauf. Die Wichtungen der Betriebspunkte und deren Verteilung im Motorkennfeld zeigt Abbildung 3-4.

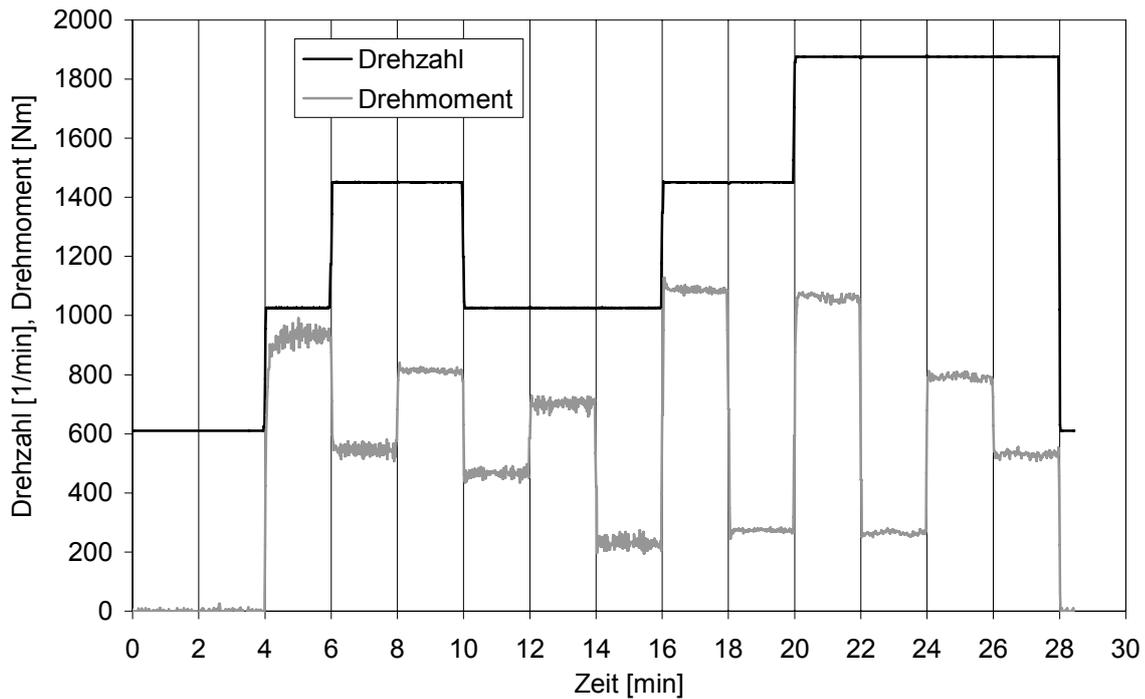


Abbildung 3-3: Drehzahl und Drehmoment im Verlauf des ESC-Tests.

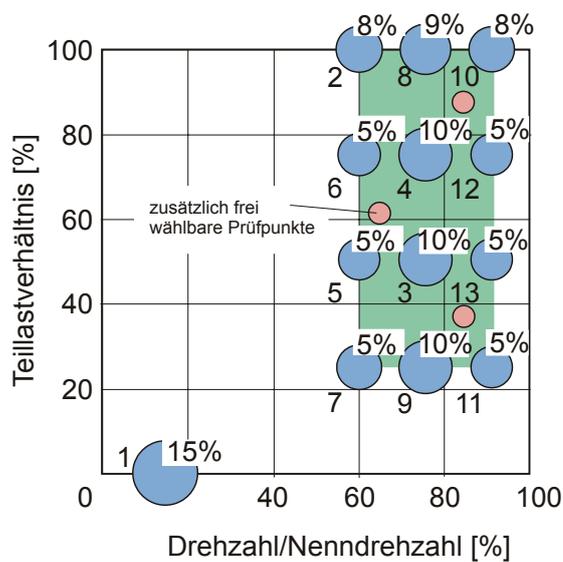


Abbildung 3-4: Motorbetriebspunkte des ESC-Tests.

3.3.3 ETC-Test

Der Verlauf des europäischen transienten Zyklus (ETC) wurde ebenso gemäß der Richtlinie 2005/55/EG der Europäischen Union bestimmt. Der Verlauf des realen Tests ist in Abbildung

3-5 dargestellt. Dabei sollen jeweils zehn Minuten die Motorbelastung einer Stadtfahrt, einer Überlandfahrt und einer Autobahnfahrt simulieren.

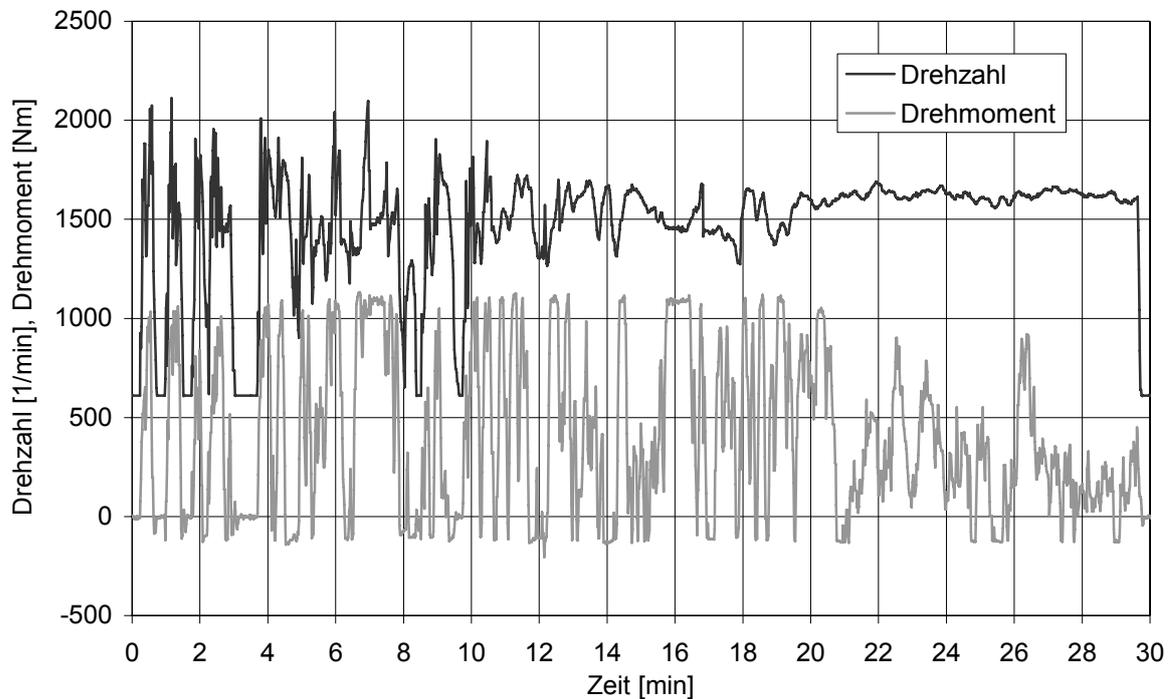


Abbildung 3-5: Drehzahl und Drehmoment im Verlauf des ETC-Tests.

Realisierung des ETC-Tests am Motorprüfstand

Der ETC-Test erfordert zum Teil sehr schnelle Lastwechsel. Diesen kann der MAN-Motor nur bedingt folgen. Die Drehzahl wird von der Bremse vorgegeben. So folgt die Drehzahl der Soll-Drehzahl sehr genau. Das Drehmoment ergibt sich aus der Stellung des Gaspedals und der Drehzahl und unterliegt somit der Geschwindigkeit der Gaspedalregelung. Bei der Regelung von AVL wird das Gaspedal nur langsam auf einen neuen Wert eingestellt. Somit folgt das Drehmoment Änderungen der Vorgabe im Sekundenbereich kaum. Mit der FAL-Regelung wird das Gaspedal bei schnellen Lastwechseln auf einen vorberechneten Wert eingestellt und dann erst wird dieser Wert genau eingeregelt. Somit folgt der Verlauf des Drehmoments den Vorgaben mit der FAL-Regelung deutlich besser, kann aber dem geforderten Verlauf auch nicht vollständig folgen. Abbildung 3-6 zeigt den Verlauf von Drehmoment und Drehzahl am Anfang des ETC-Tests für die verschiedenen Regelungen im Bereich von Sekunde 200 bis 400 im ETC-Test. Bei negativer Drehmomentvorgabe soll der Motor im Schleppbetrieb gefahren werden.

Die Volllastkurve wurde nach der EU-Richtlinie (EWG, 88/77) mit Dieselmotorkraftstoff ermittelt. Da Biodiesel einen geringeren Energieinhalt hat, wird nicht das volle Drehmoment erreicht.

Es ergibt sich ein ca. 12% niedrigeres Drehmoment. Abbildung 3-7 zeigt den Unterschied zwischen den beiden Kraftstoffen.

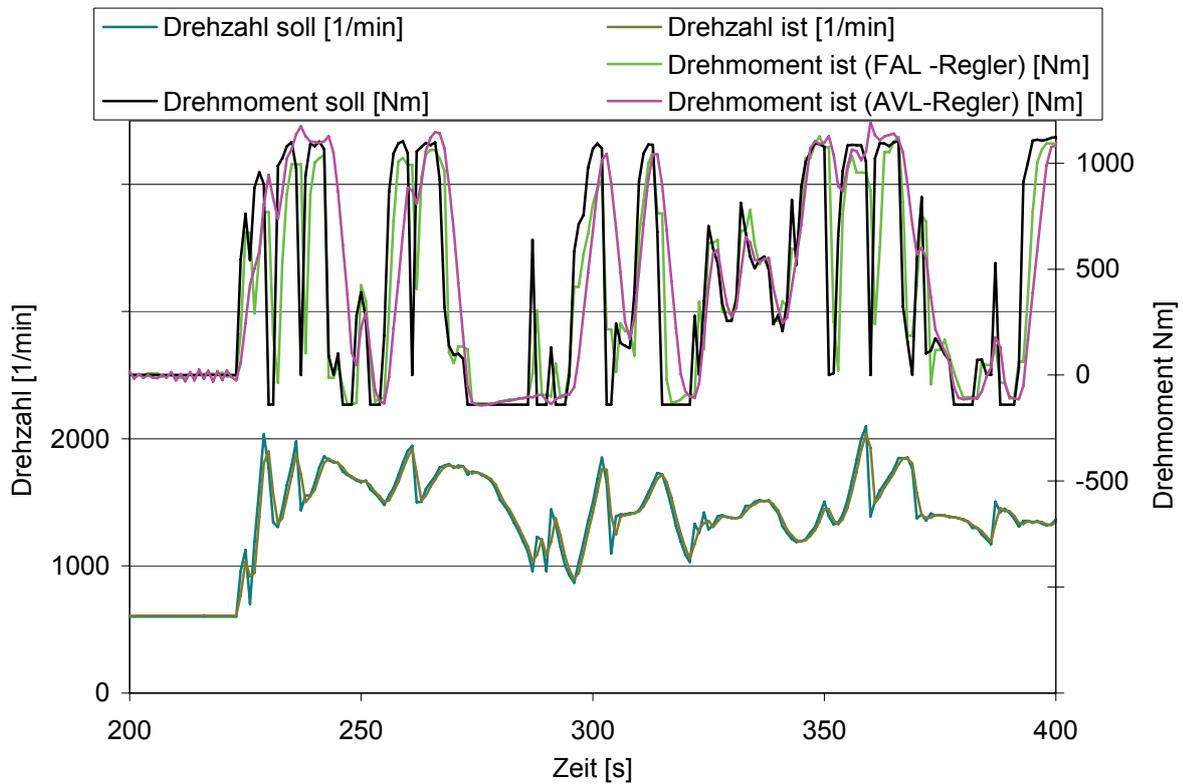


Abbildung 3-6: Verlauf von Drehmoment und Drehzahl des ETC-Tests im Bereich von 200 s bis 400 s mit verschiedenen Reglern (Kraftstoff: DK).

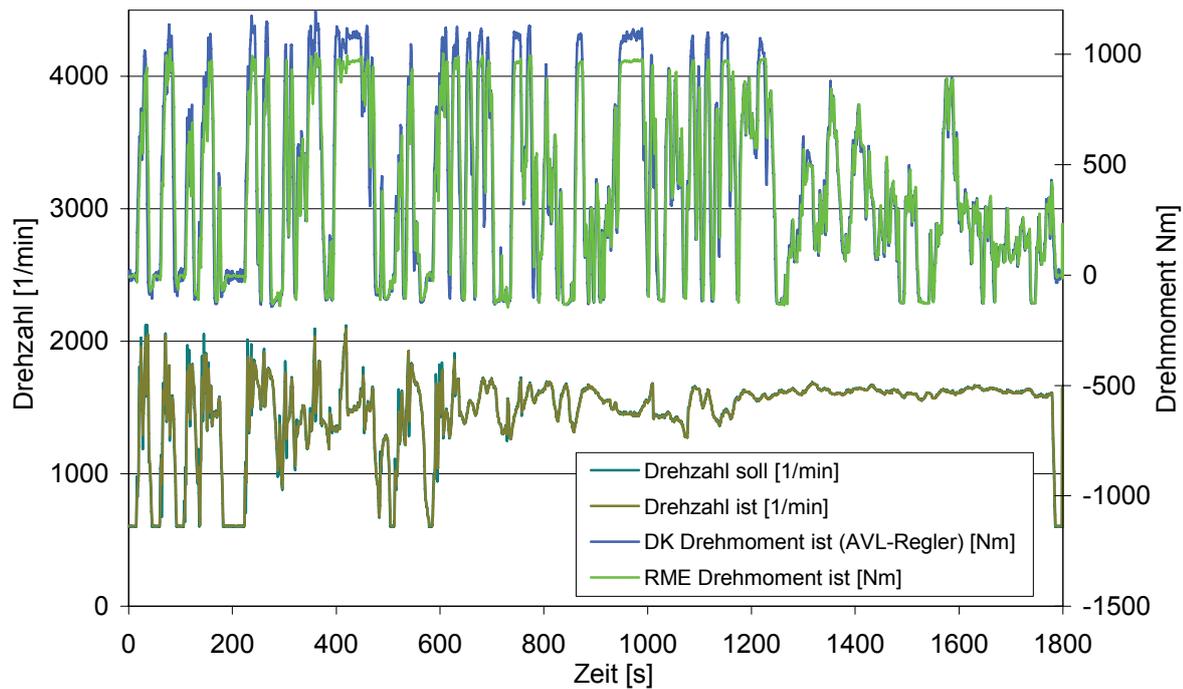


Abbildung 3-7: Verlauf von Drehmoment und Drehzahl des ETC-Tests mit DK und RME.

3.4 Versuchsablauf

Nach dem Einfahren und der Abnahme der Bremse von AVL wurde die Abgasmesstechnik des Instituts angeschlossen und der 500-Stunden-Test gestartet. Neben Abschnitten mit konstantem Drehzahl- und Drehmomentverlauf wurden täglich bis zu 20 ESC-Tests und ETC-Tests gefahren. Einmal täglich wurde der Motor kurzzeitig abgestellt, um eine Ölprobe von ca. 50 ml zu nehmen. Ein typischer Tagesverlauf von Drehzahl und Drehmoment ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Täglich sollten mindestens drei Bestimmungen der verschiedenen limitierten Abgaskomponenten erfolgen. Aus dem ESC-Test wurden die Emissionen der gasförmigen limitierten Abgaskomponenten, der Partikelmasse und der Partikelgrößenverteilung bestimmt. Der ETC-Test diente zur Probenahme von Aldehyden aus dem unverdünnten Abgas und der vergleichenden Partikelgrößenverteilung im verdünnten Abgas. Eine Berechnung der (limitierten) Abgasemissionen war im ETC-Test nicht möglich, da ein Vollstromverdünnungstunnel oder ein gleichwertiges System (z.B. AVL Smartsampler) nicht zur Verfügung stand. Für die limitierten gasförmigen Abgaskomponenten wurde daher ein Vergleich der Konzentration im Abgas durchgeführt.

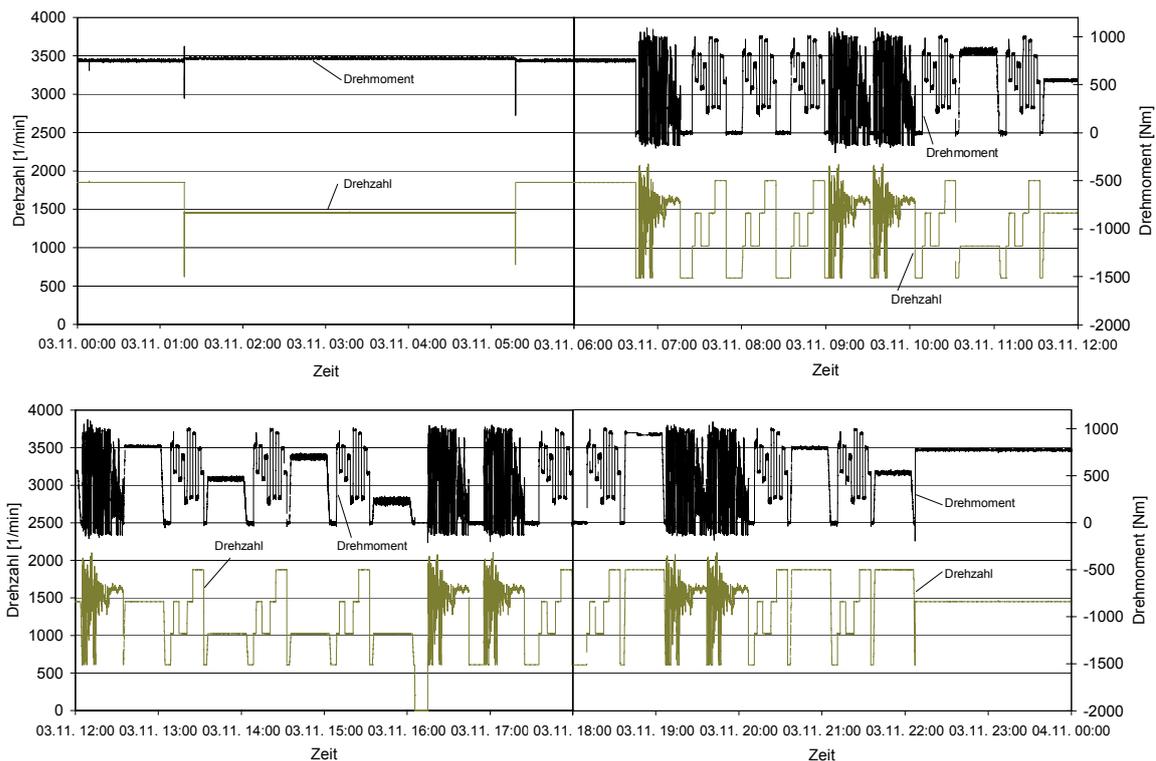


Abbildung 3-8: Typischer Tagesverlauf von Drehmoment und Drehzahl im 500-Stunden-Test.

3.5 Kraftstoffeigenschaften

Zum Einfahren der Bremse mit dem MAN-Motor durch AVL wurde Tankstellendiesel ohne Analysenzertifikat verwendet. Während des 500-Stunden-Tests wurden zwei Chargen

Rapsölmethylester (RME) gemäß DIN EN 14214 vom Bio-Ölwerk Magdeburg GmbH, Magdeburg, bezogen. Mineralischer Dieseldieselkraftstoff (DK) gemäß DIN EN 590 wurde von Haltermann Products BSL Olefinverbund GmbH in Hamburg geliefert.

Die Tabelle 3-2 zeigt die Analysenwerte der verwendeten Kraftstoffe.

Tabelle 3-2: Eigenschaften der verwendeten Kraftstoffe laut Analysenberichten.

	Grenzwert nach DIN EN 14214	RME _a	RME _b	Grenzwert nach DIN EN 590	DK
Dichte (15°C) [kg/m ³]	860-900	883	883	820-845	833,6
kin. Viskosität (40°C) [mm ² /s]	3,5-5,0	4,42	4,42	2-4,5	2,945
Flammpunkt [°C]	min. 120	176	176	> 55	84
C.F.P.P. [°C]	max. -20	-15	-21	-5 / -20	-21
Schwefel [mg/kg]	max. 10,0	1,5	1,5	max. 10	<1
Koksrückstand [Gew.-%]	max. 0,30	0,06	0,06	max. 0,20	<0,01
Aschegehalt [Gew.-%]	max. 0,02	<0,001	<0,001	max. 0,01	<0,001
Cetanzahl [-]	min. 51	51,3	51,3	min. 51	52,5
Wassergehalt [mg/kg]	max. 500	208	146	max. 200	20
Gesamtverschmutzung [mg/kg]	max. 24	14	4		
Kupfer Korrosion [-]	max. 1	1	1	max. 1	1A
Neutralisationszahl [mg KOH/g]	max. 0,5	0,11	0,04	max. 0,5	0,00
Oxidationsstabilität [g/m ³]				max. 25	<1
H.F.R.R. [µm]				max. 400	265
Heizwert [MJ/kg]					43,137
Polyaromaten [Vol.-%]					4,3
Gesamtaromaten [Vol.-%]					28,2
FAME-Gehalt [Vol.-%]			>99,0	max. 5	0
Gehalt an Linolensäure- Methyl-Ester [%]	max. 12	7,7	7,7		
Methanolgehalt [%]	max. 0,2	0,03	0,03		
Monoglyceride [%]	max. 0,8	0,70	0,75		
Diglyceride [%]	max. 0,2	0,12	0,13		
Triglyceride [%]	max. 0,2	0,02	0,07		
Freies Glycerin [%]	max. 0,01	<0,01	<0,01		
Gesamtglycerin [%]	max. 0,25	0,20	0,22		
Alkaligehalt [mg/kg]	max. 5	<0,5	<0,5		
Erdalkaligehalt [mg/kg]	max. 5	<0,5	<0,5		
Phosphorgehalt [mg/kg]	max. 10	<0,5	<0,5		
Oxidationsstabilität [h]	min. 6	8,7	8,7		
Iodzahl [g Iod/100g]	max. 120	114	114		

3.6 Analysenmethoden

3.6.1 Gesetzlich limitierte Abgasparameter

Die gesetzlich limitierten Abgasbestandteile Kohlenmonoxid (CO), Gesamtkohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO_x) wurden durch herkömmliche Gasanalysatoren bestimmt und ihre Werte sekundlich aufgezeichnet. Eine Auswertung erfolgte im ESC-Test aus den Mittelwerten der in der letzten Minute eines Betriebspunktes aufgezeichneten Analysedaten. Im ETC-Test wurde nur für die Stickoxide eine vergleichende Auswertung durchgeführt.

3.6.1.1 Kohlenmonoxid

Das Messgerät für CO arbeitet mit nicht dispersem Infrarotlicht (NDIR-Verfahren). Es handelt sich dabei um einen Gasanalysator Multor 710 (Fa. Maihak). Der gefilterte und unter seine Taupunkttemperatur abgekühlte Probegasstrom wird in zwei gleiche, jeweils durch eine Küvette fließende Teilströme geteilt. Eine dieser Küvetten wird mit infrarotem Licht bestrahlt, dessen Wellenlänge auf charakteristische Absorptionen des Kohlenmonoxids abgestimmt ist. Dadurch erwärmt sich dieser Teilstrom, und es kommt in einem Verbindungskanal der beiden Küvetten zu einer Ausgleichsströmung, die durch einen Mikroströmungsfühler gemessen wird und ein kalibrierfähiges Maß für den Gehalt der Messkomponente CO ist. Kalibriert wird der Analysator mittels Prüfgas von 0,198 % CO in Stickstoff.

3.6.1.2 Kohlenwasserstoffe

Zur Bestimmung der Kohlenwasserstoffe wurde als Messgerät der Gasanalysator RS 55-T der Firma Ratfisch eingesetzt. Er arbeitet mit einem Flammenionisations-Detektor (FID), wobei das Probegas in einer Helium-Wasserstoff-Flamme ionisiert wird, die in einem elektrischen Feld brennt. Durch Messung der Feldänderung wird der Kohlenwasserstoffgehalt ermittelt. Die Kalibrierung erfolgte mit Propan (C₃H₈, 276 ppm) als Einpunktkalibrierung. Dabei führt eine mittels eines Thermostaten konstant auf 190 °C beheizte Leitung das heiße und zuvor gefilterte Abgas dem HC-Analysator zu. Mit der Beheizung des Gasweges soll eine vorzeitige Kondensation höhersiedender Kohlenwasserstoffe vermieden werden.

3.6.1.3 Stickoxide

Die Stickoxide wurden mit einem Chemilumineszenzdetektor (CLD) der Firma EcoPhysics (CLD 700 EL ht) analysiert. Grundlage des CLD ist die Tatsache, dass bei der Oxidation von NO zu NO₂ etwa 10 % der NO₂-Moleküle in einen elektronisch angeregten Zustand gelangen, aus dem sie sofort in den nicht angeregten Zustand zurückkehren, wobei Photonen ausgesendet werden (Lumineszenz). Diese werden bestimmt und sind ein Maß für den NO-Gehalt. Zur Bestimmung des Gesamtgehaltes an NO_x (NO + NO₂ = NO_x) wird die heiße und gefilterte Probe zunächst durch einen Konverter geleitet, in dem NO₂ zu NO reduziert wird. NO₂ wird als Differenz aus der Messung von NO_x und NO errechnet. Der CLD erzeugt mittels eines im Gerät enthaltenen Ozongenerators Ozon (O₃) für die Oxidation von NO zu NO₂. Die Kalibrierung erfolgt mit Prüfgas von 805 ppm NO in Stickstoff.

3.6.1.4 Partikelmasse

Die Partikelmasse wurde nur im ESC-Test bestimmt, da ein dynamischer Miniverdünnungstunnel bzw. ein Vollstromverdünnungstunnel am Institut für Technologie und Biosystemtechnik nicht zur Verfügung stand.

Die Probenahme zur Partikelmassebestimmung im ESC-Test erfolgte an einem Abgasteilstromverdünnungstunnel (Abbildung 3-9), der das Abgas verdünnt und auf unter 51,7 °C abkühlt. Die Partikel werden auf einem zweistufigen Filter gesammelt, indem ein Teilstrom aus dem verdünnten Abgas entnommen und durch die Filter geführt wird. Mit Hilfe eines Massendurchflussreglers wird hierbei ein definierter Volumenstrom eingestellt. Das Gesamtvolumen V_{SAM} , das durch den Filter gesogen wird, ergibt sich aus der Vorgabe, dass die Filterbelegung je Prüfphase mindestens vier Sekunden je 0,01 Wichtungsfaktor dauern muss. Dies muss außerdem so spät wie möglich erfolgen und darf nicht früher als fünf Sekunden vor dem Phasenende abgeschlossen sein. Für die Probenahme wird für jeden Betriebspunkt die Verdünnung errechnet und der Massendurchflussregler so eingestellt, wie es der Wichtung im ESC-Test entspricht. Die Probenahme erfolgt dann jeweils 60 Sekunden lang und endet drei Sekunden vor Ende des Betriebspunktes. Dabei wird das Verdünnungsverhältnis ständig überwacht, so dass das Abgasprobevolumen gegebenenfalls durch Verlängern bzw. Verkürzen der Probenahmezeit korrigiert werden kann. Der Wichtungsfaktor, der sich aus folgender Gleichung ergibt, muss dabei mit $\pm 7\%$ eingehalten werden

$$\frac{V_{SAM,i} \cdot \sum_i (V''_{EDF,i} \cdot WF_i)}{V_{SAM} \cdot q_i \cdot V''_{EDF,i}} = WF_i \quad (3.1)$$

mit

V_{SAM} : Gesamtprobevolumen

$V_{SAM,i}$: Probevolumen im Betriebspunkt i

$V''_{EDF,i}$: Abgasvolumenstrom im Betriebspunkt i

WF_i : Wichtungsfaktor des Betriebspunktes i

q_i : Abgasverdünnungsverhältnis im Betriebspunkt i.

Bei den Filtern handelt es sich um PTFE-beschichtete Glasfaserfilter (T60A20, Pallflex Products Corp.), deren gravimetrische Analyse per Mikrogrammwaage erfolgt (Sartorius M5P).

Die Partikelemission berechnet sich dann nach

$$PT = \frac{M_{PF} \cdot \sum_i (V_{EDF,i}'' \cdot WF_i)}{V_{SAM} \cdot \sum_i (P_i \cdot WF_i)} \quad (3.2)$$

mit

PT: spezifische Partikelemission

M_{PF}: Gesamtmasse auf den Partikelfiltern

V_{SAM}: Gesamtprobevolumen

V_{EDF,i}'': Abgasvolumenstrom im Betriebspunkt i

WF_i: Wichtungsfaktor des Betriebspunktes i

P_i: Leistung im Betriebspunkt i.

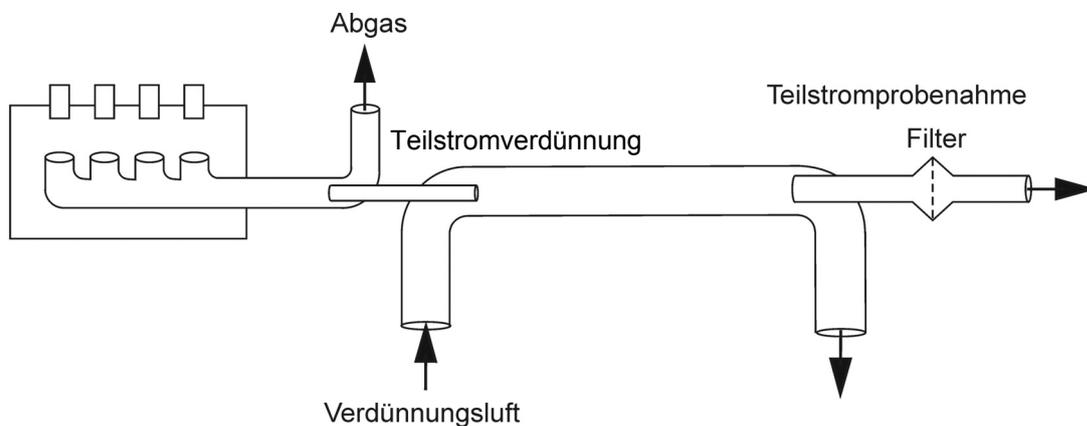


Abb. 3-9: Schematische Darstellung des Abgasverdünnungstunnels.

3.6.2 Gesetzlich nicht limitierte Abgasparameter

3.6.2.1 Partikelanzahlverteilung (ELPI)

Die Probenahme für den Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) der Firma DEKATI Ltd. erfolgte im verdünnten Abgas. Mit Hilfe einer Entnahmeleitung aus Edelstahl ist der ELPI mit dem Ende des Teilstromverdünnungstunnels verbunden. Die für diese Arbeit verwendete Fünfflochsonde besteht aus einem 3/8“ Edelstahlrohr, das senkrecht zur Strömungsrichtung mittig im Abgasrohr eingebaut ist.

Beim ELPI handelt es sich um ein Echtzeit-Partikelmessgerät, welches den Größenbereich von 30 nm bis 10 µm abdeckt. Zur Partikelabscheidung verwendet der ELPI einen Kaskadenimpaktor. Dieser ist aus 13 Stufen aufgebaut, von denen die erste Stufe als Vorabscheider fungiert und die zwölf weiteren Stufen elektronisch ausgewertet werden.

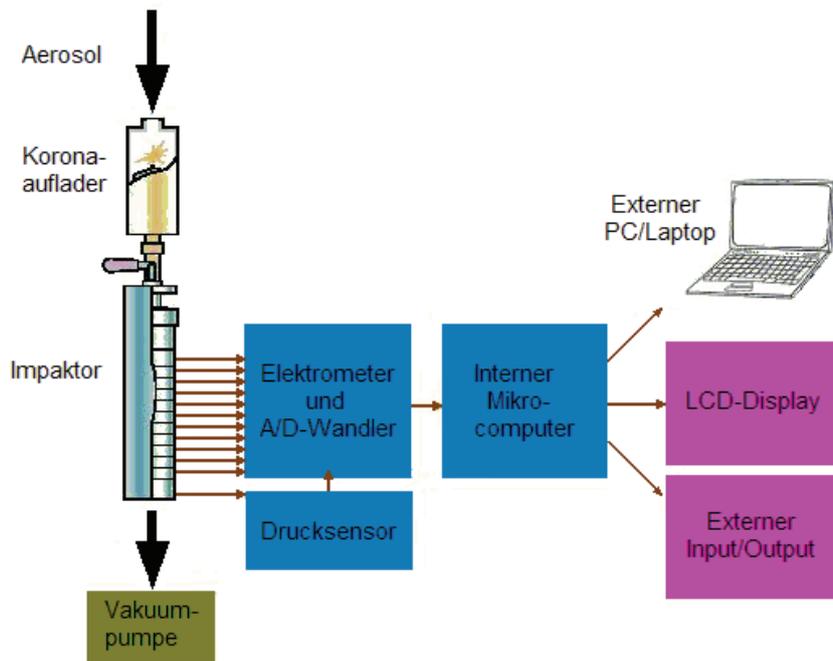


Abb. 3-10: Funktionsprinzip des ELPI (Dekati, 2002).

Abbildung 3-10 veranschaulicht das Messprinzip des ELPI. Die zu untersuchende Aerosolprobe wird zunächst durch eine Vorkammer geleitet. Dort werden die Partikel durch die von einer Koronaentladung produzierten Ionen unipolar aufgeladen. Bei der anschließenden Klassierung im Impaktor geben die Teilchen dann die Ladung auf der entsprechenden Impaktorstufe wieder ab; der daraus resultierende Stromfluss ist zur Partikelanzahl proportional und wird von einem Elektrometer aufgenommen. Mit Kenntnis der Aufladeeffizienz, welche eine Funktion der Partikelgröße ist, und der Abscheidecharakteristik des Kaskadenimpaktors kann die Stromstärke jeder einzelnen Stufe in eine Partikelgrößenverteilung umgerechnet werden. Diese Größenverteilung ist dabei stets auf den aerodynamischen Durchmesser der Partikel bezogen (Dekati, 2001).

3.6.2.2 Partikelanzahlverteilung (SMPS)

Die Probenahme für das Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) der Firma TSI erfolgte genau wie beim ELPI aus dem verdünnten Abgas. Hier wird ebenfalls eine Fünflochsonde verwendet, die jedoch aus einem 1/4“ Edelstahlrohr besteht. Die Lage der Messstelle im Abgassystem entspricht der des ELPI.

Prinzipiell besteht das SMPS-System aus einem Klassierer (Differential Mobility Analyzer, DMA) und einem Kondensationspartikelzähler (Condensation Particle Counter, CPC). Die Abbildungen 3-11 und 3-12 zeigen den schematischen Aufbau des Systems.

Durch einen Vorimpaktor werden zunächst Partikel abgeschieden, die oberhalb der Messgrenze des SMPS liegen. Das Abgas mit den verbleibenden Partikeln wird dann in einen Neutralisator geleitet. Durch eine radioaktive Quelle (Kr-85) im DMA erhalten die Partikel eine definierte bipolare Ladungsverteilung. Der Klassierer selbst besteht aus zwei konzentrisch angeordneten Metallzylindern, von denen der äußere geerdet ist. Der innere

Zylinder wird ständig mit gefilterter Luft laminar umströmt (Hüllgas) und wirkt als Zentralelektrode, an die eine zeitlich variierende negative Spannung (20 bis 10.000 Volt) angelegt wird. Das Aerosol strömt ebenfalls laminar in den Klassierer ein. Im elektrischen Feld der beiden Metallelektroden werden die positiv geladenen Partikel dann entsprechend ihrer elektrischen Mobilität, die nur durch ihre Ladung und Größe bestimmt ist, zur Zentralelektrode hin beschleunigt. Durch einen engen waagerechten Schlitz in der Innenelektrode wird eine schmale Beweglichkeitsklasse der Partikel separiert und dem CPC zugeleitet. Die so erzeugten Partikelgrößenklassen haben einen elektrischen Mobilitätsdurchmesser von 10 bis 300 nm. Dieser elektrische Mobilitätsdurchmesser wird durch Dichte, Form und elektrische Eigenschaften bestimmt und muss nicht mit dem physikalischen Durchmesser identisch sein. Die abschließende Konzentrationsbestimmung erfolgt durch Zählung von Streulichtpulsen (bei niedriger Konzentration) oder durch Messung der Streulichtintensität. Um eine hohe Zähleffizienz auch für kleine Partikel zu erreichen, dienen die Partikel in einem übersättigten Alkoholdampf als Kondensationskerne, wodurch sie in ihrer Größe auf mehrere Mikrometer anwachsen und damit einen größeren Streuquerschnitt erhalten (BUWAL 2000). Eine Unterscheidung zwischen festen und flüchtigen Abgasbestandteilen respektive Abgasteilchen und Tröpfchen ist mit dieser Messanordnung des SMPS nicht möglich (Munack et al. 2007).

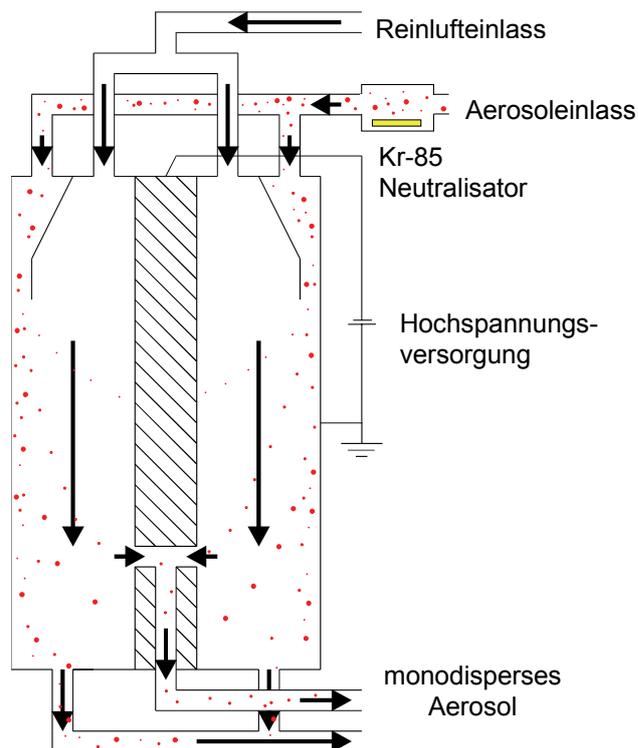


Abb. 3-11: Vereinfachte Darstellung des DMA.

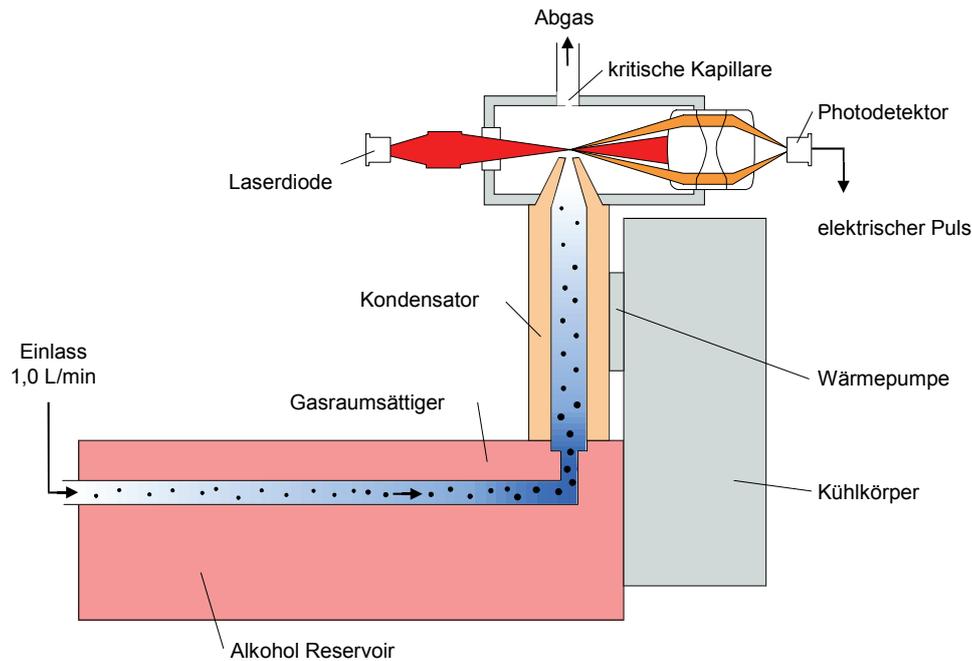
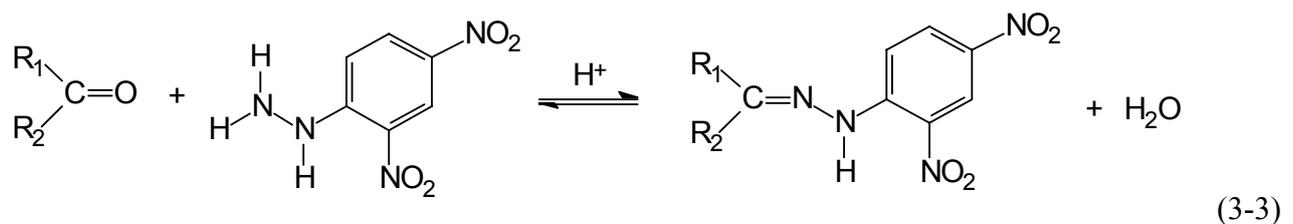


Abb. 3-12: Vereinfachte Darstellung des CPC.

3.6.2.3 Aldehyde und Ketone

Die Aldehyde und Ketone wurden mit DNPH-Kartuschen bestimmt. Diese Kartuschen enthalten Silikagel, das mit 2,4-Dinitrophenylhydrazin (DNPH) beschichtet ist. Werden Aldehyde oder Ketone über das DNPH geleitet, entstehen die analogen Hydrazone nach folgender Reaktion:



R_1 und $R_2 = \text{H}$ oder Kohlenwasserstoffrest

Die Probenahme erfolgte aus gefiltertem Rohabgas. Das Abgas wurde bis zur Kartusche beheizt, damit keine Kondensation auftritt. Da DNPH auch mit Stickstoffdioxid (NO_2) aus dem Abgas reagiert, wird vor die DNPH-Kartuschen noch eine Kartusche mit Kaliumiodid geschaltet. Sie fängt das NO_2 ab, ohne die Aldehyd- und Ketonprobenahme zu stören.

Die Flussgeschwindigkeit durch die Kartuschen betrug unabhängig von Abgasvolumenstrom konstant 0,5 L/min. Damit wurden während des ETC-Tests 15 Liter Rohabgas über die Kartusche geleitet.

Die gebildeten Hydrazone wurden mit Acetonitril aus den Kartuschen in einen 2-ml-Maßkolben ausgewaschen. Diese Lösung wurde mit einem Hochleistungsflüssigkeitschromatographen (HPLC) analysiert.

Als HPLC-System wurde eine Anlage der Firma VWR verwendet. Eine Chromatographiesäule der Firma Merck (LiChrospher RP18, Länge 250 mm, Innendurchmesser 4,6 mm, Partikeldurchmesser der stationären Phase: 5 µm) diente zur Auftrennung der Substanzen. Als mobile Phase (1 ml/min) diente ein Gemisch von Acetonitril, Tetrahydrofuran und Wasser. Die Detektion erfolgte mit einem Diodenarray-detektor der Firma VWR. Das DAD-Spektrum diente zur Identifizierung der Substanzen. Zur Auswertung wurde ein Chromatogramm bei 360 nm aufgenommen.

Die Kalibrierung des HPLC-Systems erfolgte mit einem Carbonylstandard von Supelco als Einpunktkalibrierung, wobei die Linearität zuvor durch Vermessung von Standard-Verdünnungsreihen sichergestellt wurde.

3.6.2.4 Motorölanalytik

Mit der gaschromatographischen Messmethode eine Bestimmung des Kraftstoffanteils im Motoröl erfolgen sowie eine Veränderungen in der Zusammensetzung des Motoröls festgestellt werden. Für die Messungen stand ein Gaschromatograph Star 3600 CX der Firma Varian zur Verfügung, der mit dem Flammenionisationsdetektor Varian FID und dem Autosampler 8200 CX ausgestattet ist. Als Gase wurden Helium (Trägergas, Fa. Linde, Reinheit 5.0), Stickstoff (Make-up-Gas, Fa. Linde, Reinheit 5.0), Wasserstoff (Fa. Messer-Griesheim, Reinheit 5.0) bzw. synthetische Luft (Fa. Linde, Reinheit 5.0) genutzt. Die Chromatografieparameter sind im Folgenden zusammengestellt:

Säule:	<i>MXT-2887[®]</i> von RESTEK (2,65µm)
Phase:	Dimethyl-polysiloxan
Innendurchmesser:	0,53 mm
Länge:	10 m
Filmdicke:	5 µm
Injektionsvolumen:	1 µl
Trägergasfluss (50°C):	12,8 ml/Min.
Splitverhältnis:	splitless-Modus
Injektortemperatur:	300°C isotherm
Detektortemperatur:	300°C isotherm
Temperaturgradient:	50 °C (3 Minuten)-15 °C/min-300 °C (5 Minuten)

4 Ergebnisse

Bei dem Aufbau des neuen Motorprüfstands im Institut für Technologie und Biosystemtechnik entstanden im Zeitablauf Verzögerungen, da die ausführende Firma benötigte Unterlagen (Plansätze) und Bauteile (Wellenschutz) nicht wie vorgesehen lieferte. Um trotzdem in der Projektlaufzeit den Dauerlauftest durchführen zu können, wurde die Anpassung der bestehenden Analytik von Euro III auf Euro IV nicht in der Praxis am Euro IV-Motor eingehend überprüft. Hierdurch ergaben sich gerade zu Beginn des Dauertest Probleme mit den geringen Konzentrationen der Schadstoffe im Abgas. Dieses äußerte sich in hohen Standardabweichungen bei den Messungen (PM) bzw. nicht belastbaren Ergebnissen zu Beginn des 500-Stunden-Tests (Aldehyde). Durch eine Vielzahl von Messungen konnten jedoch belastbare Ergebnisse erzielt werden.

4.1 Motorleistung

Ein Abfall oder Anstieg der Motorleistung würde sich in einer Änderung des maximalen Drehmoments bemerkbar machen. Bei dem ESC-Test hat der Motor noch eine Minute Zeit, um das eingestellte Drehmoment zu erreichen. Bei dem ETC-Test sind auch die kurzfristigen Momentänderungen von der Leistung abhängig. So kann das mittlere Drehmoment im ETC-Test als Indikator für die maximale Motorleistung herangezogen werden.

Die mittlere Drehzahl liegt bei 1465 Umdrehungen pro Minute und änderte sich im Verlauf des 500-Stunden-Tests nicht (Abbildung 4-1).

Das mittlere Drehmoment im ETC-Test lag bei 380 Nm. Bei acht ETC-Tests bei ca. 100 Stunden bzw. bei 300 Stunden lag der Wert jedoch unter 350 Nm. Die Ursache für die hohe Abweichung vom vorgegebenen Verlauf konnte nach Beendigung des Laufes nicht geklärt werden. Ein motorisches Problem ist jedoch nicht anzunehmen, da kurz darauf folgende Testläufe die erwarteten Leistungsdaten zeigten. Geringe Abweichungen vom Mittelwert können durch die Datenspeicherung während des Testlaufs verursacht sein. Während der Speicherprozedur, die etwa alle drei Stunden erfolgte, wurden die Daten nicht mehr sekundlich aufgenommen. Bei der Mittelwertbildung verfälschen die fehlenden Werte (ein Fehlwert alle 5 s) den richtigen Mittelwert. Damit sind Abweichungen von $\pm 20 \text{ min}^{-1}$ erklärbar.

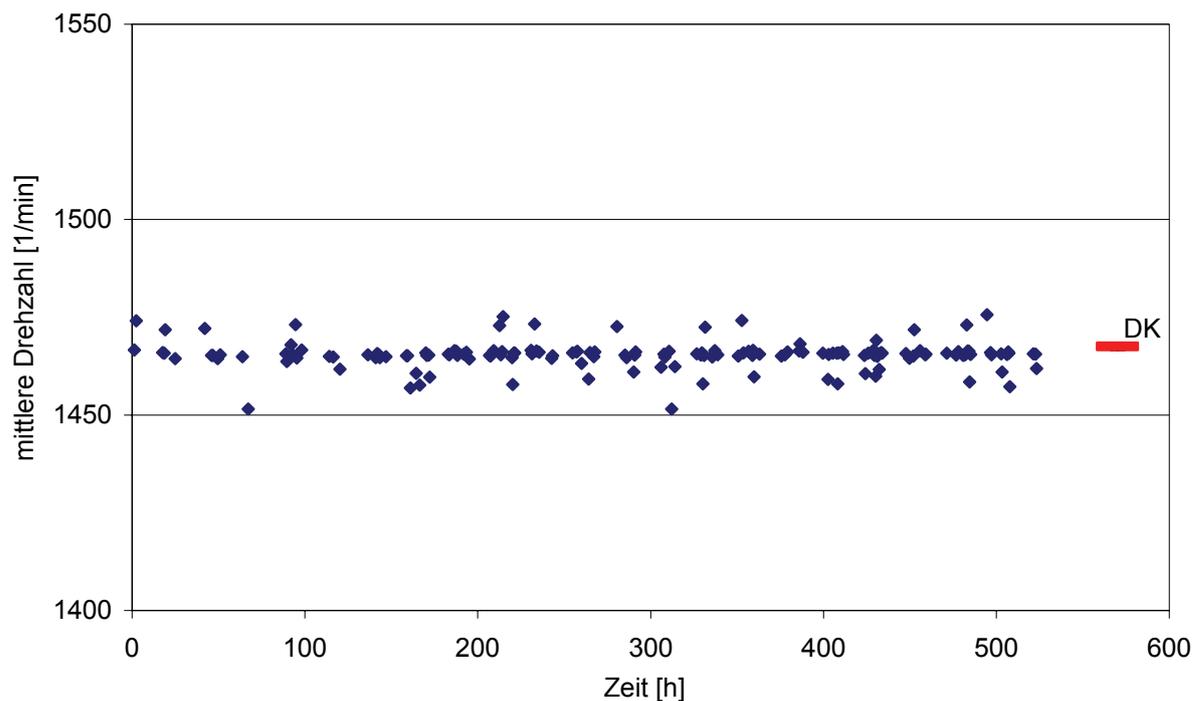


Abbildung 4-1: Mittlere Drehzahl bei ETC-Tests über dem 500-Stunden-Test.

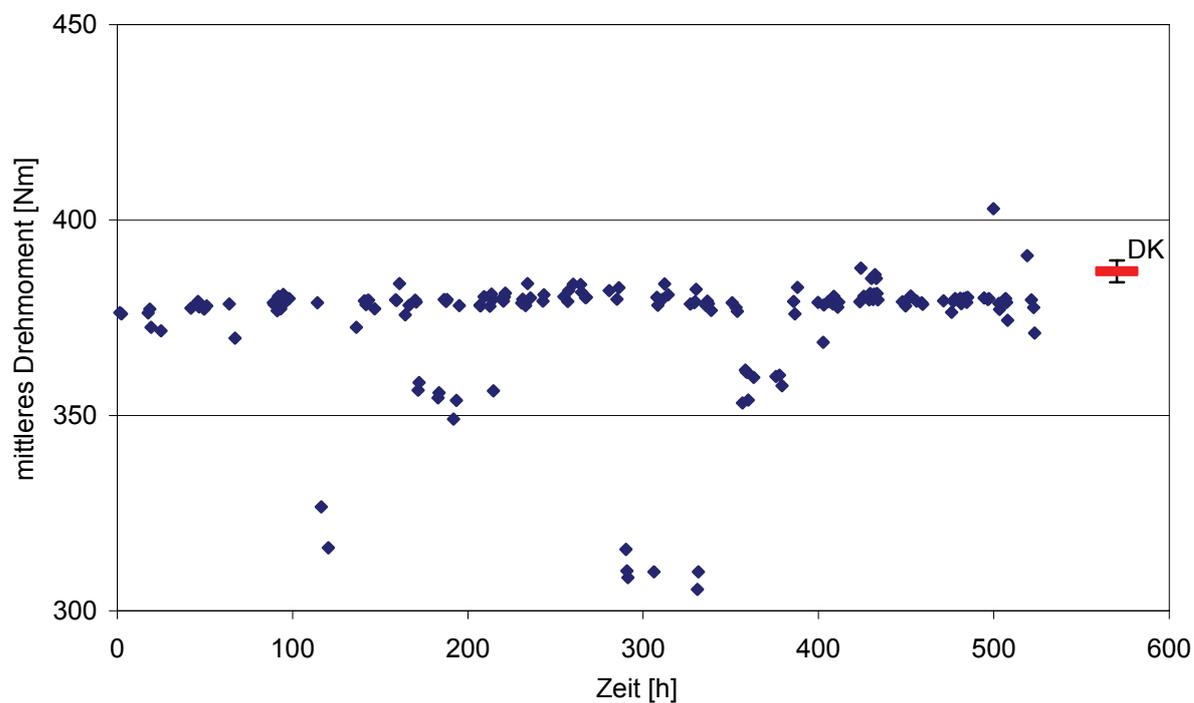


Abbildung 4-2: Mittleres Drehmoment bei ETC-Tests über dem 500-Stunden-Test.

Ein weiteres Indiz für die Motorleistung ist der Kraftstoffverbrauch. Für den ESC-Test blieb er über die 500 Stunden konstant (Abbildung 4-3). Vom Kraftstoffverbrauch konnte nicht auf einen Abfall der Motorleistung geschlossen werden. Somit wird nach Maßgabe der mittleren

Drehmomentverläufe und des konstanten Kraftstoffverbrauchs von einem unveränderten Motorbetrieb während des 500-Stunden-Tests ausgegangen.

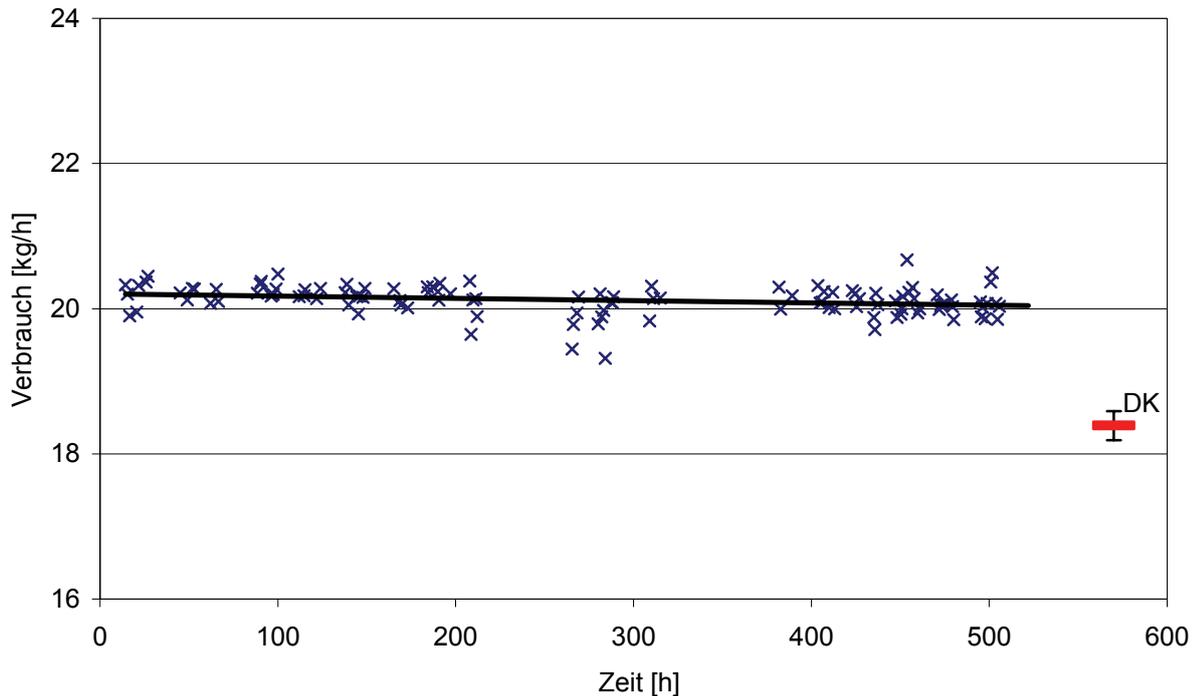


Abbildung 4-3: Verbrauch im ESC-Test über dem 500-Stunden-Test.

4.2 Motoröl

Während des 500-Stunden-Tests wurde der Ölstand laufend kontrolliert. Bei 340 Stunden mussten drei Liter Motoröl nachgefüllt werden. Durch eine Undichtigkeit beim Öldrucksensor war Motoröl ausgetreten. Zudem musste das Öl, das bei den Ölproben entnommen wurde, ersetzt werden.

Die Öltemperatur lag zwischen 70 °C (längere Leerlaufphasen) und 120 °C (längere Vollastphasen) im Verlauf des gesamten Tests. Beim ETC- und ESC-Test variierte die Öltemperatur nur zwischen 80 °C und 110 °C (Abbildung 4-4). Im Verlauf des 500-Stunden-Tests blieb die mittlere Temperatur beim ETC-Test mit knapp unter 100 °C weitgehend konstant (Abbildung 4-5).

Mit GC-FID Technik wurden die Motorölproben, die während des Tests genommen wurden, analysiert. Es konnten dabei zwei Änderungen in der Zusammensetzung festgestellt werden:

- In Abbildung 4-6 und 4-7 zeigen die Chromatogramme einen Peak bei 13,8 min, dessen Fläche proportional zur Menge des RME im Motoröl ist. Mit fortschreitendem Testverlauf wurde demnach RME in das Motoröl eingetragen. Die Menge an RME lag nach 500 Stunden bei etwa 2 Prozent.
- Eine weitere, nicht identifizierte Substanz im Motoröl nahm um ca. $\frac{3}{4}$ seiner Menge ab (Abbildung 4-6 und 4-7 14,2 min). Da es wahrscheinlich ist, dass es sich dabei um ein Additive handelt, wurde das Motoröl nach dieser Versuchsreihe gewechselt.

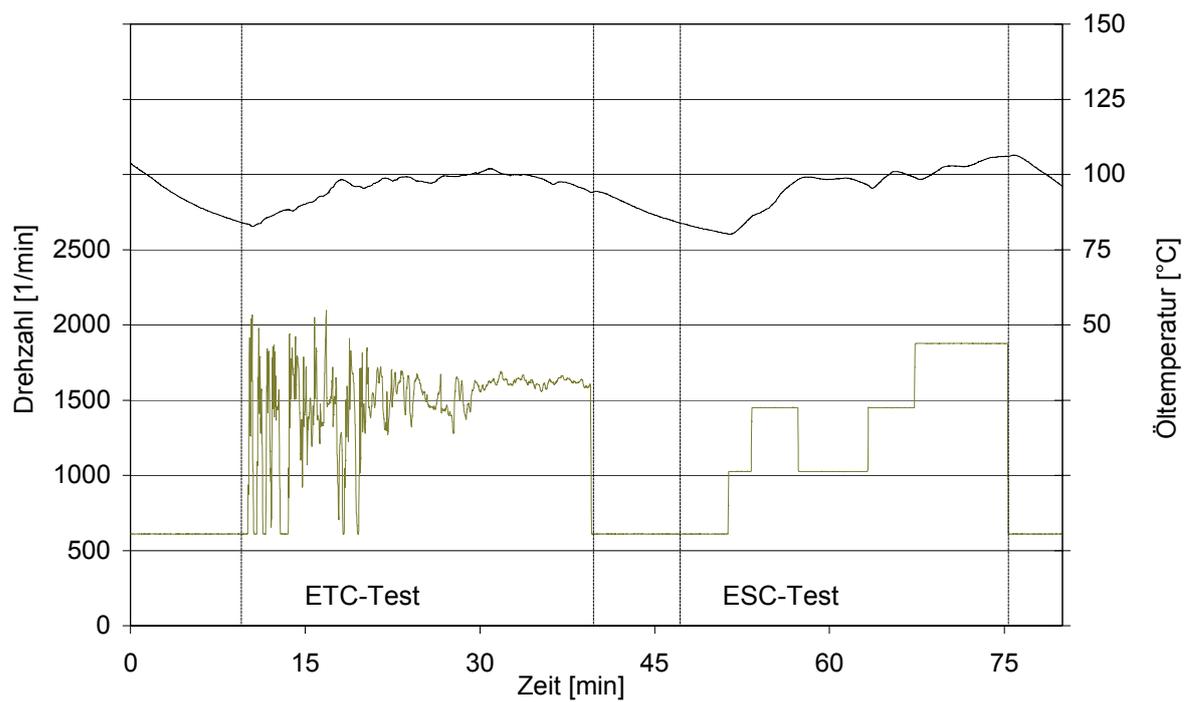


Abbildung 4-4: Typischer Verlauf der Öltemperatur während eines ETC- und ESC-Tests.

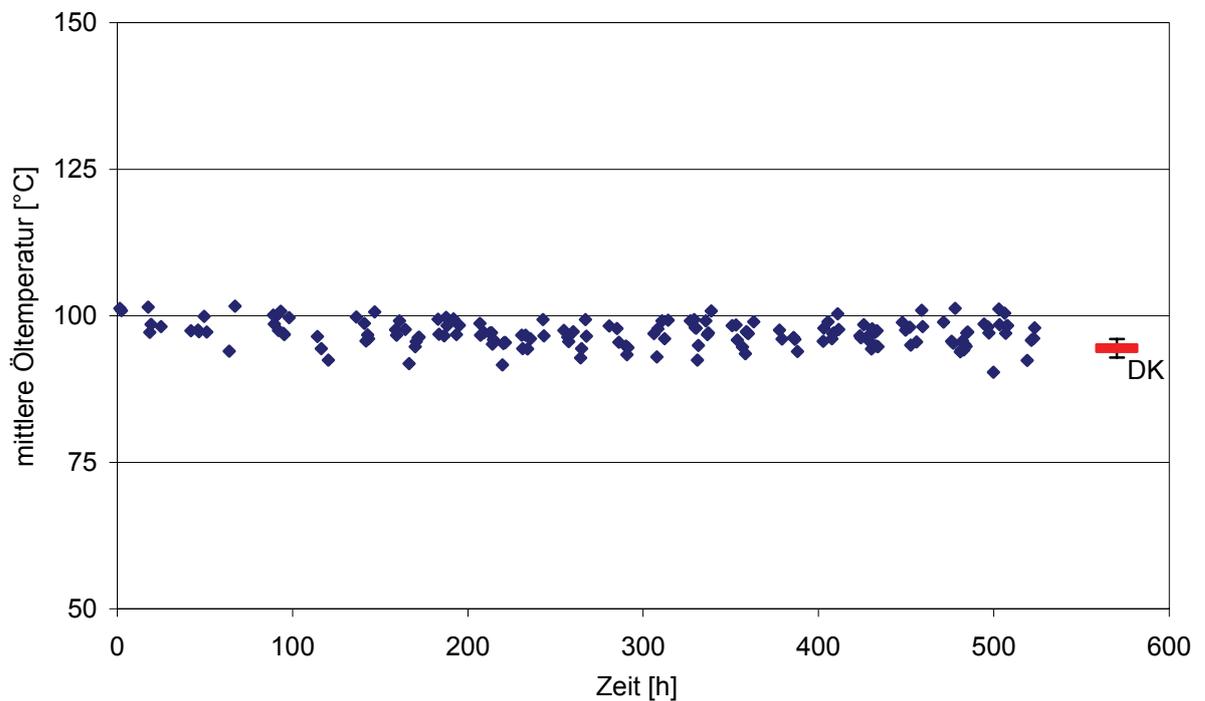


Abbildung 4-5: Verlauf der mittleren Öltemperatur bei ETC-Tests während des 500-Stunden-Tests.

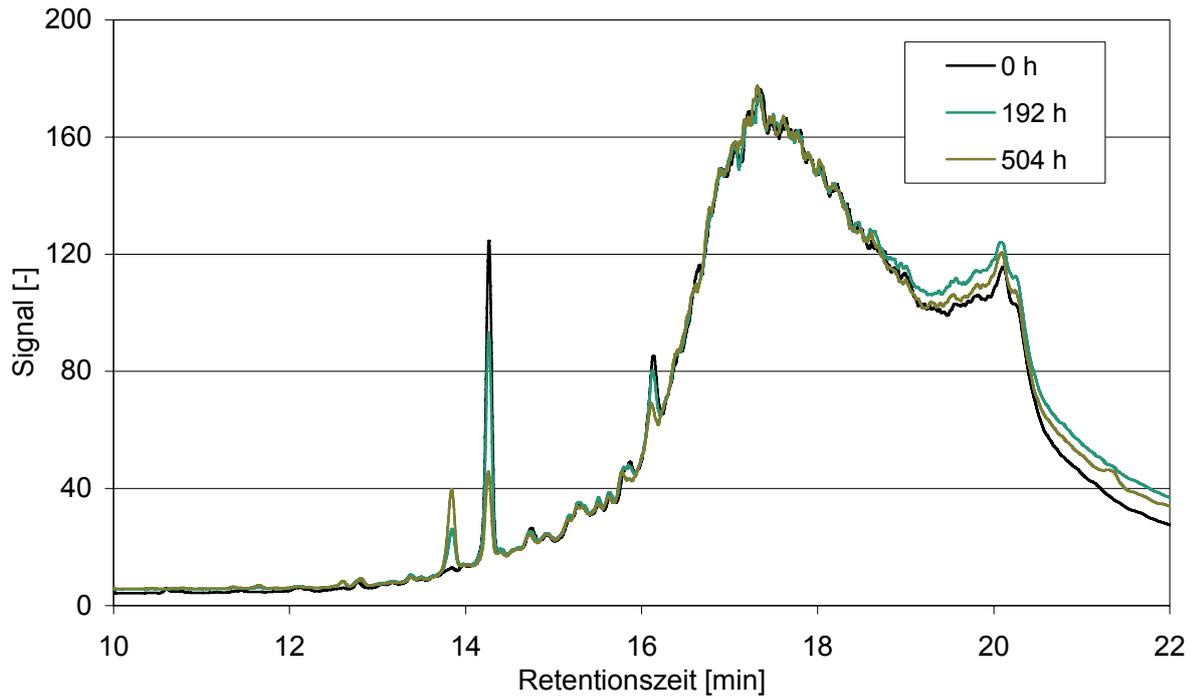


Abbildung 4-6: GC-Chromatogramm des Motoröls bei 0, 192 und 504 Stunden.

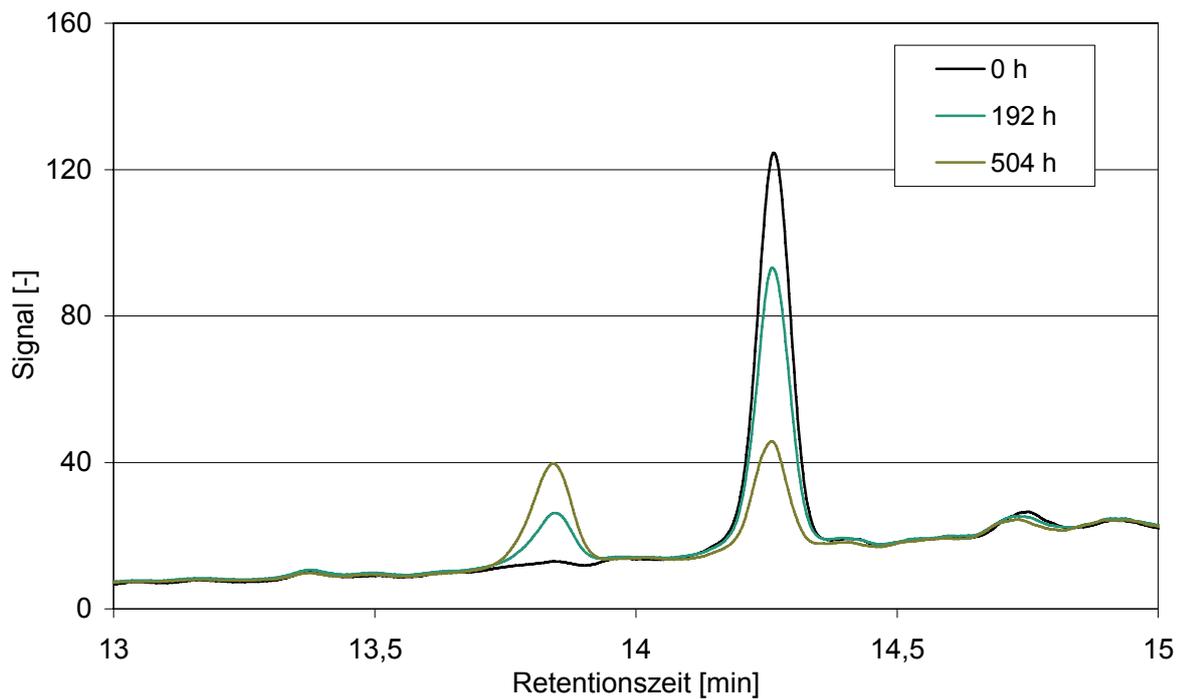


Abbildung 4-7: GC-Chromatogramm des Motoröls bei 0, 192 und 504 Stunden im Retentionszeitbereich von 13 bis 15 Minuten.

4.3 Abgastemperatur

Der PM-Kat[®] benötigt eine ausreichende Abgastemperatur, um seine Wirksamkeit zu erhalten. Im Verlauf des 500-Stunden-Tests schwankte die Temperatur zwischen ca. 200 °C bei Leerlaufphasen und 450 °C bei Volllast. Der typische Verlauf der Abgastemperatur während ETC- und ESC-Test ist in Abbildung 4-8 dargestellt. Um Veränderungen der Abgastemperatur im Verlauf des 500-Stunden-Tests feststellen zu können, wurde die mittlere Temperatur bei den ETC-Tests ermittelt. Sie lag bei etwa bei 340 °C und stieg im Verlauf des Tests tendenziell leicht an (Abbildung 4-9).

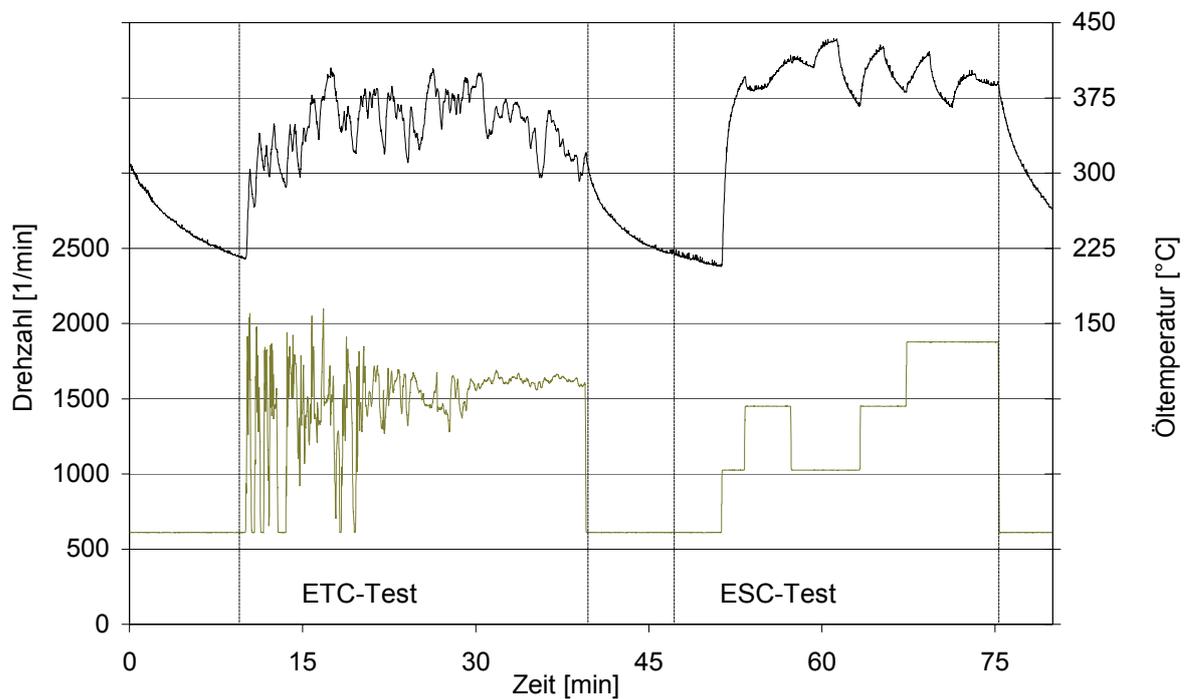


Abbildung 4-8: Exemplarischer Verlauf der Abgastemperatur im Verlauf des ETC- und ESC-Tests mit Leerlaufphasen vor bzw. nach den Tests (Kraftstoff: RME)

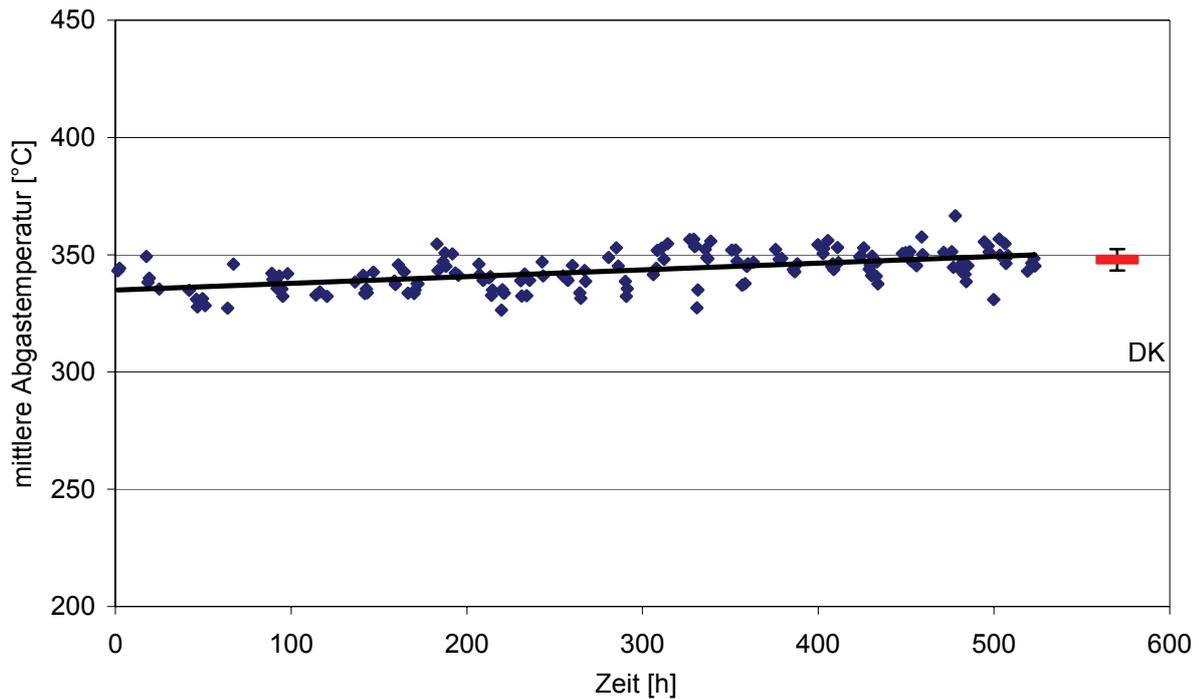


Abbildung 4-9: Mittlere Abgastemperatur bei ETC-Tests während des 500-Stunden-Tests.

4.4 Abgasgegendruck

Der Abgasgegendruck wurde vor dem Partikelfilter gemessen. Er liefert einen Hinweis, ob sich der Filter mit zunehmender Betriebsdauer zusetzt. Abbildung 4-10 zeigt den Verlauf des Abgasgegendrucks im ETC- und ESC-Test. Die Auflösung der Datenaufnahme mit 2 hPa gering, so dass hier nur ein sehr stufiger Verlauf dargestellt werden kann. Der maximale Abgasgegendruck überschreitet 75 hPa nicht. Abbildung 4-11 zeigt den Abgasgegendruck in der jeweils letzten Minute der Betriebspunkte 10 und 13. Im Verlauf des 500-Stunden-Tests steigt der Abgasgegendruck in diesen Betriebspunkten um ca. 10 %. Auch im Dieselbetrieb nach dem 500-Stunden-Test war ein weiterer Anstieg zu sehen. Die deutliche Erhöhung des Abgasgegendrucks in Betriebspunkt 10 ist eine Folge der höheren Leistung beim Dieselkraftstoffbetrieb bei Vollast.

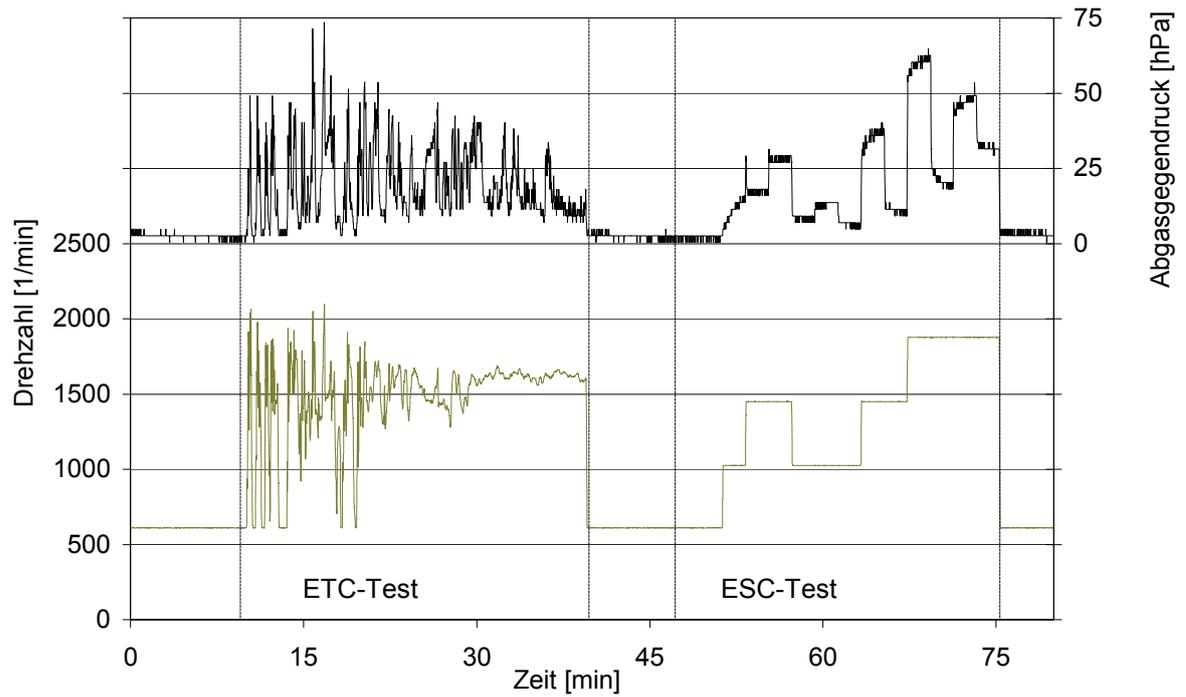


Abbildung 4-10: Exemplarischer Verlauf des Abgasgegendrucks im Verlauf des ETC- und ESC-Tests mit Leerlaufphasen vor bzw. nach den Tests (Kraftstoff: RME).

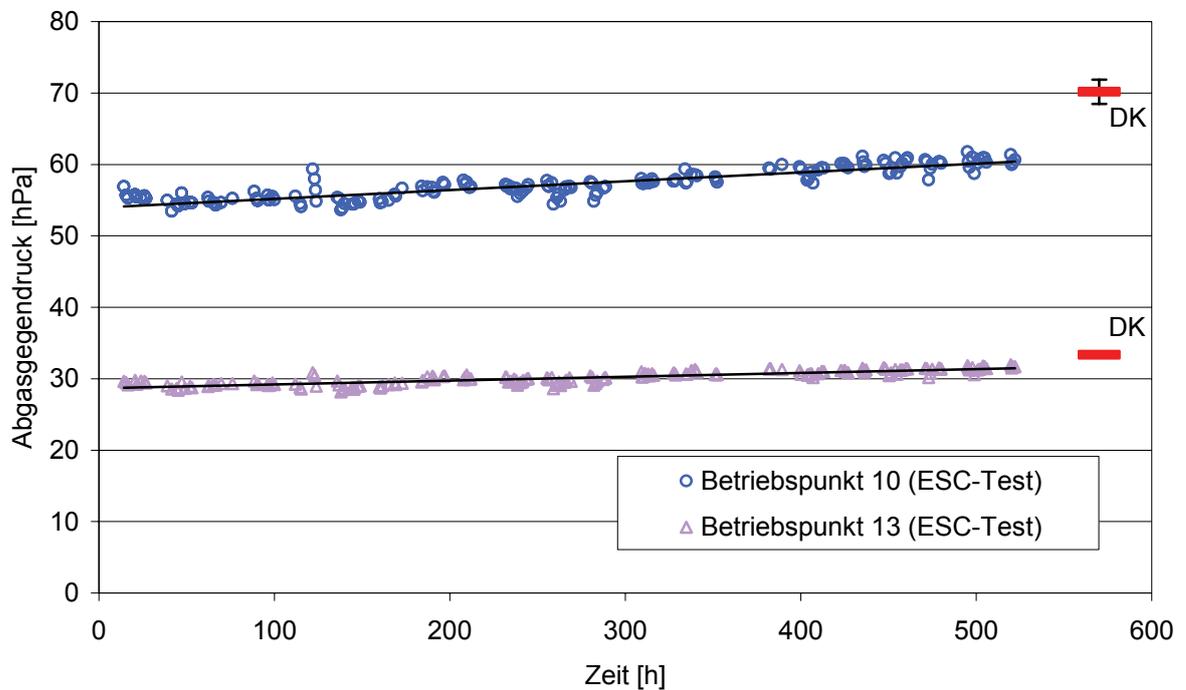


Abbildung 4-11: Mittlerer Abgasgegendruck in der letzten Minute der Betriebspunkte 10 und 13 des ESC-Tests über dem 500-Stunden-Test.

4.5 Kohlenmonoxidemissionen

Abbildung 4-12 zeigt beispielhaft die Kohlenmonoxidkonzentration des Abgases im Verlauf des ETC- und ESC-Tests. Die Abbildungen 4-13 und 4-15 geben diese Konzentrationen nochmals einzeln für den ESC- bzw. ETC-Test mit Dieselkraftstoff wieder.

Beim ESC-Test ergeben sich nur im Leerlauf bei niedrigen Abgastemperaturen messbare CO-Konzentrationen zur Berechnung der Emissionen. Die relativ hohen CO-Konzentrationen nach dem Drehmoment- und Drehzahlanstieg bei vier Minuten gehen nicht in die Berechnung der Emissionen mit ein und können vom Messgerät in ihrer absoluten Höhe nur sehr ungenau bestimmt werden. Es ergeben sich sehr geringe CO-Emissionen, die etwa hundertfach unter dem Grenzwert von Euro IV liegen (Abbildung 4.14). Die Emissionen ändern sich im Lauf des 500-Stunden-Test nicht signifikant. Bei Dieselkraftstoff liegt die Emission mit 0,011 ebenfalls in der Größenordnung von RME.

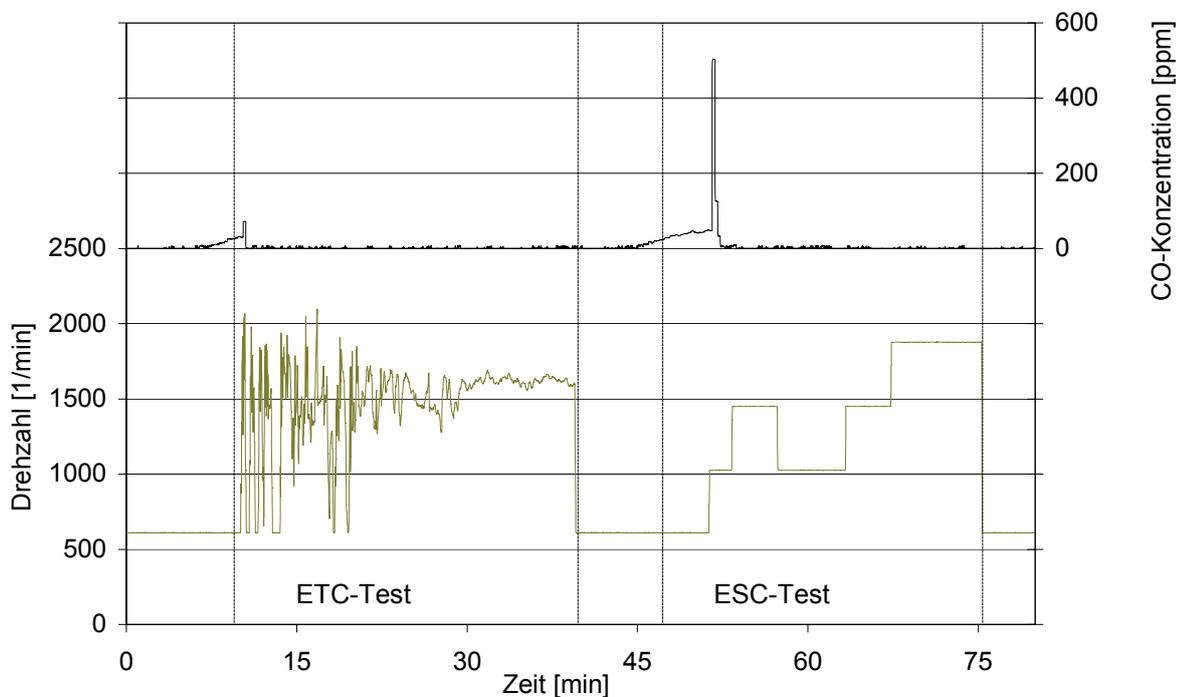


Abbildung 4-12: Exemplarischer Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration im Verlauf des ETC- und ESC-Tests mit Leerlaufphasen zwischen den Tests (Kraftstoff: RME).

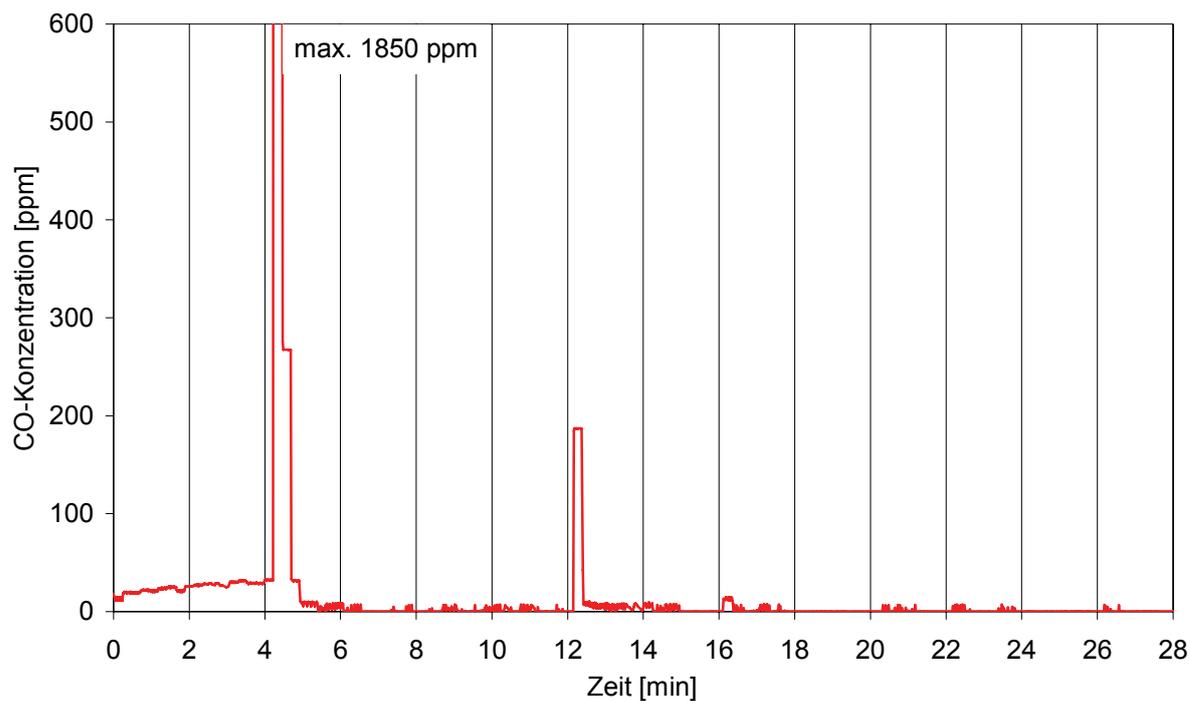


Abbildung 4-13: Exemplarischer Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration im Verlauf des ESC-Tests (Kraftstoff: DK).

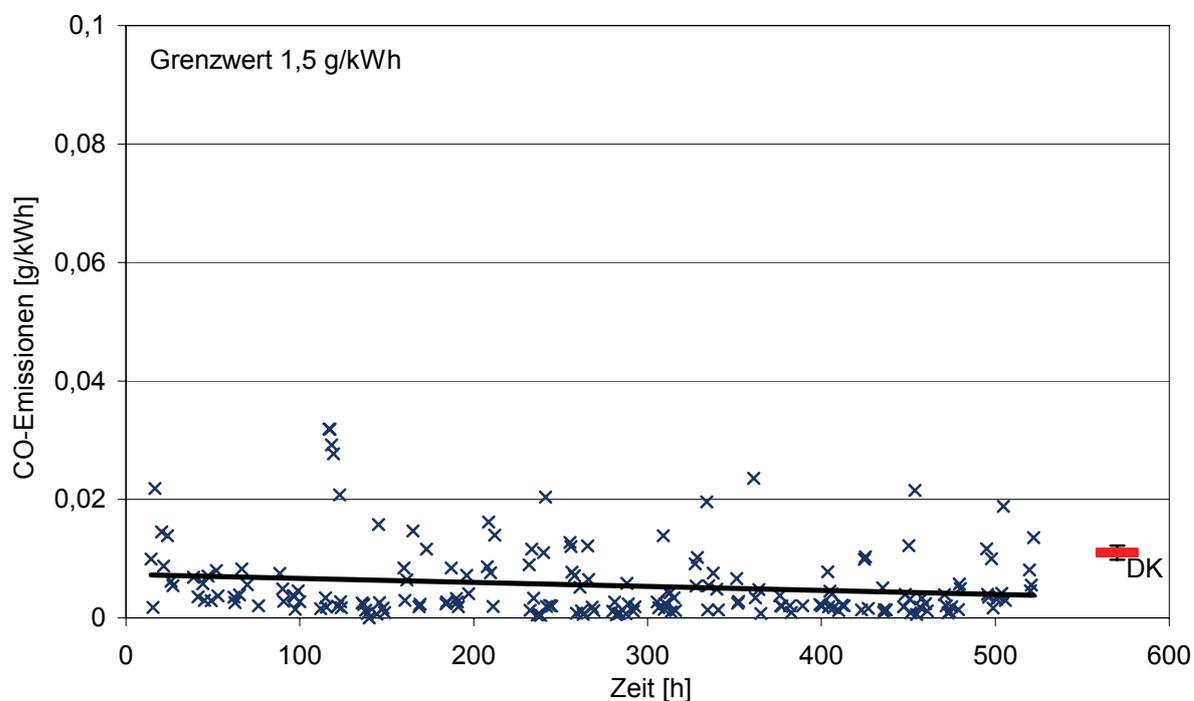


Abbildung 4-14: Spezifische CO-Emissionsmassenströme im ESC-Test während des 500-Stunden-Tests.

Im ETC-Test treten bei allen Kraftstoffen nur sehr geringe CO-Konzentrationen auf. Mit maximal 20 ppm liegen sie am unteren Ende des Messbereichs des CO-Analysators. Während des 500-Stunden-Tests ändert sich diese geringe Konzentration nicht (Abbildung 4-16).

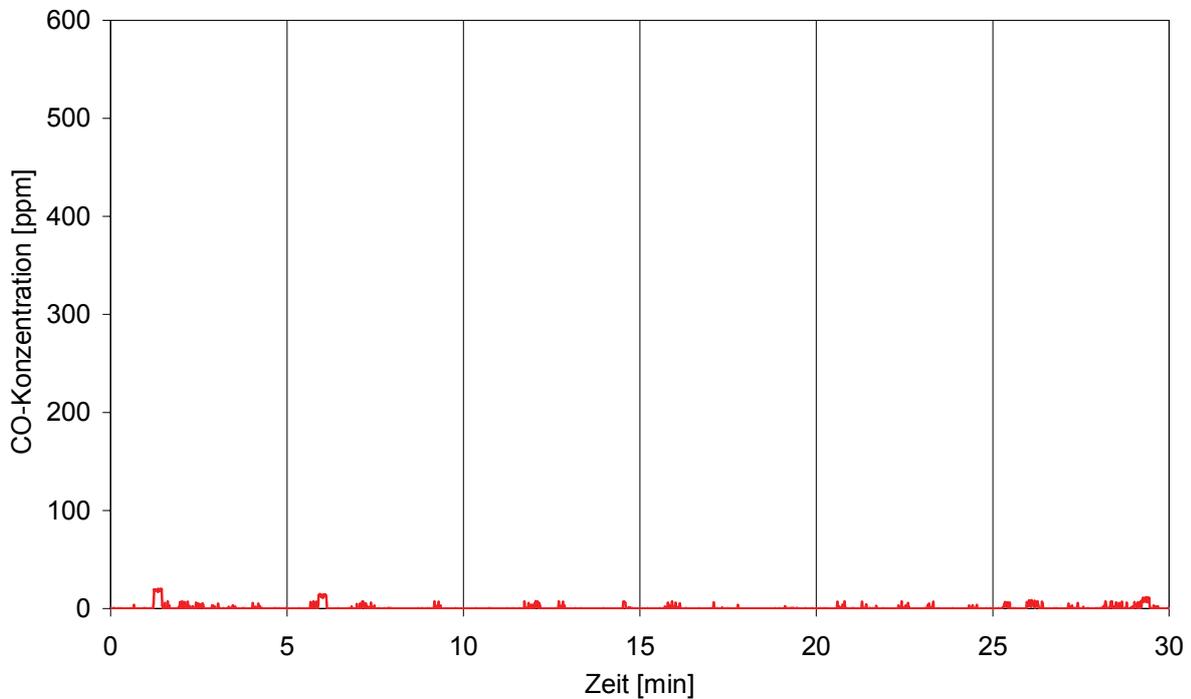


Abbildung 4-15: Exemplarischer Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas im Verlauf des ETC-Tests (Kraftstoff: DK).

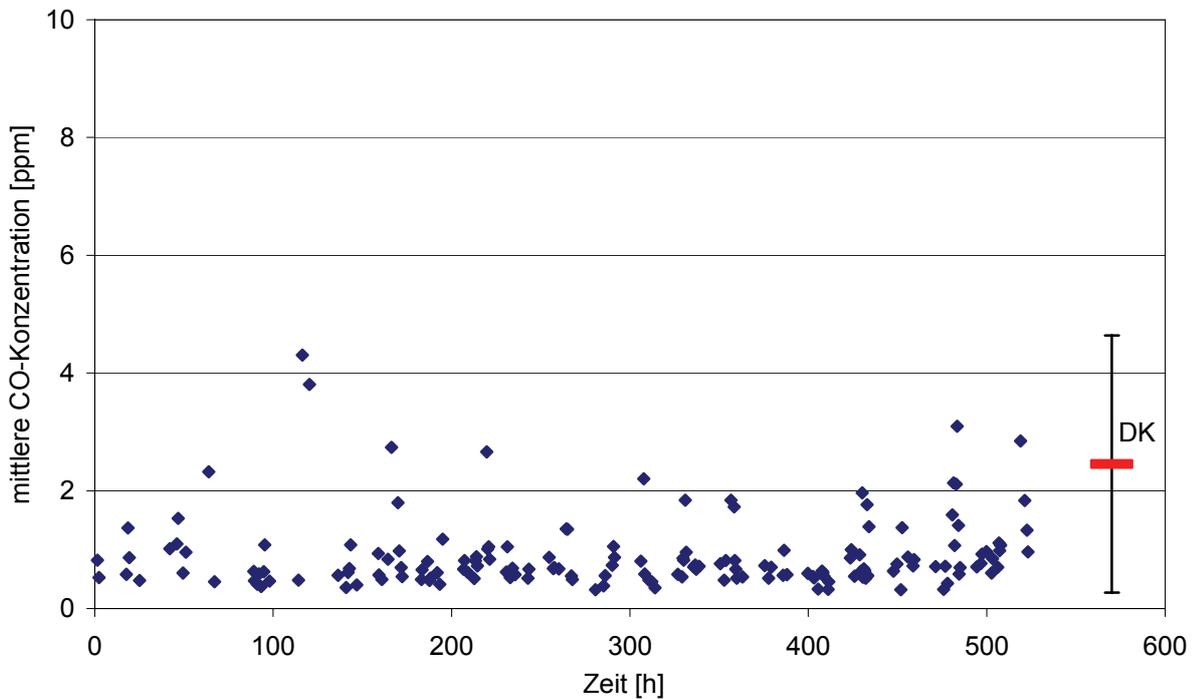


Abbildung 4-16: Mittlere CO-Konzentration bei ETC-Tests während des 500-Stunden-Tests.

4.6 Kohlenwasserstoffemissionen

Ebenso wie für CO wird auch bei den HC-Emissionen die Anforderung der EURO IV-Grenzwerte (0,46 g/kWh) erfüllt.

Beim ESC-Test ist auch hier ein starker Anstieg der Konzentration beim Wechsel vom Leerlauf auf maximales Drehmoment nach vier Minuten zu beobachten (Abbildungen 4-17 und 4-18). Im Vergleich zwischen RME und Dieselkraftstoff treten beim RME-Betrieb jedoch etwas geringere Emissionen auf. Der Emissionswert von Dieselkraftstoff liegt bei 0,005 g/kWh.

Im Verlauf des 500-Stunden-Tests nimmt die Emission etwas ab. Diese leichte Tendenz ist nicht signifikant (Abbildung 4-19).

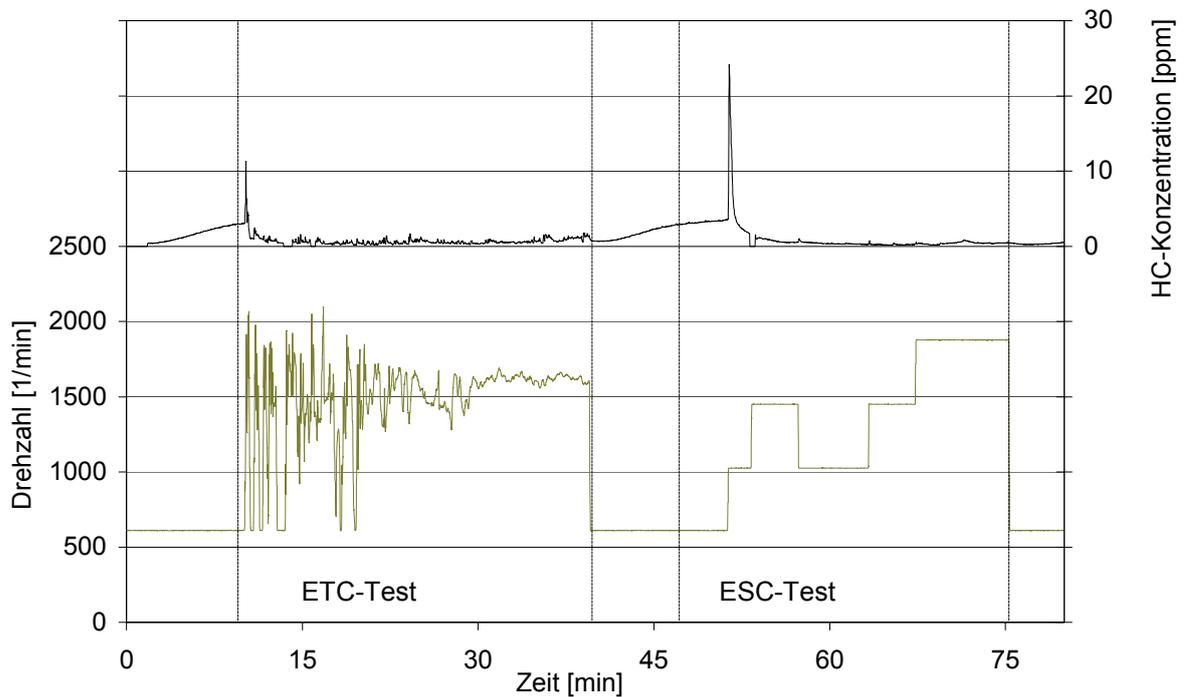


Abbildung 4-17: Exemplarischer Verlauf der Kohlenwasserstoffkonzentration im Verlauf des ETC- und ESC-Tests mit Leerlaufphasen zwischen den Tests (Kraftstoff: RME).

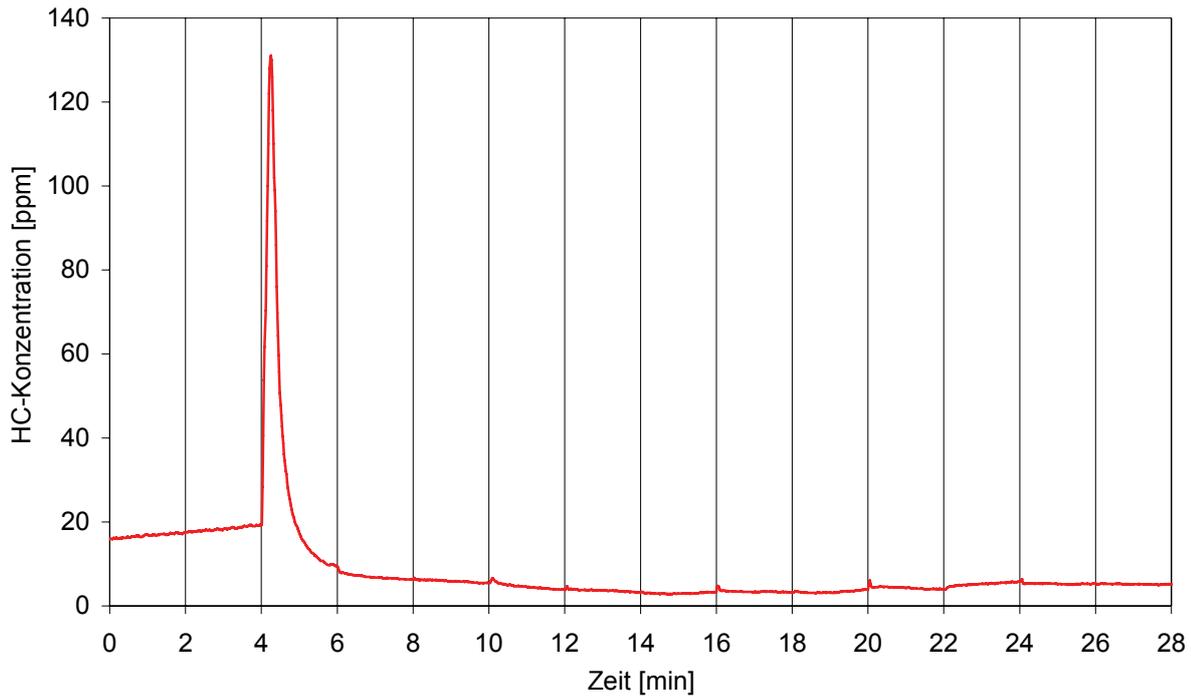


Abbildung 4-18: Exemplarischer Verlauf der Kohlenwasserstoffkonzentration im Verlauf des ESC-Tests (Kraftstoff: DK).

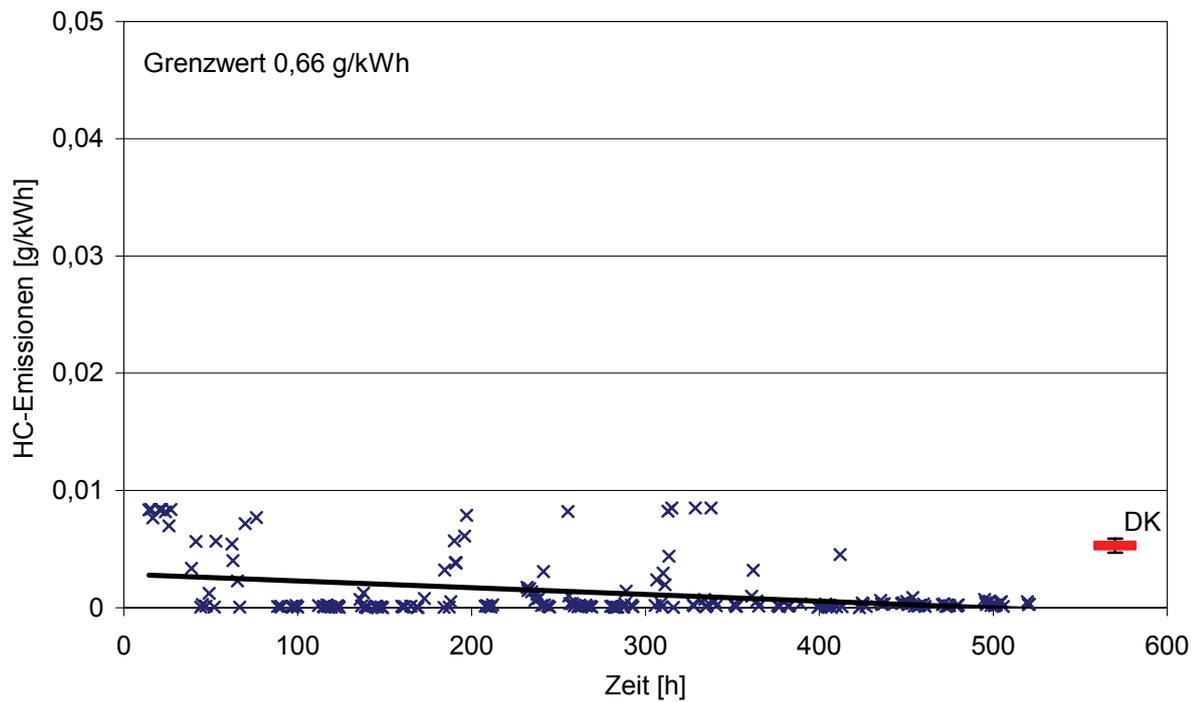


Abbildung 4-19: Spezifische CO-Emissionsmassenströme bei ESC-Tests während des 500-Stunden-Tests

Im Verlauf des ETC-Test zeigt sich kaum eine Änderung der Kohlenwasserstoffkonzentration (Abbildungen 4-17 und 4-20). Bei Dieselmotoren ist die Konzentration jedoch höher. Im Verlauf des 500-Stunden-Test ergeben sich nur vereinzelt Abweichungen vom Mittelwert

(Abbildung 4-21), wobei die Streuung der Werte ab Stunde 280 abnimmt. Dies ist durch den Einsatz eines besseren Brenngases im HC-Analysator (FID) zu erklären.

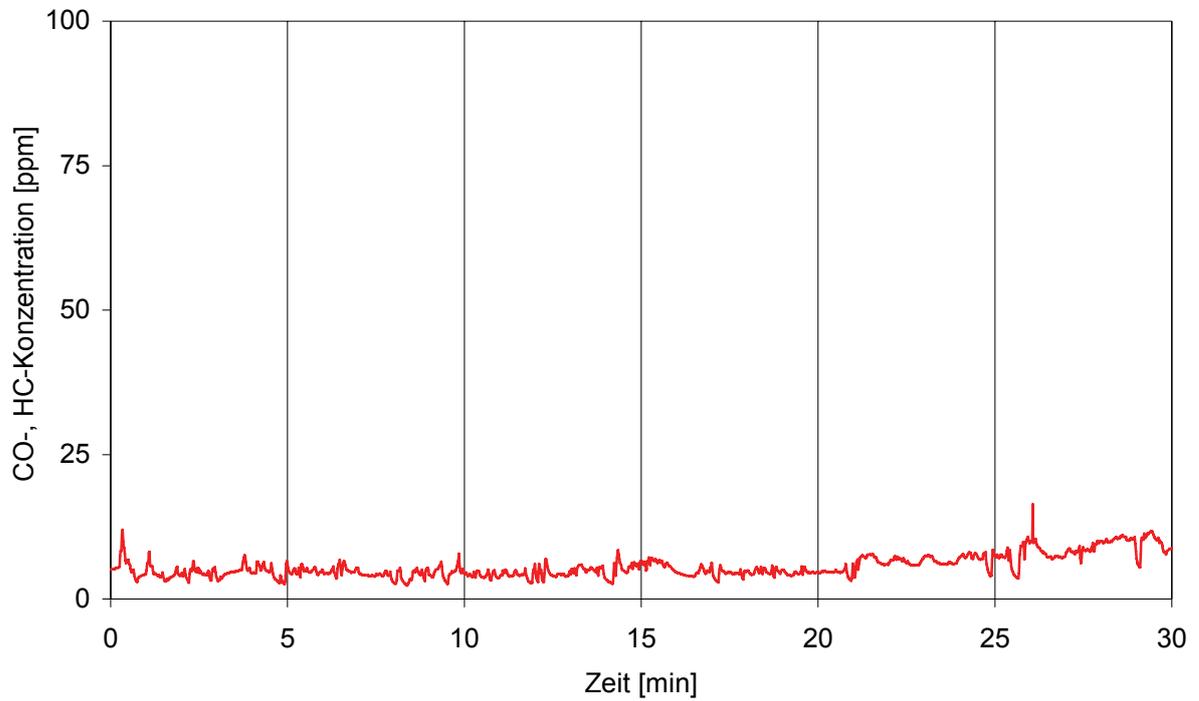


Abbildung 4-20: Exemplarischer Verlauf der Kohlenwasserstoffkonzentration während eines ETC-Tests (Kraftstoff: DK).

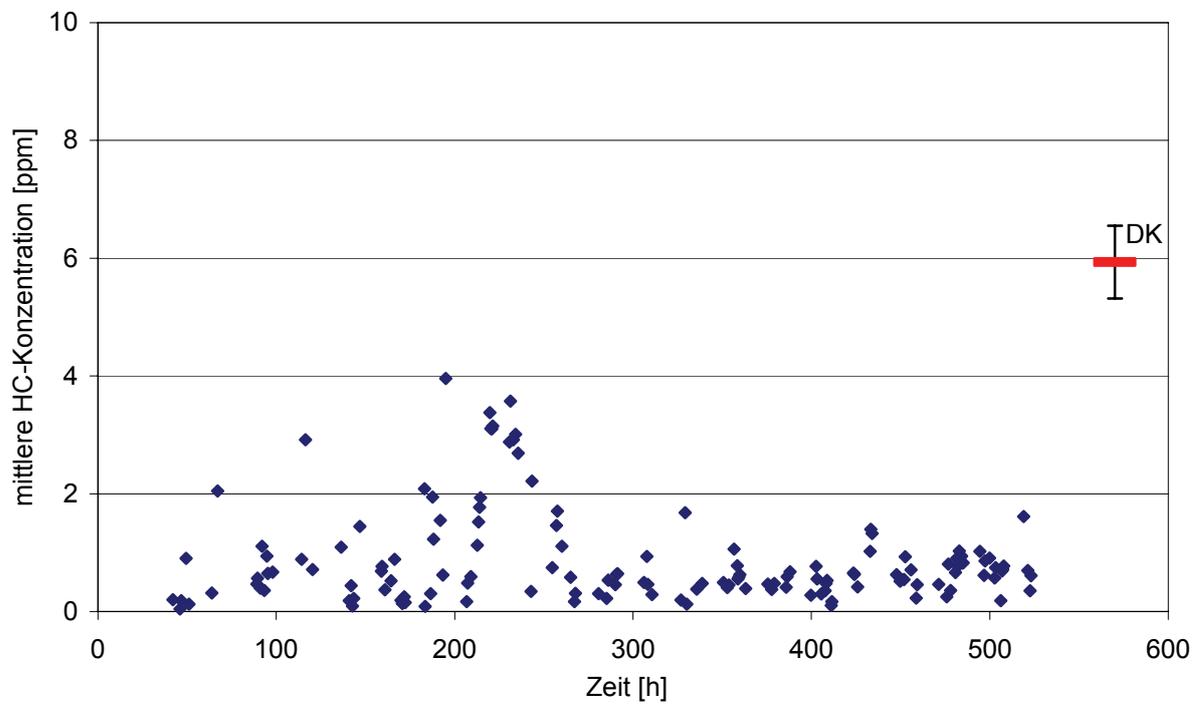


Abbildung 4-21: Mittlere HC-Konzentration bei ETC-Tests während des 500-Stunden-Tests.

4.7 Stickoxidemissionen

Abbildung 4-22 zeigt den Verlauf der Stickoxidkonzentration im Abgas während des ETC- und ESC-Tests. Im Leerlauf entstehen nur geringe NO_x -Konzentrationen, da hier die notwendig hohe Verbrennungstemperatur für die Entstehung von thermischen NO nicht erreicht wird. Zudem ist erkennbar, dass im Leerlauf bei kaltem PM-Kat[®] die Stickoxide zu über 95 % als NO emittiert werden. Mit steigender Katalysatortemperatur nimmt der Anteil von NO_2 zu und macht bis zu 1/3 der Emissionen aus. Nach Beendigung des Testlaufs nach 28 Minuten erkennt man, dass im Leerlauf mit warmem PM-Kat[®] sich der NO_2 -Anteil auf über die Hälfte erhöht (Abbildung 4-23).

Im ESC-Test liegen die ermittelten Emissionsmassenströme der Stickoxidemissionen bei RME knapp über dem vorgeschriebenen Grenzwert (Euro IV) von 3,5 g/kWh. Mit Dieselkraftstoff wird dieser Grenzwert nicht erreicht. Dort liegt der gemessene Wert bei 3,07 g/kWh.

Im Verlauf des 500-Stunden-Tests ist das Messgerät teilweise ausgefallen. Es wurde während der Messung ein Wert angezeigt, der jedoch nicht aufgezeichnet wurde. Daher wurde der Fehler nicht sofort entdeckt. Somit sind zwischen 30 und 200 Stunden bzw. 455 und 495 Stunden keine Werte vorhanden. Im Verlauf des 500-Stunden-Tests ist eine leichte Erhöhung des Emissionsmassenstroms festzustellen (Abbildung 4-24).

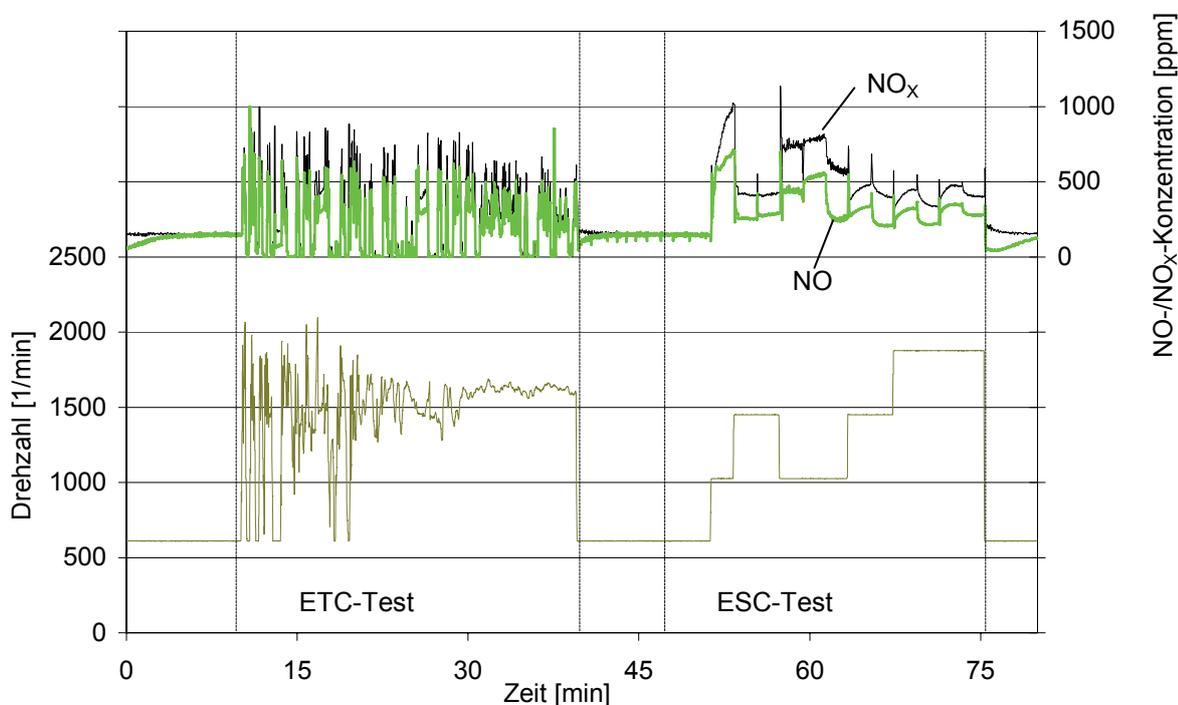


Abbildung 4-22: Exemplarischer Verlauf der Stickoxidkonzentration im Verlauf des ETC- und ESC-Tests mit Leerlaufphasen zwischen den Tests (Kraftstoff: RME).

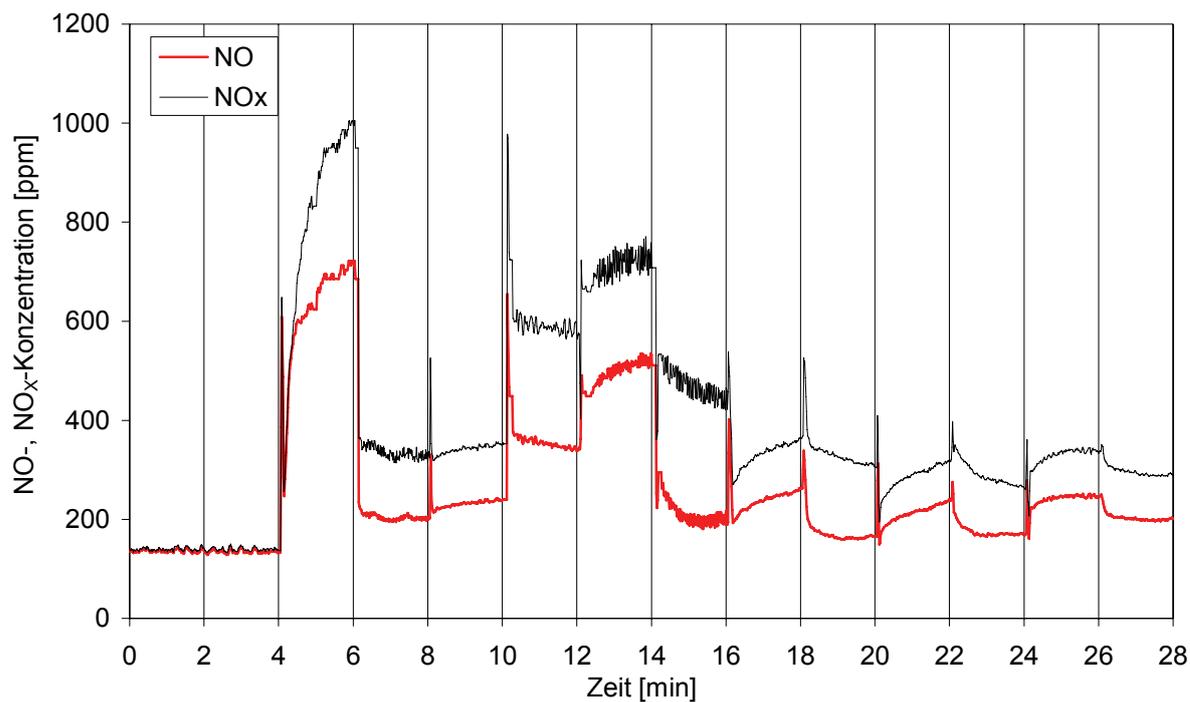


Abbildung 4-23: Exemplarischer Verlauf der Stickoxidkonzentration während eines ESC-Tests (Kraftstoff: DK).

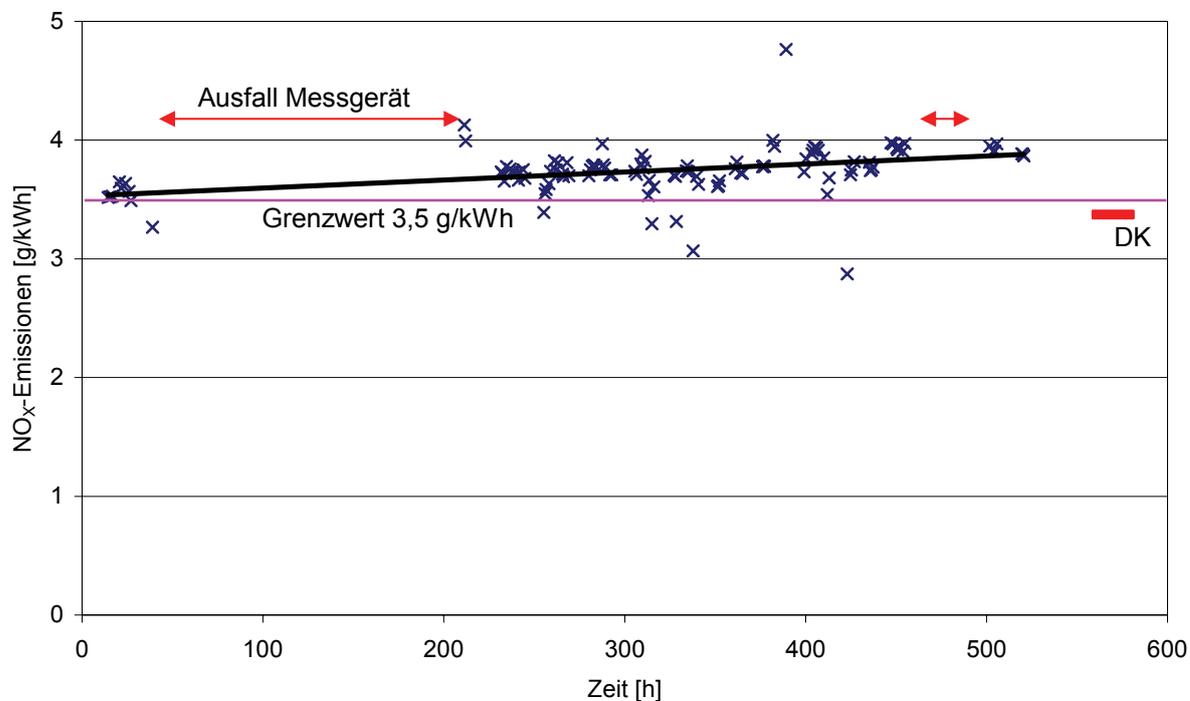


Abbildung 4-24: Spezifische Stickoxidemissionen bei ESC-Tests während des 500-Stunden-Tests.

Im ETC-Test wurden die Konzentration der Stickoxide im Abgas gemessen (Abbildungen 4-22 und 4-25). Dabei variierte die Konzentration um mehr als zwei Zehnerpotenzen. Das verwendete Messgerät schaltete daher während des Laufes mehrmals zwischen verschiedenen Messbereichen um. Dies hatte zur Folge, dass danach jeweils einige Sekunden kein exakter Messwert geliefert wurde. Daher wurde zum Vergleich der Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Emissionen der Bereich zwischen 22 und 24 Minuten ausgewählt, der keine Schaltvorgänge aufweist.

Hier zeigt sich ein ähnlicher Trend wie beim ESC-Test. Die mittlere NO_x -Konzentration ist am Anfang etwas niedriger; ab 210 Stunden bleibt sie jedoch mit etwa 410 ppm relativ konstant. Bei 300 Stunden fallen mehrere Werte deutlich niedriger aus. Dies sind zum Teil ETC-Tests, die auch ein geringeres mittleres Drehmoment aufweisen oder bei denen Daten bei Aufzeichnung fehlen. Jedoch konnte nicht bei allen ETC-Tests mit niedrigeren Konzentrationen die Ursache geklärt werden. Klimatischen Änderungen können als Ursache ausgeschlossen werden. (Abbildung 4-26)

Dieselmotorkraftstoff erzeugt mit 340 ppm etwa 15% weniger NO_x -Emissionen.

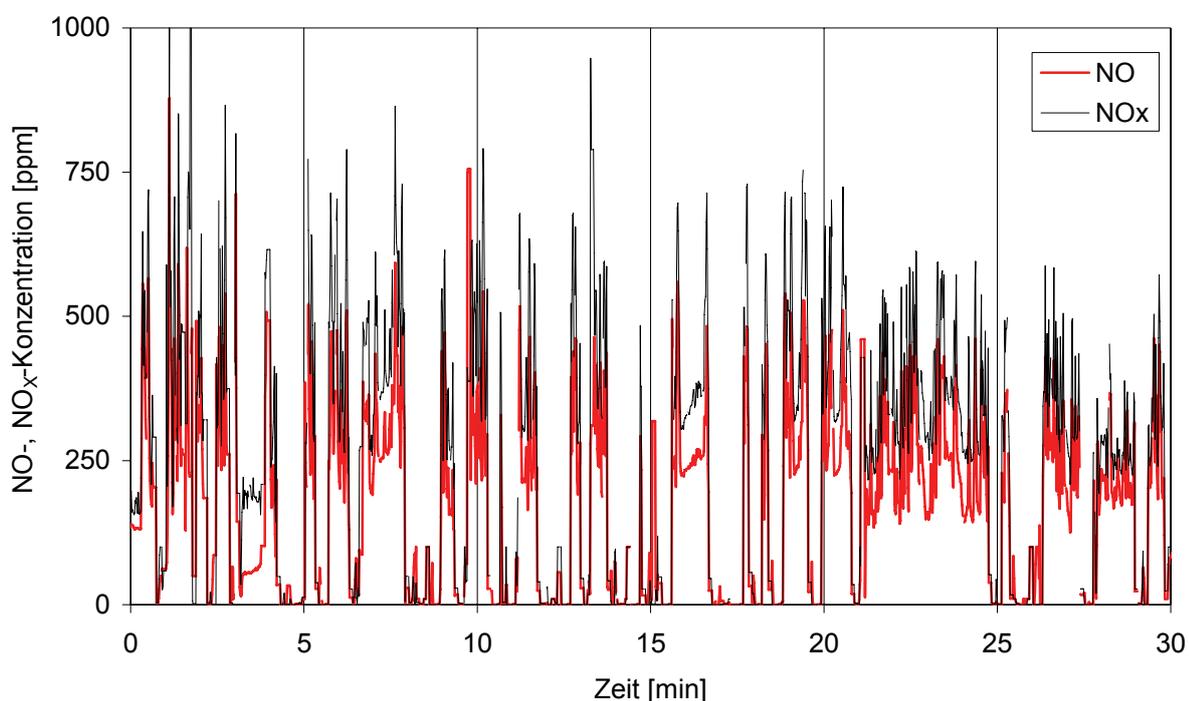


Abbildung 4-25: Exemplarischer Verlauf der Stickoxidkonzentration im Abgas im Verlauf des ETC-Tests (Kraftstoff: DK)

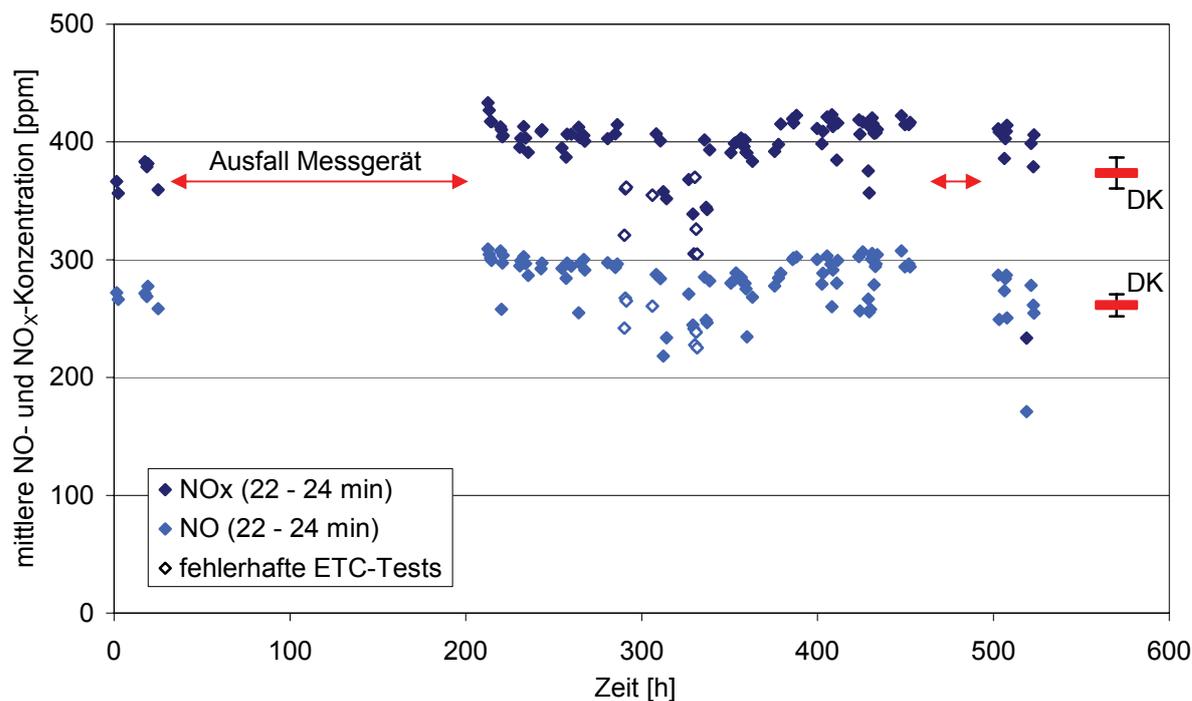


Abbildung 4-26: Mittlere Konzentration von NO und NO_x im Zeitfenster von 22 bis 24 Minuten bei ETC-Tests während des 500-Stunden-Tests.

4.8 Partikelmasseemissionen

Die Partikel wurden im Verlauf des ESC-Tests aus dem verdünnten Abgas auf einem Filter gesammelt. Der Verdünnungstunnel wurde nach den europäischen Richtlinien ECE-R 49 (1992) und EWG 88/77 (1992) ausgelegt. Bei den relativ geringen Emissionen von Euro IV zeigte sich eine unzureichende Verdünnungsluftaufbereitung. So können bis zu 20 % bzw. 0,004 g/kWh der Partikelmasse aus der Umgebungsluft herrühren. Es war jedoch eine Erhöhung des Emissionsmassenstroms im Laufe des 500-Stunden-Tests festzustellen (Abbildung 4-26). Insgesamt ist die Höhe in etwa am bzw. etwas über dem Grenzwert von 0,02 g/kWh. Beim Dieselkraftstoff wurden ebenfalls Emissionsmassenströme gemessen, die über dem gesetzlichen Grenzwert liegen (Abbildung 4-27).

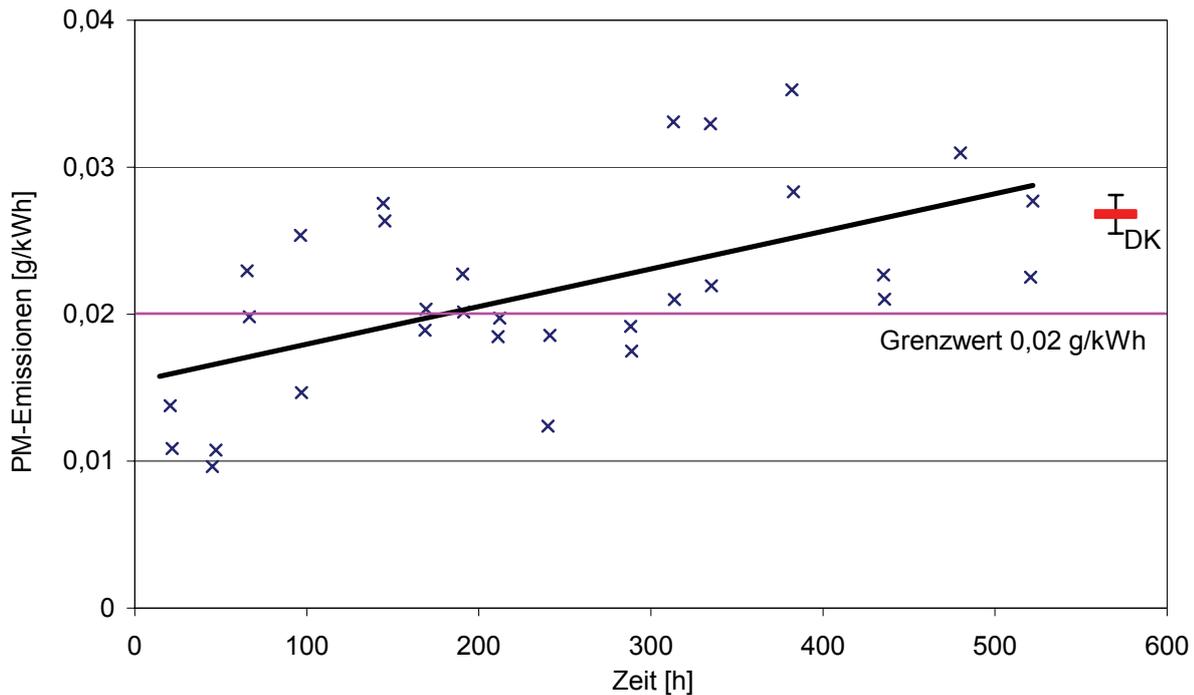


Abbildung 4-27: Spezifische PM-Emissionsmassenströme bei ESC-Tests während des 500-Stunden-Tests

4.9 Partikelanzahlverteilung

Die Messungen der Partikelanzahlverteilung erfolgten aus dem verdünnten Abgas mit einem ELPI sowie mit einem SMPS-System.

Die Partikelanzahlverteilung wurde sowohl im ESC- als auch im ETC-Test untersucht. Für den ETC-Test waren lediglich Messungen mit dem ELPI möglich, das eine sekundliche Datenaufnahme ermöglicht. Im ESC-Test wurden sowohl Messungen mit dem ELPI als auch mit dem SMPS durchgeführt.

4.9.1.1 Ergebnisse der ELPI-Messungen (ESC-Test)

Die Verteilung der Partikelgrößen zeigt Abbildung 4-28. Der Fehlerbalken gibt die Standardabweichung aus jeweils drei Messungen an. Das Verteilungsmuster bleibt über die 500 Stunden konstant. Der absolute Wert steigt jedoch tendenziell an. Die Gesamtpartikelanzahl nimmt auch über die 500 Stunden zu. Es ist jedoch bei 125 Stunden und 250 Stunden jeweils ein Sprung zu erkennen, bei dem ein zwischenzeitlicher Anstieg der Emissionen wieder auf den Anfangswert zurück geht (Abbildung 4-29). Die Gesamtpartikelanzahl bei DK-Betrieb ist etwa um den Faktor 2 höher als im RME-Betrieb.

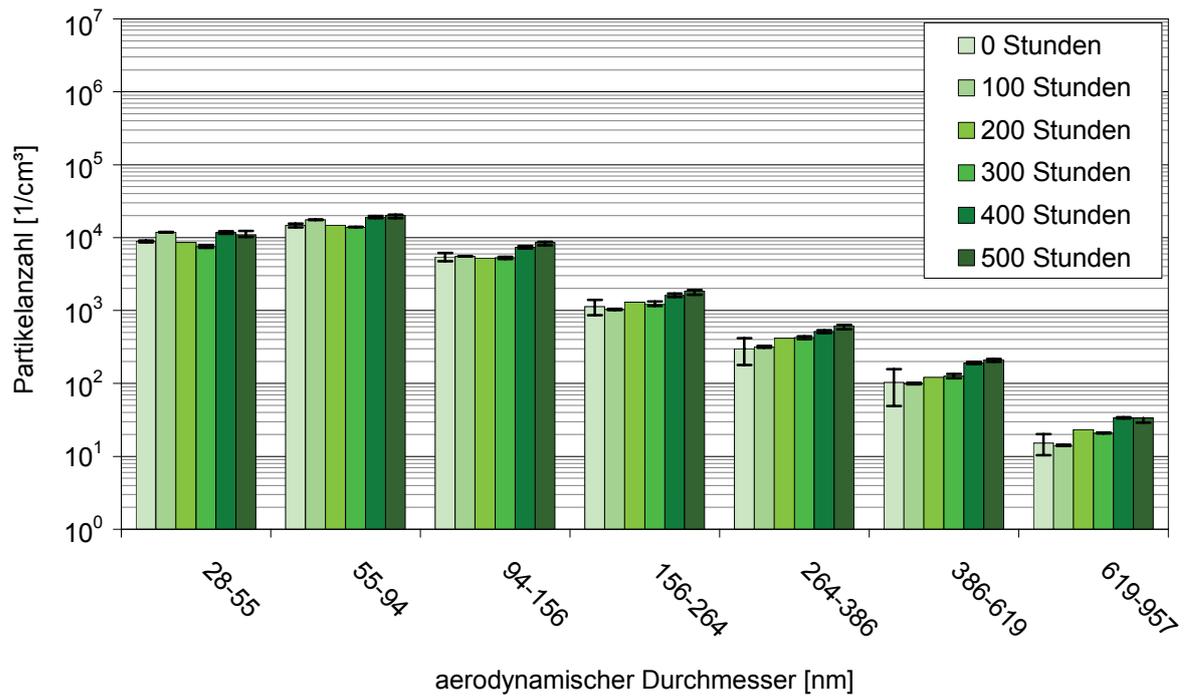


Abbildung: 4-28: Verlauf für die Partikelanzahlverteilung (ELPI) bei ESC-Tests während des 500-Stunden-Tests.

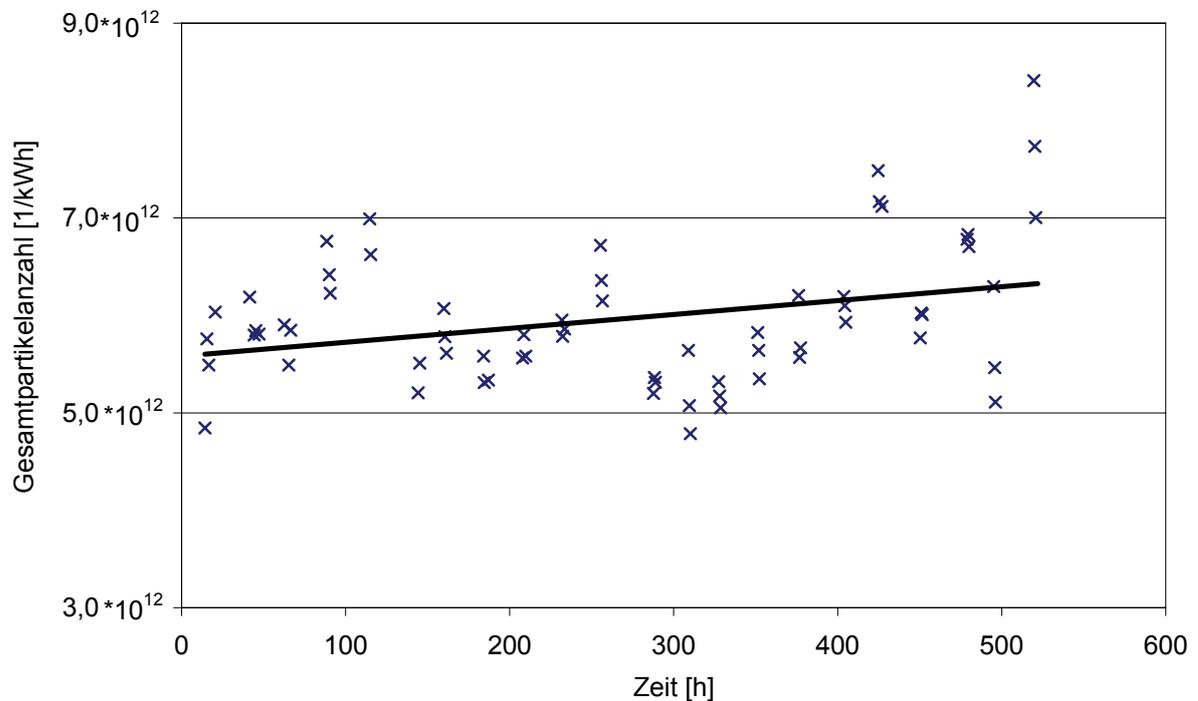


Abbildung: 4-29: Gesamtpartikelanzahl (ELPI) bei ESC-Tests während des 500-Stunden-Tests.

4.9.1.2 Ergebnisse der ELPI-Messungen (ETC-Test)

Im ETC-Test wurden mit dem ELPI ähnliche Tendenzen erhalten wie im ESC-Test. In Abbildung 4-30 ist die Partikelanzahlverteilung für die im Verlauf des 500-Stunden-Tests durchgeführten ETC-Tests dargestellt und in Abbildung 4-31 wird die Gesamtpartikelanzahl gezeigt. Bei der Gesamtpartikelanzahl ist im ETC-Test die Streuung größer als beim ESC-Test. So sind die Sprünge bei 125 Stunden und 250 Stunden nicht mehr zu erkennen. Die Tendenz zeigt aber auch hier einen Anstieg der Partikelemissionen.

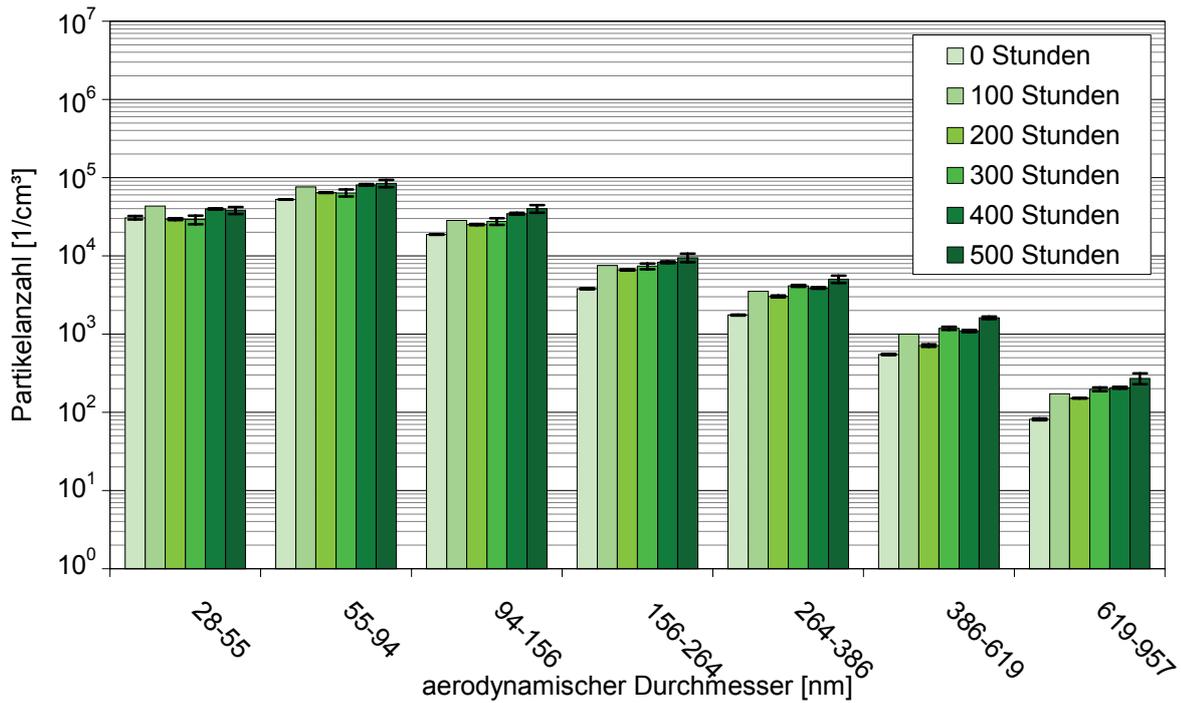


Abbildung 4-30: Verlauf für die Partikelanzahlverteilung (ELPI) bei ETC-Tests während des 500-Stunden-Tests.

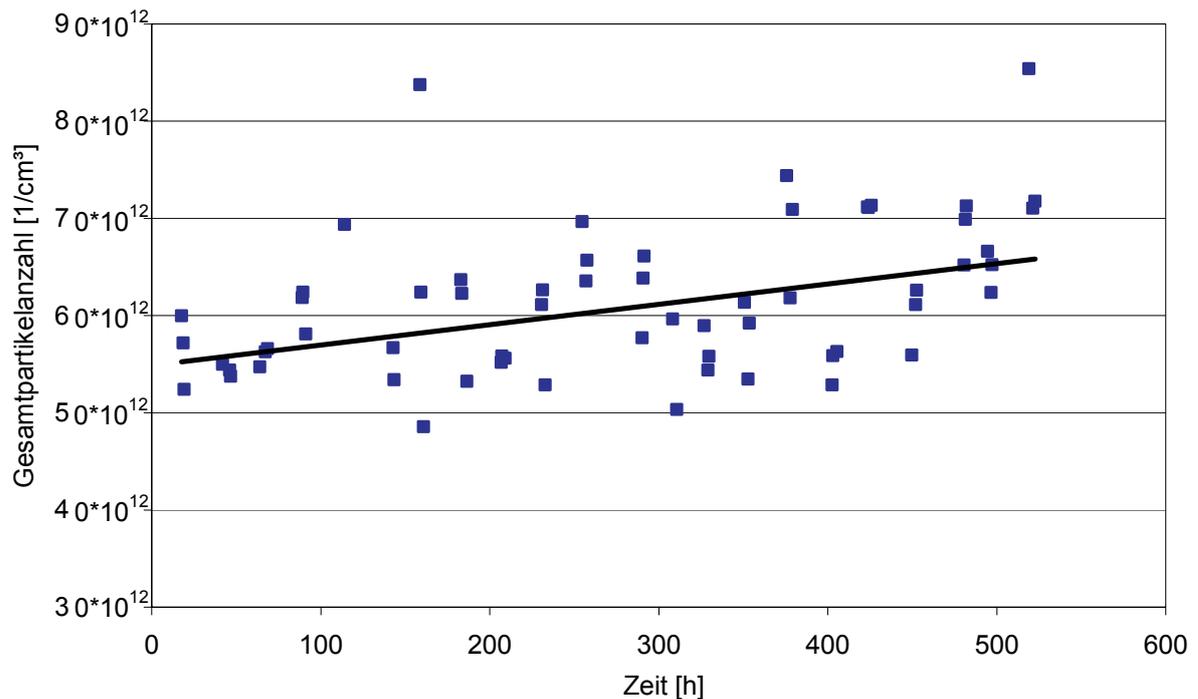


Abbildung: 4-31: Gesamtpartikelanzahl im ETC-Test während des 500-Stunden-Tests (ELPI).

4.9.1.3 Ergebnisse der SMPS-Messungen (ESC-Test)

Auch bei den SMPS-Messungen ist keine deutliche Veränderung der Partikelgrößenverteilung festzustellen (Abbildung 4-32). Ein Maximum liegt bei ca. 60 nm und variiert kaum. Ein zweites Maximum ist bei Partikeln kleiner als 20 nm festzustellen. Bei diesen kleinen Partikeln handelt es sich jedoch größtenteils um unverbrannten Kraftstoff (Munack et al., 2007). Große Unterschiede in den absoluten Emissionsmengen entstanden durch einen Fehler in der Probenahme des SMPS-Gerätes. Der Probenahmestrom war unzureichend. Dieser Fehler konnte provisorisch nach 40 Stunden behoben werden. Er trat dann jedoch wieder zwischen Stunde 150 und 280 auf und konnte danach mit Einbau eines Ersatzteils behoben werden.

In Abbildung 4-33 sind die Partikelanzahlen der ESC-Tests, die sich jeweils aus der gewichteten Gesamtzahl der im SMPS erfassten Partikel ergeben, im Verlauf des 500-Stunden-Tests dargestellt. Bei den hell dargestellten Punkten war der Probenstrom unzureichend und es ergab sich damit eine zu geringe Gesamtanzahl. Im Verlauf des 500-Stunden-Tests ergibt sich aus den übrigen Messungen wie auch schon bei der Partikelmasse und den ELPI-Messungen ein leicht ansteigender Trend.

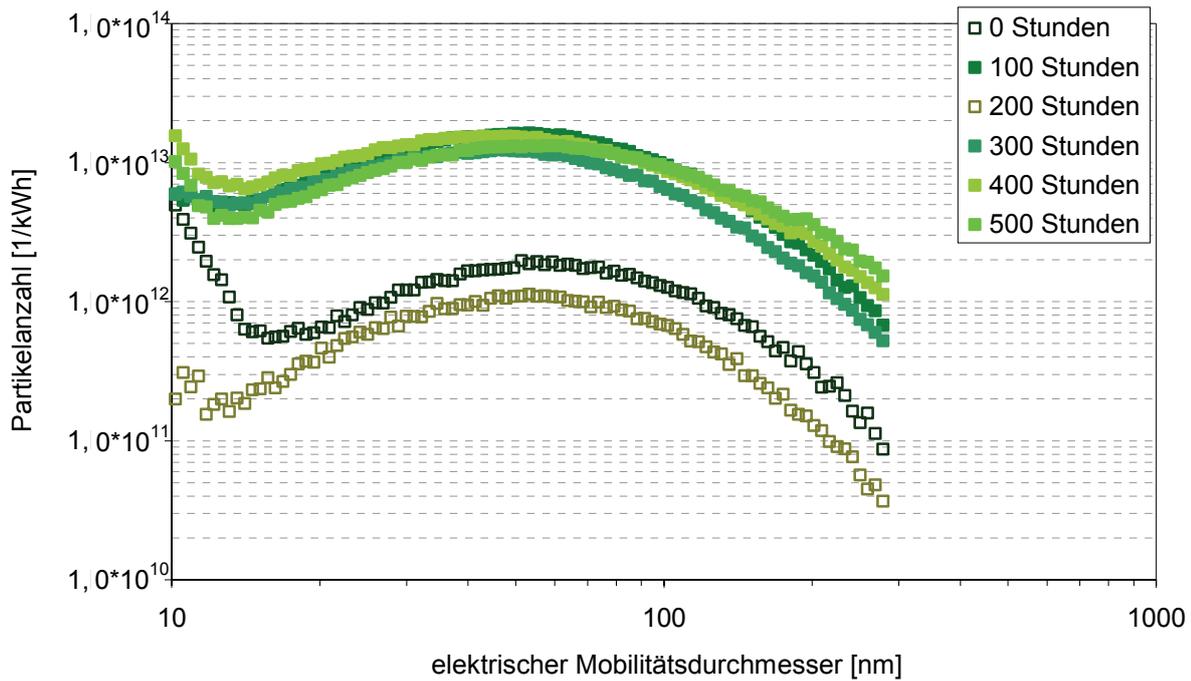


Abbildung: 4-32: Verlauf für die Partikelanzahlverteilung (SMPS) bei ESC-Tests während des 500-Stunden-Tests.

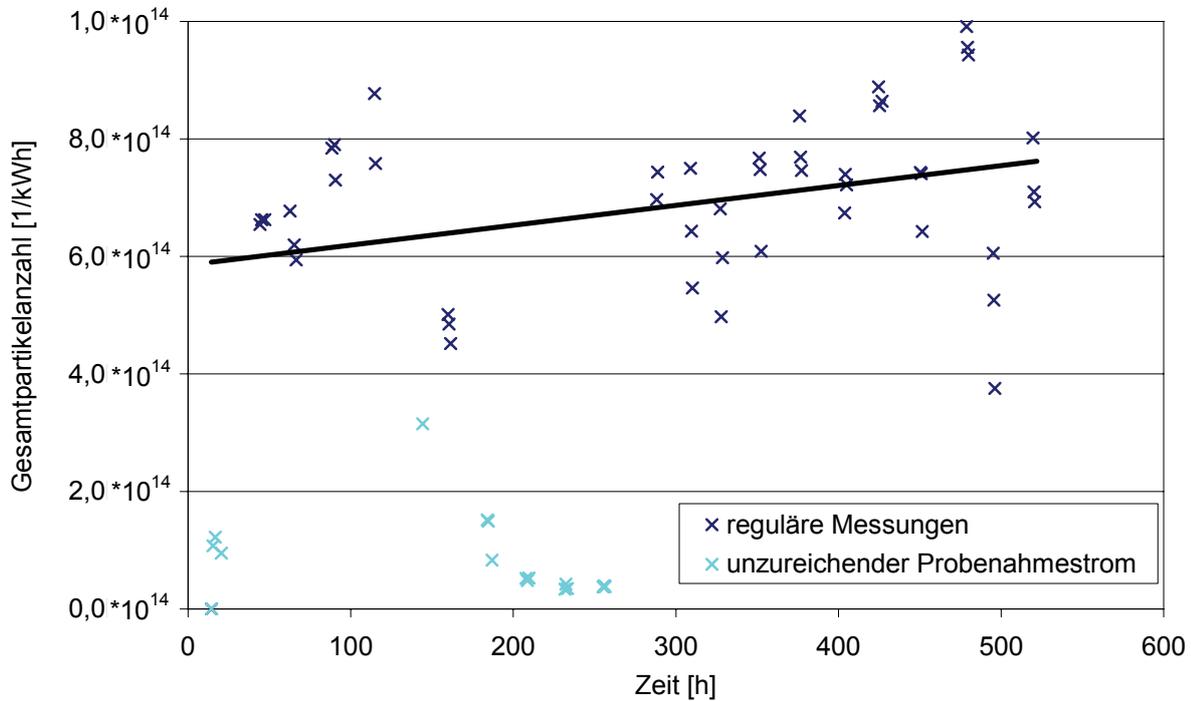


Abbildung: 4-33: Partikelanzahl (SMPS) bei ESC-Tests über den 500-Stunden-Test.

4.10 Aldehyde

Bei den Aldehyden musste ebenfalls eine Anpassung der Probenahme erfolgen. Insbesondere der hohe Stickstoffdioxidgehalt im Abgas störte die Bestimmung. Aber auch der Wasserdampfgehalt und die geringe Konzentration der Aldehyde erforderten weitere Anpassungen der Probenahme. Dadurch konnten erst nach der 300sten Stunde verlässliche Werte ermittelt werden.

Die Aldehydemissionen bestanden hauptsächlich aus Formaldehyd und Acetaldehyd, die zu etwa gleichen Teilen im Abgas vorkamen. Weiterhin konnten in deutlich geringerem Maße Acrolein, Aceton und Propionaldehyd nachgewiesen werden. Eine Änderung der Aldehydkonzentration des Abgases im Verlauf des 500-Stunden-Tests war nicht festzustellen (Abbildung 4-34).

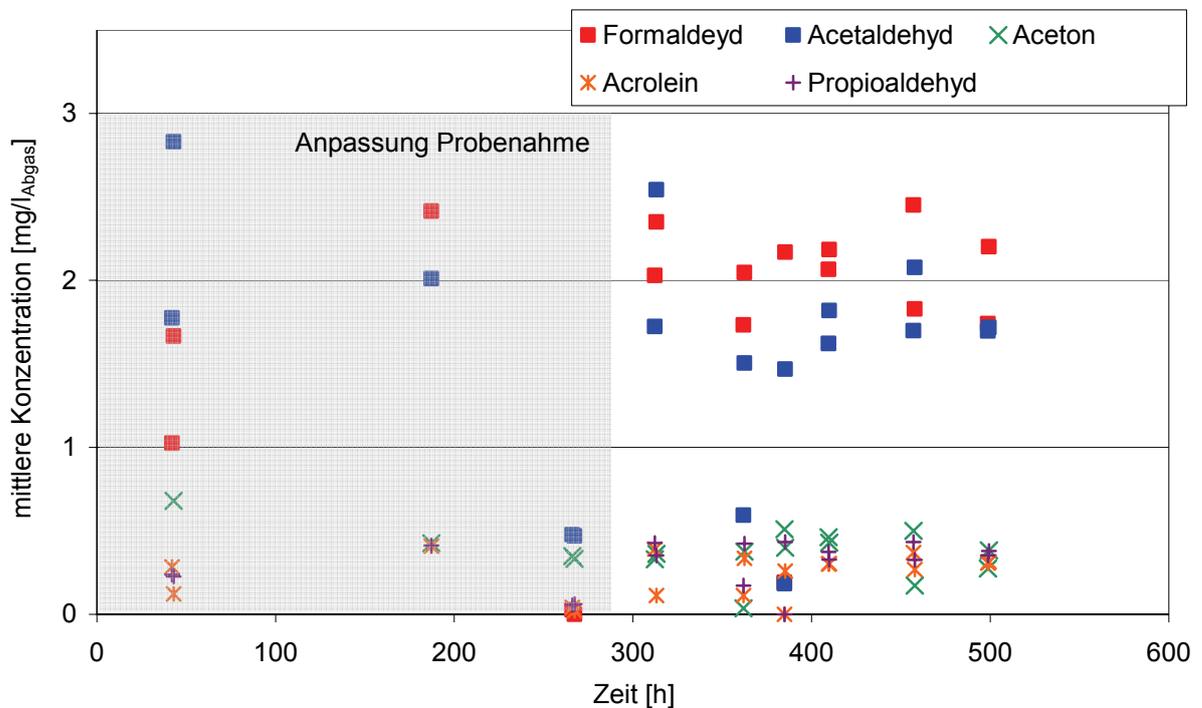


Abbildung: 4-34: Mittlere Aldehyd- und Ketonkonzentration bei ETC-Tests während des 500-Stunden-Tests.

5 Literaturverzeichnis

- Amann, C., Siegl, D. (1982). Diesel particulates – what they are and why. *Journal of Aerosol Science and Technology* 1, 73–101
- Baumbach, G. (1993). *Luftreinhaltung: Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverunreinigungen - Messtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York
- Bond, J.A., Wolff, R.K., Harkema, J.R., Mauderly, J.L., Henderson, R.F., Griffith, W.C., McClellan, R.O. (1988). Distribution of DNA adducts in the respiratory tract of rats exposed to diesel exhaust. *Toxicology and Applied Pharmacology* 96, 336-346
- Bünger, J., Müller, M.M., Krahl, J., Baum, K., Weigel, A., Hallier, E., Schulz, T.G. (2000). Mutagenicity of diesel engine particles from two fossil and two plant oil fuels. *Mutagenesis* 15, 391–397
- BUWAL-Bericht (Februar 2000). Partikelausstoss von benzinbetriebenen Personenwagen – Untersuchungen zur Partikelanzahl und –masse sowie den Messverfahren.
- Carter, W.P.L., Bufalini, J.J. (1991). Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds. EPA-Bericht 600/3-91/050
- Carter, W.P.L. (2007). Development of the SAPRC-07 chemical mechanism and updated ozone reactivity scales. [online] <http://pah.cert.ucr.edu/~carter/SAPRC/saprc07.pdf>
- Dekati Ltd. (2001). ELPI – User Manual. Version 3.13, Dekati Ltd, Tampere
- ECE-R 49 (1992) Europäische Regelung Nr. 49: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Motoren mit Selbstzündung und der mit einem Motor mit Selbstzündung ausgerüsteten Fahrzeuge hinsichtlich der Emissionen von Schadstoffen aus dem Motor
- EPA (1998) Health assessment document for diesel emissions: SAB Review draft. EPA/8-90/057C. Office of Research and Development, Washington, DC, USA
- EWG 88/77 (1992) Richtlinie des Rates der Europäischen Union 88/77 EWG
- EU (2005) Richtlinie 2005/55/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union, vom 20.10.2005
- Gorse, R.A., Benson, J.D., Burns, K.R., Hochhauser, A.M., Koehl, W.J., Painter, L.J., Reuter, R.M., Rippon, B.H. (1991). Toxic air pollutant vehicle exhaust emissions with reformulated gasolines. SAE-paper 912324
- Health Effects Institute (1995) Diesel exhaust: A critical analysis of emissions, exposure, and health effects. A special report of the institute's diesel working group, Cambridge, USA
- Houben, L., Lepperhoff, G. (1990) Untersuchungen zur Rußbildung während der dieselmotorischen Verbrennung. Supplement Motortechn. Zeitschrift 51, Anhang im Jahresband S. XI – XVI
- Hühn, W. (1970) Rußbildung bei der dieselmotorischen Verbrennung und Möglichkeiten ihrer Verminderung. Motortechn. Zeitschrift 31(3), 109
- IARC (1989). Evaluation of carcinogenic risks to humans: Diesel and gasoline exhausts and some nitroarenes. IARC Monographs, Vol. 46
- Informationsschrift Umweltpolitik (1992). Auswirkungen der Luftverunreinigungen auf die menschliche Gesundheit. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn.
- Jing, C., Forss, A.M., Bach, C., Graf, R., Eggenberger, U. (1996). Umfassende,

- wirkungsorientierte Charakterisierung von Partikel aus Dieselaabgasen. Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft 56, 139–145
- Klingenberg, H., Lies, K.-H., Winneke, H. (1992) Dieselaabgas – Entstehung, Messung und Gesundheitsgefahren. VDI-Fortschrittberichte Reihe 12, Nr. 172, 1 – 21
- Krahl, J. (1993). Bestimmung der Schadstoffemissionen von landwirtschaftlichen Schleppern beim Betrieb mit Rapsöl im Vergleich zu Dieselaabkraftstoff. VDI-Fortschrittberichte, Reihe 15, Nr. 110, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Krahl, J., Munack, A., Schröder, O., Stein, H., Herbst, L., Kaufmann, A., Bünger, J. (2005) The Influence of Fuel Design on the Exhaust Gas Emissions and Health Effects, SAE-Paper 2005-01-3772
- Lake, T., Bending, R.G., Williams, G.P., Beaumont, A.J., Waburton, A., Andersson, J. (1999) Entwicklung einer Regel- und Abgasnachbehandlungssysteme für einen GDI-Motor. MTZ Motortechn. Zeitschrift 60(12), 800 – 807
- Lenz, H. P., Pucher, E., Kohoutex, P., Rennenberg, H., Hahn, J., Elstner, E.F., Hippels S (1993) Emissionen, Immissionen und Wirkungen von Abgaskomponenten. VDI-Fortschrittbericht, Reihe 12, Nr. 183
- Lipkea, W, Johnson, J (1978). The physical and chemical character of diesel particulate emissions – measurement techniques and fundamental considerations. SAE-Paper 780108
- Lofti, C.F.P., Brentani, M.M., Böhm, G.M. (1990). Assessment of the mutagenic potential of ethanol auto engine exhaust gases by the Salmonella typhimurium microsomal mutagenesis assay, using a direct exposure method. Environ. Research 52, 225–230
- MAN. (2006) D 0834, D 0836. Informationsschrift. [online]
http://www.man-engines.com/datapool/mediapool/200/D0834%2b36_D114387_e.PDF
- MAN. (2007) AGR und Partikelfilter MAN PM-KAT®. Informationsschrift. [online]
http://www.man-mn.com/de/innovationundkompetenz/Euro_45/Euro4/AGR_mit_MAN_PM-KAT_.jsp
- Marhold, H. (2003). Feinstaubproblematik in Linz. Grüne Reihe, Bericht Nr. 1/2003, Amt für Umwelt und Naturschutz, Linz
- Marquardt, H., Schäfer, S.G. (1994) Lehrbuch der Toxikologie, Wissenschaftsverlag Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich
- Mattes, P., Rimmels, W., Sudmanns, H. (1999) Untersuchungen zur Abgasrückführung am Hochleistungsdieselmotor. MTZ Motortechn. Zeitschrift 60(4), 234 – 243
- Meurer, S. (1966). Der Wandel in der Vorstellung vom Ablauf der Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor. Motortechnische Zeitschrift 27(4), 131–139
- Munack, A., Capan, E., Schröder, O., Stein, H., Krahl, J. (2003) Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 'Untersuchung von Biodiesel und seinen Gemischen mit fossilem Dieselaabkraftstoff auf limitierte Emissionen'. Braunschweig : FAL, 33 p
- Munack, A., Schröder, O., Stein, H., Krahl, J., Bünger, J. (2003a). Systematische Untersuchungen der Emissionen aus der motorischen Verbrennung von RME, MK1 und DK. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 252
- Munack, A., Grope, N., Ruschel, Y., Schröder, O. Krahl, J. (2007) Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 'Messung ultrafeiner Partikel im Abgas von Dieselaabmotoren beim Betrieb mit Biodiesel'. Braunschweig : FAL, 107 p
- Office of Health and Environmental Assessment (1990). Health assessment document for acrolein. EPA/600/8-86/014F

- Penttinen, P., Timonen, K.L., Tittanen, P., Mirme, A., Ruuskanen, J., Pekkanen, J. (2001). Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics. *European Respiratory Journal* 17, 428-435
- Prescher, K., Stieper, K., Groth, K., Stanev, A., Lange, J., Berndt, S. (1997). Die Aldehydemission von Dieselmotoren in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität. *Motortechnische Zeitschrift* 58 (6), 318–325
- Schäfer, A., Naber, D., Gairing, M. (1998). Biodiesel als alternativer Kraftstoff für Mercedes-Benz-Dieselmotoren. *Mineralöltechnik* 43
- Schröder, O., Krahl, J., Munack, A., Bünger, J. (1998) Einfluss von Gemischen von Dieselmotorkraftstoff und Biodiesel auf das Abgasverhalten, Fachtagung Biodiesel Landbauforschung Völknerode, Sonderheft 190, 143-149
- Shi, J.P., Harrison, R.M. (1999). Investigation of ultrafine particle formation during diesel exhaust dilution. *Journal of the Environmental Science and Technology* 33(21), 3730-3736
- Vanhaelst, R. (2003). Optische und Thermodynamische Methoden zur Untersuchung der teilhomogenen Dieselverbrennung. Dissertation Universität Magdeburg
- Voshaar, T.H., Heyder, J., Köhler, D., Krug, N., Nowak, D., Scheuch, G., Schulz, H., Witt, C. (2005). Partikuläre Luftverunreinigung und ihre Folgen für die menschliche Gesundheit. *Pneumologie* 59, 470-476
- Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W. (2001) Verbrennung – Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstofferkennung. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- Wichmann, H.E., Peters, A. (2000). Epidemiological evidence of ultrafine particle exposure. *Philosophic Transactions of the Royal Society London A* 358, 2751-2769
- Wurst, F., Boos, R., Prey, R., Scheidl, K., Wörgetter, M. (1990). Emissionen beim Einsatz von Rapsölmethylester an einem Prüfstandsmotor. *Forschungsberichte der Bundesforschungsanstalt für Landtechnik*, Heft 22, Wieselburg