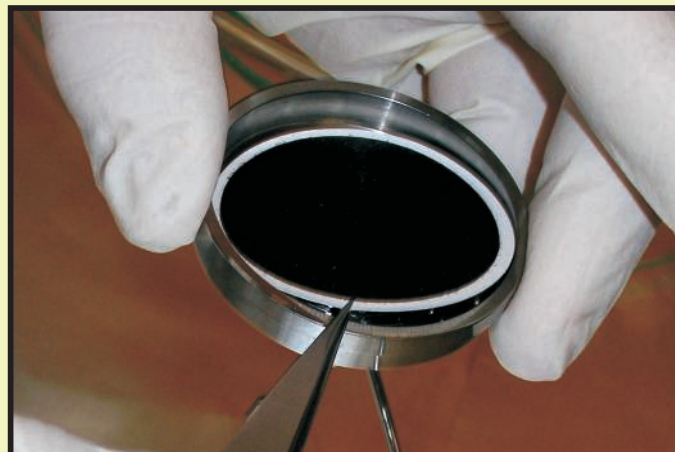




Berichte aus dem TFZ

Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Diesel- kraftstoff betriebenen Traktors



Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff betriebenen Traktors



Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff betriebenen Traktors

Klaus Thuneke
Peter Emberger
Thomas Gassner
Dr. Edgar Remmele
Dr. Bernhard Widmann

Helgard Fischer
Hansjürgen Krist
Dr. Jürgen Schnelle-Kreis
Dr. Klaus Hoppenheidt



Titel: Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff betriebenen Traktors

Autoren: Klaus Thuneke, Peter Emberger, Thomas Gassner, Dr. Edgar Remmele, Dr. Bernhard Widmann, Helgard Fischer (bifa), Hansjürgen Krist (bifa), Dr. Jürgen Schnelle-Kreis (bifa), Dr. Klaus Hoppenheidt (bifa)

Projektleiter: Klaus Thuneke

Bearbeiter: Klaus Thuneke, Peter Emberger, Thomas Gassner, Thomas Kießlinger, Dr. Edgar Remmele, Dr. Bernhard Widmann, Helgard Fischer (bifa), Hansjürgen Krist (bifa), Dr. Jürgen Schnelle-Kreis (bifa), Dr. Klaus Hoppenheidt (bifa)

in Kooperation mit: bifa Umweltinstitut

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2007
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing

Alle Rechte vorbehalten.
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe
Schulgasse 18, 94315 Straubing

E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de

Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Klaus Thuneke, Peter Emberger, Herbert Sporrer

Verlag: Eigenverlag, Straubing

Erscheinungsort: Straubing

Erscheinungsjahr: 2007

Gestaltung: Klaus Thuneke, Herbert Sporrer, Peter Emberger, Thomas Gassner

Fotonachweis: Klaus Thuneke (6), Thomas Gassner (2)

Vorwort

Dank gilt dem Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München, für die Förderung des Vorhabens. Besonders bedanken möchten wir uns beim Referat M 5, dem Referatsleiter Herrn MR Dr. Rupert Schäfer und seinen Mitarbeitern für die gute Zusammenarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen.

Weiterer Dank gilt der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), insbesondere dem Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau (LVFZ) Kringell für die Bereitstellung des Traktors und die Unterstützung bei der Durchführung des Vorhabens. Ein ganz herzliches Dankeschön geht an Herrn Wolfgang Löw für die hervorragende Zusammenarbeit, vor allem auch für die ausdauernde und zuverlässige Unterstützung bei den Emissionsmessungen.

Bedanken möchten wir uns auch beim Umrüster des untersuchten Traktors, Herrn Hausmann, sowie bei Herrn Marco Franz von Same Deutz-Fahr, für die bereitwillige Weitergabe von Informationen und die große Hilfe bei verschiedenen Fragestellungen.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---|--|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | | 7 |
| Abbildungsverzeichnis | | 9 |
| Tabellenverzeichnis | | 11 |
| 1 Einleitung..... | | 13 |
| 2 Zielstellung..... | | 15 |
| 3 Bisherige Untersuchungen | | 17 |
| 4 Material und Methodik | | 19 |
| 4.1 Traktor | | 19 |
| 4.1.1 Technische Daten | | 19 |
| 4.1.2 Umrüstung..... | | 19 |
| 4.1.3 Betriebsdatenerfassung | | 20 |
| 4.2 Kraftstoff..... | | 22 |
| 4.2.1 Rapsölkraftstoff..... | | 22 |
| 4.2.2 Dieselloskraftstoff..... | | 23 |
| 4.3 Prüfstand..... | | 25 |
| 4.3.1 Aufbau..... | | 25 |
| 4.3.2 Erfassung der Randbedingungen..... | | 27 |
| 4.3.3 Bestimmung von Motorleistung, Motordrehzahl und Kraftstoffverbrauch | | 29 |
| 4.3.4 Gasanalyse..... | | 31 |
| 4.3.5 Partikelmassebestimmung..... | | 31 |
| 4.4 Durchführung der Emissionsmessungen | | 32 |
| 4.4.1 Vorbereitung des Traktors und des Prüfstands | | 33 |
| 4.4.2 NRSC-Prüfzyklus..... | | 33 |
| 4.4.3 Partikelprobenahme für die Mutagenitätstests | | 34 |
| 4.5 Versuchsvarianten..... | | 37 |
| 4.6 Auswertung..... | | 38 |
| 4.7 Untersuchung der Abgaspartikel..... | | 41 |
| 4.7.1 Untersuchung zur Mutagenität..... | | 42 |
| 4.7.1.1 Probenaufbereitung | | 42 |
| 4.7.1.2 Ames-Test | | 42 |
| 4.7.1.3 Anzucht der Salmonellen | | 43 |
| 4.7.1.4 Testansatz..... | | 43 |
| 4.7.1.5 Auswertung | | 44 |
| 4.7.2 Untersuchungen zum Gehalt an PAK und Nitro-PAK..... | | 46 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 5 | Ergebnisse | 47 |
| 5.1 | Limitierte Abgaskomponenten | 47 |
| 5.1.1 | Gesamtbeobachtungszeitraum..... | 47 |
| 5.1.2 | Mutagenitätsuntersuchungen | 50 |
| 5.2 | Analyse der Abgaspartikel | 53 |
| 5.2.1 | Bestimmung der Mutagenität mittels Ames-Test | 53 |
| 5.2.1.1 | Mutantenstamm TA98 ohne S9-Mix | 53 |
| 5.2.1.2 | Mutantenstamm TA98 mit S9-Mix | 57 |
| 5.2.1.3 | Mutantenstamm TA100 ohne S9-Mix | 61 |
| 5.2.1.4 | Mutantenstamm TA100 mit S9-Mix | 66 |
| 5.2.1.5 | Vergleich der Ergebnisse | 70 |
| 5.2.2 | Chemische Analyse der Abgaspartikel | 73 |
| 6 | Diskussion | 79 |
| | Zusammenfassung..... | 83 |
| | Quellenverzeichnis | 85 |
| | Anhang | 87 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Betriebsdatenerfassung an einem Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 zur Durchführung von Emissionsmessungen | 21 |
| Abbildung 2: | Einbauposition der Abgastemperatursensoren und des Motoröltemperatursensors an einem Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160..... | 21 |
| Abbildung 3: | Aufbau des Emissionsprüfstands am Technologie- und Förderzentrum (TFZ) | 26 |
| Abbildung 4: | Aufbau zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs mittels Wägung des Versuchskraftstoffbehälters..... | 30 |
| Abbildung 5: | Lage der Prüfphasen im Leistungs-/Drehmomentdiagramm | 34 |
| Abbildung 6: | Waschung der Filterhalter mit Dichlormethan (links) und Entfernung des beladenen Filterhalters aus der Partikelprobenahmeverrichtung (rechts)..... | 36 |
| Abbildung 7: | Schematische Darstellung der Versuchsvarianten für die Emissionsmessungen zur Bestimmung der mutagenen Wirkung von Partikeln | 38 |
| Abbildung 8: | Schematische Darstellung des Salmonella-Mutagenitätstests (Ames-Test)..... | 44 |
| Abbildung 9: | Idealisierte Dosis-Wirkungsbeziehung. Gekennzeichneter Bereich: Relevanter Anteil der Dosis-Wirkungsbeziehung für die Auswertung von Ames-Tests..... | 45 |
| Abbildung 10: | CO-Emissionen eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei wiederkehrenden Messungen (Balken bei den Mutagenitätsmessungen sind schraffiert dargestellt) | 48 |
| Abbildung 11: | NO _x -Emissionen eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei wiederkehrenden Messungen (Balken bei den Mutagenitätsmessungen sind schraffiert dargestellt) | 49 |
| Abbildung 12: | HC-Emissionen eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei wiederkehrenden Messungen (Balken bei den Mutagenitätsmessungen sind schraffiert dargestellt) | 49 |
| Abbildung 13: | Partikelmasse-Emissionen eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei wiederkehrenden Messungen (Balken bei den Mutagenitätsmessungen sind schraffiert dargestellt) | 50 |
| Abbildung 14: | CO-Emissionen (bezogen auf trockenes Abgas) eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei den Mutagenitätsuntersuchungen..... | 51 |
| Abbildung 15: | NO _x -Emissionen (bezogen auf trockenes Abgas) eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei den Mutagenitätsuntersuchungen..... | 51 |
| Abbildung 16: | HC-Emissionen (bezogen auf trockenes Abgas) eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei den Mutagenitätsuntersuchungen..... | 52 |

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 17: | Partikel-Emissionen (bezogen auf trockenes Abgas) eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei den Mutagenitätsuntersuchungen..... | 52 |
| Abbildung 18: | Vergleich der mit dem TA98-Stamm ohne S9-Mix erzielte Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Positivkontrolle mit 3-NBA sowie für die Extrakte aller Proben..... | 56 |
| Abbildung 19: | Vergleich der mit dem TA98-Stamm mit S9-Mix erzielten Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Positivkontrolle mit 2-AF sowie für die Extrakte aller Proben..... | 61 |
| Abbildung 20: | Vergleich der mit dem TA100-Stamm ohne S9-Mix erzielten Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Positivkontrolle mit MMS sowie für die Extrakte aller Proben..... | 62 |
| Abbildung 21: | Vergleich der mit dem TA100-Stamm mit S9-Mix erzielten Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Positivkontrolle mit 2-AF sowie für die Extrakte aller Proben..... | 66 |
| Abbildung 22: | Anzahl an zusätzlichen Revertanten (Netto-Revertanten) bezogen auf 1 mg der Partikelproben | 71 |
| Abbildung 23: | Anzahl an zusätzlichen Revertanten (Netto-Revertanten) pro Liter Abgas (unverdünnt)..... | 71 |
| Abbildung 24: | Relative Mutagenität von Abgaspartikeln beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zum Betrieb mit Dieselkraftstoff, bezogen auf Partikelmasse und Abgasvolumen beim 8-Phasen-Prüfzyklus und im Leerlauf..... | 73 |
| Abbildung 25: | Vergleich der PAK-Summen-Konzentrationen in den Rapsöl- und Dieselabgaspartikelproben über den gesamten Zyklus, im Leerlauf sowie der Blindprobe..... | 76 |
| Abbildung 26: | Vergleich der PAK-Konzentrationen in den Proben aus den Gesamtzyklen beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff | 77 |
| Abbildung 27: | Vergleich der PAK-Konzentrationen in den Proben aus den Leerlaufphasen beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff | 78 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabelle 1: | Technische Daten des Traktors Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 | 19 |
| Tabelle 2: | Erfasste Messgrößen, Messstellen und Messgrößenaufnehmer der Betriebsdatenerfassung an einem Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160..... | 20 |
| Tabelle 3: | Anforderungen der DIN V 51605 und Qualität des für die Emissionsmessungen verwendeten Rapsölkraftstoffs | 22 |
| Tabelle 4: | Ergebnisse der Elementaranalyse des für die Emissionsmessungen verwendeten Rapsölkraftstoffs | 23 |
| Tabelle 5: | Ergebnisse des Elementscreenings mittels ICP-OES des für die Emissionsmessung verwendeten Rapsölkraftstoffs..... | 23 |
| Tabelle 6: | Ergebnisse der Elementaranalyse des für die Emissionsmessungen verwendeten Dieseldkraftstoffs | 23 |
| Tabelle 7: | Anforderungen der DIN EN 590 und Qualität des für die Emissionsmessungen verwendeten Dieseldkraftstoffs | 24 |
| Tabelle 8: | Ergebnisse des Elementscreenings mittels ICP-OES des für die Emissionsmessung verwendeten Dieseldkraftstoffs..... | 25 |
| Tabelle 9: | Erfasste Messgrößen mit Messstellen und Messgrößen-Aufnehmer am Abgasprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) | 27 |
| Tabelle 10: | Abweichungen zum Typprüfungsverfahren nach Richtlinie 97/68/EG | 30 |
| Tabelle 11: | Technische Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile | 31 |
| Tabelle 12: | Übersicht zu den acht Prüfphasen nach Richtlinie 97/68/EG [3] | 34 |
| Tabelle 13: | Übersicht zur Dauer der Partikelprobenahme bei den einzelnen Prüfphasen des 8-Phasen-Zyklus in Anlehnung an die Richtlinie 97/68/EG..... | 35 |
| Tabelle 14: | Ergebnisse der Vorversuche zur Ermittlung des Einflusses der Filterkonditionierung auf das Filtergewicht | 37 |
| Tabelle 15: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 ohne S9-Mix für das geprüfte DMSO..... | 53 |
| Tabelle 16: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 ohne S9-Mix für die Positivkontrolle (3-NBA) sowie für die Extrakte der Partikelproben aus dem Dieseldkraftstoffbetrieb | 54 |
| Tabelle 17: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 ohne S9-Mix für die Extrakte der Partikelproben aus dem Rapsölkraftstoffbetrieb sowie für die Blindprobe (Blank)..... | 55 |
| Tabelle 18: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 mit S9-Mix für das geprüfte DMSO..... | 57 |
| Tabelle 19: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 mit S9-Mix für die Positivkontrolle (2-AF) sowie für die Extrakte der Partikelproben aus dem Dieseldkraftstoffbetrieb | 59 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabelle 20: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 mit S9-Mix für die Extrakte der Partikelproben aus dem Rapsölkraftstoffbetrieb sowie für die Blindprobe (Blank)..... | 60 |
| Tabelle 21: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 ohne S9-Mix für das geprüfte DMSO..... | 61 |
| Tabelle 22: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 ohne S9-Mix für die Positivkontrolle (MMS) sowie für die Extrakte der Partikelproben aus dem Dieselmotortrieb..... | 64 |
| Tabelle 23: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 ohne S9-Mix für die Extrakte der Partikelproben aus dem Rapsölkraftstoffbetrieb sowie für die Blindprobe (Blank)..... | 65 |
| Tabelle 24: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 mit S9-Mix für das geprüfte DMSO..... | 66 |
| Tabelle 25: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 mit S9-Mix für die Positivkontrolle (2-AF) sowie die Extrakte der Partikelproben aus dem Dieselmotortrieb..... | 68 |
| Tabelle 26: | Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 mit S9-Mix für die Extrakte der Partikelproben aus dem Rapsölkraftstoffbetrieb sowie für die Blindprobe..... | 69 |
| Tabelle 27: | Ermittelte Anzahlen an zusätzlichen Revertanten bezogen auf ein Milligramm der Prüfsubstanzen bzw. auf einen Liter Abgas (unverdünnt) | 70 |
| Tabelle 28: | Ergebnisse der chemischen Analyse für Nitro-PAK..... | 74 |
| Tabelle 29: | Ergebnisse der chemischen Analyse für PAK | 75 |
| Tabelle 30: | Übersicht bisheriger Untersuchungen zur Mutagenität von Rapsölkraftstoff..... | 80 |

1 Einleitung

Die Nutzung von Rapsölkraftstoff für den Betrieb von pflanzenöлтаuglichen Traktoren kann einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz durch Einsparung von CO₂-Emissionen leisten. Darüber hinaus bietet die Nutzung von Rapsölkraftstoff weitere Vorteile hinsichtlich des Boden- und Gewässerschutzes, der Erhöhung der Versorgungssicherheit und Steigerung der Wertschöpfung in der Landwirtschaft durch heimische Kraftstoffherzeugung. Aufgrund der Energiesteuerbefreiung von Rapsölkraftstoff im Bereich der Landwirtschaft bietet sich in vielen Fällen auch die Möglichkeit der Kraftstoffkosteneinsparung im Vergleich zur Nutzung von fossilem Diesellokraftstoff.

Voraussetzung für den zuverlässigen Betrieb eines pflanzenöлтаuglichen Dieselmotors mit Rapsölkraftstoff ist ein hochwertiger Kraftstoff, der die Anforderungen der Vornorm DIN V 51605 erfüllt. Rapsölkraftstofftaugliche Traktoren, die direkt von Landmaschinenherstellern angeboten werden, befinden sich derzeit in der Markteinführung. Aus diesem Grund werden bislang die Serien-Dieselmotoren in Traktoren auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff nachträglich angepasst. Derartige Umrüstungen werden in Deutschland von mehr als 40 Unternehmen angeboten.

Aufgrund der zunehmenden Nutzung von Rapsölkraftstoff in der Praxis sind derzeit noch offene Fragestellungen hinsichtlich der Emissionen von rapsölkraftstoffbetriebenen Dieselmotoren von großer Bedeutung. Untersuchungen zu den gesetzlich limitierten Emissionen von umgerüsteten Dieselmotoren sind weithin verfügbar, wenngleich für moderne Motorgenerationen oft Lücken bestehen. Auch hinsichtlich der Veränderung des Emissionsbildes über einen längeren Betriebszeitraum hinweg liegen nur wenige Ergebnisse vor.

Partikelemissionen aus Dieselmotoren sowie deren Wirkung auf den menschlichen Organismus stehen wegen der potenziellen Gesundheitsgefährdung in besonderem öffentlichen Interesse. Epidemiologische Studien weisen auf ein herzscheidendes und kanzerogenes Potenzial der Partikel aus Verbrennungsmotoren hin. Darüber hinaus besitzt Dieselloabgas eine mutagene Wirkung, die meist mittels Bakterienstämmen anhand des Ames-Tests nachgewiesen wird. Hierzu gibt es bereits eine Vielzahl von Untersuchungen, wenn auch zur richtigen Deutung der Wirkung von Dieselloabgasen auf den menschlichen Organismus noch große Forschungsanstrengungen notwendig sind [15].

Bislang wurden nur wenige Forschungsarbeiten zur mutagenen Wirkung von Partikelemissionen aus rapsölkraftstoffbetriebenen Motoren durchgeführt. Einzelne stichpunktartige Untersuchungen kommen zu gegensätzlichen Ergebnissen. Diese Untersuchungen wurden an verschiedenen Motoren mit unterschiedlich intensiven Maßnahmen zur Anpassung an die Verbrennung von Rapsölkraftstoff durchgeführt. Eine allgemeingültige Aussage über das mutagene und kanzerogene Potenzial von Rapsölkraftstoff bei der motorischen Verbrennung ist daraus nicht abzuleiten. Aufgrund von Medienberichten, wonach beim Einsatz von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Diesellokraftstoff ein extrem erhöhtes Krebspotenzial bestehe, herrscht in der Öffentlichkeit eine große Verunsicherung hinsichtlich der Gesundheitsgefährdung durch Rapsölkraftstoffemissionen. Weitere Untersuchungen zur Verbesserung der Datenbasis sind deshalb dringend erforderlich.

2 Zielstellung

Aufgrund der erheblichen Kenntnislücken hinsichtlich des mutagenen Potenzials von Rapsölkraftstoff, ist es Ziel dieser Untersuchung, die Partikelemissionen eines auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüsteten Traktors auf ihre Mutagenität hin zu überprüfen. Der Traktor soll dabei sowohl mit Rapsölkraftstoff als auch mit Dieselkraftstoff betrieben werden, um vergleichende Aussagen anstellen zu können. Zur besseren Interpretation der Ergebnisse soll zusätzlich auch die Zusammensetzung der Partikelproben hinsichtlich ausgewählter Komponenten bestimmt werden. Dies sind insbesondere die als kanzerogen eingestufteten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie nitrierte PAK (Nitro-PAK).

Untersucht werden sollen Partikelproben, die gemäß des standardisierten Prüfzyklus nach Richtlinie 97/68/EG gewonnen werden. Weiterhin sollen auch Partikelproben bei Leerlauf auf ihre mutagene Wirkung untersucht werden. Leerlauf ist ein besonders relevanter Betriebspunkt, da hierbei der Kontakt des menschlichen Organismus mit den Abgasen am wahrscheinlichsten ist und die motorische Verbrennung häufig vermehrt unvollständig ist. Neben der mutagenen Wirkung sollen gleichzeitig auch die limitieren Abgasemissionen bei den Untersuchungen mit betrachtet werden.

Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, einen Teil der bestehenden Kenntnislücken hinsichtlich der Mutagenität von Partikeln beim Motorbetrieb mit Rapsölkraftstoff zu schließen und ggf. eine differenzierte öffentliche Diskussion hinsichtlich der Umweltverträglichkeit des Einsatzes von Rapsölkraftstoff anzuregen.

Die vorliegende Untersuchung zur Mutagenität ist Teil eines Gesamtvorhabens zur Beurteilung des Betriebs- und Emissionsverhaltens von rapsölkraftstoffbetriebenen Traktoren und der Veränderung der Emissionen über einen längeren Betriebszeitraum. Eingesetzt werden dabei fachgerecht auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstete Traktoren, die ausschließlich mit Rapsölkraftstoff nach Vornorm DIN V 51605 in der Praxis betrieben werden. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung von Randbedingungen und Betriebsdaten mittels eines automatischen Datenerfassungssystems sowie der Dokumentation der Kraftstoff- und Motorölqualität, von Störungen, Wartungs- und Reparaturarbeiten soll das Betriebsverhalten der Traktoren bewertet und die Einsatzbedingungen beschrieben werden. Die Traktoren werden regelmäßig am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) hinsichtlich ihrer Abgasemissionen untersucht.

3 Bisherige Untersuchungen

BÜNGER et al. (2007) [1] untersuchten mit Hilfe des Ames-Tests die Mutagenität von Abgaspartikeln und -kondensat von einem nicht umgerüsteten Mercedes-Benz Motor OM 906 LA mit Turbolader und Ladeluftkühler (6-Zylinder, 205 kW, EURO III), die bei einem stationären 13-Stufen-Test (ohne Kaltstart) beim Betrieb mit Dieselkraftstoff, RME und Rapsölkraftstoff gewonnen wurden. Die Herkunft bzw. Qualität des Rapsölkraftstoffs ist nicht näher spezifiziert. Es erfolgte eine Vierfachbestimmung je Probe. Die Versuche fanden sowohl ohne als auch mit Vorwärmung (70 °C) des Rapsölkraftstoffs statt, letztere Variante, um ein einfaches Umrüstsystem mit Kraftstoffvorwärmung zu simulieren. Die Ergebnisse deuten auf eine etwa 10- bis 59-fach höhere mutagene Wirkung von Rapsöl- gegenüber Dieselkraftstoffpartikeln mit den Testorganismen TA98 und eine ca. 5- bis 22-fach höhere Mutagenität mit den Teststämmen TA100, jeweils sowohl mit als auch ohne metabolische Aktivierung durch Zugabe von Rattenleberextrakt („S9-Mix“) hin. Die Emissionen mit vorgewärmtem Rapsölkraftstoff weisen im Durchschnitt eine etwa 3-mal so hohe Mutagenität auf wie mit nicht vorgewärmtem Rapsölkraftstoff. Als Ursache für die höhere Mutagenität von vorgewärmtem Rapsölkraftstoff vermuten BÜNGER et al. (2007) [1] zum einen die feinere Tröpfchengröße des Einspritzstrahls, die eine größere Oberfläche und damit größere Reaktionszone für die Bildung mutagener Substanzen bildet oder zum anderen das spezielle Siedeverhalten von Rapsölkraftstoff, welches zu gesundheitsschädlichen Zersetzungsprodukten führen kann.

Eine frühere Untersuchung von STALDER et al. (1994) [14] an einem pflanzenöлтаuglichen Deutz Traktor mit Wirbelkammermotor, bei der die Partikelproben bei Vollast gewonnen wurden, kamen zu einem von BÜNGER et al. (2007) [1] abweichenden Ergebnis. Mit dem TA100-Stamm war die Mutagenität mit Rapsölkraftstoff beim ersten Versuch etwa viermal so hoch, wohingegen sie beim zweiten Versuch etwa nur ein siebtel des Wertes von Dieselkraftstoff betrug. Die mutagene Wirkung beim TA98-Stamm war bei beiden Motorläufen mit Dieselkraftstoff knapp 3-mal so hoch als mit Rapsölkraftstoff. Bei den Proben mit Zugabe von S9-Mix wurden bei Rapsöl über alle 8 Proben weniger als eine Mutante und bei Dieselkraftstoff im Mittel ca. 13,5 Mutanten festgestellt. Generell war jedoch die Anzahl der Mutanten bei diesen Versuchen sehr gering.

Weitere Untersuchungen zur Mutagenität wurden von KRIST et al. (2007) [6] [16] am bifa Umweltinstitut im Auftrag der bioltec evolv-ram GmbH durchgeführt. Hierbei wurde die Mutagenität von Abgaspartikeln, die während eines 13-Stufentests mit einem umgerüsteten (Zwei-Tank-System) EURO V Lkw des Typs DAF CF 85 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff gewonnen wurden, miteinander verglichen. Die Bestimmung erfolgte ebenfalls mit den Teststämmen TA98 und TA100 sowohl mit als auch ohne Zugabe von S9-Mix. Es zeigte sich, dass bezogen auf die extrahierte Partikelmenge, die Anzahl der Revertanten und damit die mutagene Wirkung bei den Abgaspartikel-Extrakten aus Pflanzenöl mit Umrüstung (Zwei-Tank-System) um den Faktor 2 bis 3 niedriger lag als bei den Dieselpartikel-Extrakten.

Eine umfangreiche Literaturzusammenstellung zur Bildung von Mutagenen bei der motorischen Verbrennung von Dieselkraftstoff erfolgt bei WACHTER (2007) [15]. Daraus geht hervor, dass die Produkte der unvollständigen Verbrennung wie z. B. aromatische und aliphatische Kohlenwasserstoffe sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) teilweise an Kohlenstoff-Partikeln kondensieren und adsorbiert werden. Tests zeigten, dass insbesondere die polaren

Gruppen des organisch löslichen Partikelanteiles für ungefähr 90 % der mutagenen Aktivität verantwortlich sind, obwohl sie lediglich 30 % der Masse ausmachen. Weitere Versuche deuten darauf hin, dass vor allem nitrierte PAK (Nitro-PAK) die mutagene Wirkung bei Dieselpartikeln verursachen. Üblicherweise sind die zu den Nitro-PAK zählenden Nitro- und Dinitropyrene für bis zu 50 % der gesamten Mutagenität verantwortlich. Eine bedeutsame Reduktion der mutagenen Aktivität der Dieselabgase erscheint möglich, indem die Menge polynuklearer Vorläufersubstanzen reduziert oder physikalische Bedingungen des Verbrennungsprozesses optimiert werden. WACHTER (2007) [15] fasst Ergebnisse aus Ames-Tests zur Beurteilung der Mutagenität von Dieselabgasen wie folgt zusammen:

„1. Die Mutagenität der Dieselabgase nimmt mit zunehmender Motorlast ab. Die Höhe der örtlichen Temperatur im Brennraum scheint eine wesentliche Rolle zu spielen.

2. Neben PAK-Molekülen ist auch eine bestimmte NO-Konzentration zur Bildung von Nitropyrenen notwendig.

3. Nitro- und Dinitropyrene haben sich als die aggressivsten Substanzen erwiesen, die in Dieselpartikeln enthalten sind. Der größte Teil der beobachteten Mutagenität geht zu Lasten dieser Kohlenwasserstoffe. Das wird aus den Ergebnissen mit Bakterienstämmen geschlossen, die gegenüber Nitro- und Dinitropyrenen resistent sind.

4. Der Aromatengehalt des Kraftstoffes (vor allem Mehringaromaten) beeinflusst sehr nachhaltig die Bildung von Mutagenen.

5. Moderne Dieselmotoren sind weit weniger genetisch aggressiv als Triebwerke alter oder gegenwärtiger Produktion. Der Grund ist in der gegenüber herkömmlichen Motoren deutlich geringeren Stickoxid-Emission zu suchen.

6. Wassereinspritzung in das Saugrohr hat sich als sehr wirkungsvoll zur Senkung der genotoxischen Aktivität des Dieselabgases erwiesen.

7. Als Sofortmaßnahme zur Verbesserung der Situation, vor allem in Ballungsgebieten, bietet sich der Einsatz hochwertiger Kraftstoffe an. Dadurch könnte die Mutagenität des bestehenden Fahrzeugbestandes beträchtlich verringert werden.

8. Zukünftige Motorkonzepte bergen ein erhebliches Potenzial zur Reduktion der mutagenen Aktivität der Dieselpartikel. Diese Erscheinung scheint mit der von den Gesetzgebern erzwungenen Verringerung der Stickoxid-Emission einherzugehen.

9. Obschon Vergleiche mit der genotoxischen Wirkung von Zigarettenrauch zeigen, dass der Grad der Gesundheitsbedrohung durch Dieselpartikel als untergeordnet anzusehen ist, darf die potenzielle Gefahr dennoch nicht außer Acht gelassen werden. Die Verringerung der Mutagenität von Dieselabgasen fördert zudem die Akzeptanz des Dieselmotors. Hier werden die durch die Gesetzgebung förmlich erzwungenen Partikelfilter hilfreich sein.“

4 Material und Methodik

4.1 Traktor

Die Untersuchungen zum Emissionsverhalten wurden an einem Traktor Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 durchgeführt. Der Traktor befindet sich auf dem Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau Kringell der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) im Einsatz. Der Traktor ist mit einer Betriebsdatenerfassung ausgestattet, um das Betriebsverhalten in der Praxis dokumentieren zu können. Die Überprüfung des Emissionsverhaltens erfolgte am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ).

4.1.1 Technische Daten

Der Traktor erfüllt die Anforderungen der Abgasstufe II und ist ausgestattet mit einem Motor der Baureihe BF6M1013EC mit einem Pumpe-Leitung-Düse-Hochdruckeinspritzsystem (PLD) der Deutz AG. Die technischen Daten des Traktors sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Technische Daten des Traktors Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160

| | |
|---------------------|---|
| Traktortyp | Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 |
| Motortyp | Deutz BF6M1013EC |
| Anzahl der Zylinder | 6 |
| Leistung in kW / PS | 119 / 162 |
| Einspritzsystem | Pumpe-Leitung-Düse-Hochdruckeinspritzsystem |
| Baujahr | 2005 |
| Abgasstufe | II |

4.1.2 Umrüstung

Der Traktor wurde mit einem Ein-Tank-System durch die Firma Hausmann, Wülfershausen auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet. Die Umrüstung basiert im Wesentlichen auf folgenden durchgeführten Anpassungen:

- Austausch der Einspritzdüsen
- Erhöhung des Einspritzdrucks
- Elektrische Beheizung der Einspritzdüsen
- Veränderungen des Kraftstoffsystems im Niederdruckbereich
- Einbau eines Kraftstoffvorwärmersystems

4.1.3 Betriebsdatenerfassung

Um das Betriebsverhalten in der Praxis dokumentieren zu können, ist der Traktor mit einem Betriebsdatenerfassungssystem ausgestattet. In das Fahrzeug wurde ein Datenlogger installiert, welcher Daten aus dem CAN-Bus lesen und aufzeichnen kann. Darüber hinaus wurden mehrere Sensoren an verschiedenen Stellen eingebaut, deren Daten ebenfalls im Datenlogger gespeichert werden. Der Datenlogger zeichnet beim Betrieb des Traktors alle 120 s die Werte der gemessenen Kenngrößen auf.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die erfassten Messgrößen, Abbildung 1 zeigt die Position der Messfühler im Motor-, Schmieröl-, und Kraftstoffsystem und Abbildung 2 zeigt die Einbauposition der Abgastemperaturfühler und des Motoröltemperaturfühlers.

Tabelle 2: Erfasste Messgrößen, Messstellen und Messgrößenaufnehmer der Betriebsdatenerfassung an einem Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160

| Messgrößen | Kürzel | Messstelle | Messgrößen-Aufnehmer |
|--------------------------------------|--------------------|--|----------------------------|
| Betriebsstunden | Bh | Traktor | CAN-Bus Schlepper |
| GPS-Position | GPS | Traktor | GPS-Empfänger |
| Temperatur Umgebungsluft | T _{LU1} | Kabinendach außen bei Rundumkennleuchte | PT100 Thermofühler |
| Fahrgeschwindigkeit | v | Getriebe | CAN-Bus Schlepper |
| Betrieb Düsenheizung 70 °C | DH1 | Relais Düsenheizung | Voltmeter |
| Betrieb Düsenheizung 100 °C | DH2 | Relais Düsenheizung | Voltmeter |
| Ladedruck | p _{LL} | nach Abgasturbolader | CAN-Bus Schlepper |
| Temperatur Kraftstoff | T _{KT1} | Kraftstoffvorlaufleitung direkt nach Tank | PT100 Thermofühler |
| Temperatur Kraftstoff | T _{KE} | Anlegefühler an Einspritzleitung (Zylinder 1) | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Temperatur Kraftstoff | T _{KR} | Rücklauf direkt nach Zylinderkopf (vor Kraftstoffkühler) | CAN-Bus Schlepper |
| Kraftstoffverbrauch | B | berechneter Wert | CAN-Bus Schlepper |
| Temperatur Abgas (einzelne Zylinder) | T _{AZ1-6} | jeweils direkt nach Ausgang Zylinderkopf im Krümmer | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Temperatur Motoröl | T _{Oel} | im Nebenstrom vor Nebenstromölfilter | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Temperatur Kühlwasser | T _W | Kühlwasseraustritt aus Zylinderkopf | CAN-Bus Schlepper |
| Motordrehzahl | n _T | Kurbelwelle | CAN-Bus Schlepper |
| Last | P _{TR} | Gaspedalstellung | CAN-Bus Schlepper |

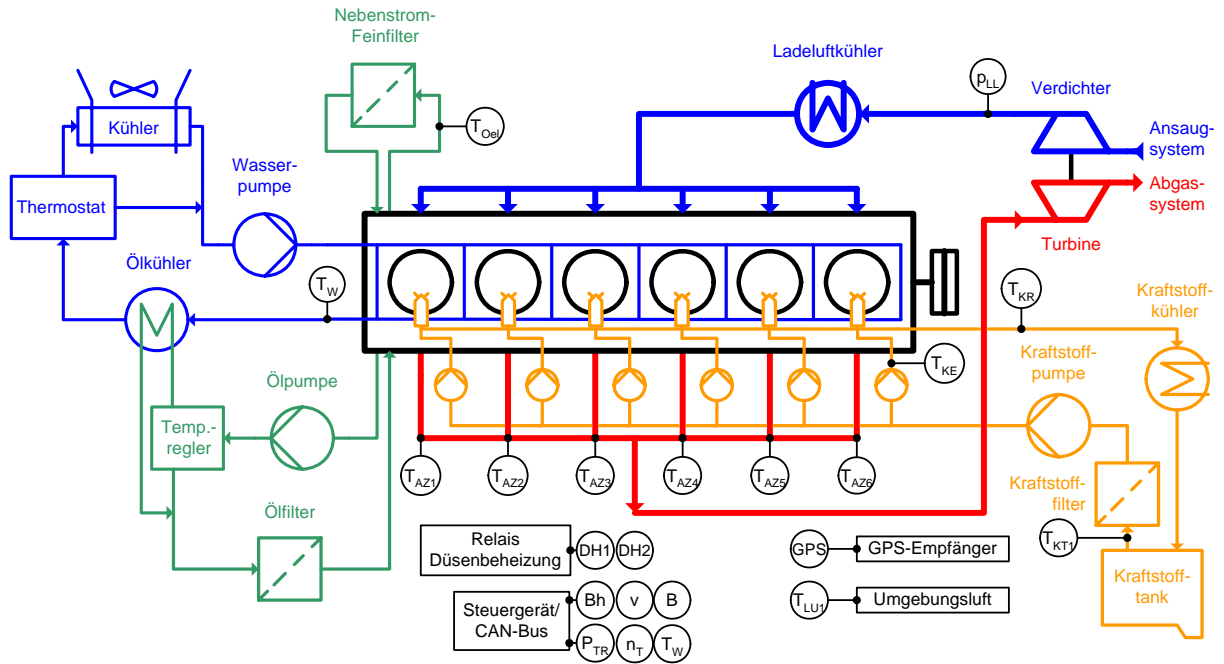


Abbildung 1: Betriebsdatenerfassung an einem Deutz-Fahr Agrotion TTV 1160 zur Durchführung von Emissionsmessungen



Abbildung 2: Einbauposition der Abgastemperatursensoren und des Motoröltemperatursensors an einem Deutz-Fahr Agrotion TTV 1160

4.2 Kraftstoff

4.2.1 Rapsölkraftstoff

Der für die Emissionsmessungen verwendete Rapsölkraftstoff, hergestellt in einer dezentralen Ölmühle nach dem Kaltpressverfahren ohne weitere Aufbereitung, entsprach bei allen Messungen den Anforderungen nach DIN V 51605. Die genauen Analyseergebnisse sind in Tabelle 3 aufgeführt. Weiterhin wurde für alle Rapsölkraftstoffproben die Elementarzusammensetzung analysiert und ein Elementscreening mittels ICP-OES¹ durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Kraftstoffuntersuchungen sind Tabelle 4 und Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 3: Anforderungen der DIN V 51605 und Qualität des für die Emissionsmessungen verwendeten Rapsölkraftstoffs

| Dichte (15 °C) in kg/m ³ DIN EN ISO 3675 | Flammpunkt in °C DIN EN ISO 2719 | Heizwert in MJ/kg DIN 51900-2 | Zündwilligkeit IP 498 | Kin. Viskosität (40 °C) in mm ² /s DIN EN ISO 3104 | Koksrückstand in Masse-% DIN EN ISO 10370 | Iodzahl in g/100 g DIN EN 14111 | Schwefelgehalt in mg/kg DIN EN ISO 20884 | Gesamtverschmutzung in mg/kg DIN EN 12662 | Säurezahl in mg KOH/g DIN EN 14104 | Oxidationsstabilität (110 °C) in h DIN EN 14112 | Phosphorgehalt in mg/kg DIN EN 14107 | Summengehalt Ca/Mg in mg/kg E DIN EN 14538 | Aschegehalt in Masse-% DIN EN ISO 6245 | Wassergehalt in Masse-% DIN EN ISO 12937 |
|---|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--|--|------------------------------------|---|--|---------------------------------------|--|---|---|---|---|
| Anforderungen der DIN V 51605 | | | | | | | | | | | | | | |
| 900-930 | min. 220 | min. 36,00 | min. 39 | max. 36 | max. 0,40 | 95-125 | max. 10 | max. 24 | max. 2,0 | min. 6,0 | max. 12 | max. 20 | max. 0,01 | max. 0,075 |
| Rapsölkraftstoffqualität bei den Emissionsmessungen am 23.05.2007 (1054 Bh) und 25.05.2007 (1073 Bh) | | | | | | | | | | | | | | |
| 919,0 | 254 | 37,25 | 47,8 | 35,2 | 0,17 | 108 | <1 | 8 | 0,69 | 9,8 | 4 | 8 | <0,001 | 0,054 |
| Rapsölkraftstoffqualität bei den Emissionsmessungen von 07.03.2007 (863 Bh) bis 27.03.2007 (875 Bh) | | | | | | | | | | | | | | |
| 919,9 | 234 | 37,42 | 47,3 | 34,64 | 0,16 | 112 | <1 | 2 | 0,95 | 7,9 | 8 | 16 | 0,003 | 0,049 |
| Rapsölkraftstoffqualität bei den Emissionsmessungen am 19.04.2006 (265 Bh) | | | | | | | | | | | | | | |
| 920,0 | 243 | 37,28 | 44,8 | 34,72 | 0,23 | 112 | <1 | 8 | 0,93 | 7,9 | 3 | 15 | 0,004 | 0,057 |

¹ Optische Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)

Tabelle 4: *Ergebnisse der Elementaranalyse des für die Emissionsmessungen verwendeten Rapsölkraftstoffs*

| Verwendungsdatum | Kohlenstoff in Masse-% | Wasserstoff in Masse-% | Sauerstoff in Masse-% | Stickstoff in mg/kg |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| 23.05. u. 25.05.2007 | 77,6 | 11,8 | 10,5 | 4 |
| 07.03 – 27.03.2007 | 77,9 | 12,0 | 10,0 | 5 |
| 19.04.2006 | 77,3 | 11,8 | 10,8 | 11 |

Tabelle 5: *Ergebnisse des Elementscreenings mittels ICP-OES des für die Emissionsmessung verwendeten Rapsölkraftstoffs*

| Verwendungsdatum | Aluminium in mg/kg | Silizium in mg/kg | weitere Elemente in mg/kg |
|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|
| 23.05. u. 25.05.2007 | 5 | 2 | <1 |
| 07.03 – 27.03.2007 | 5 | 2 | <1 |
| 19.04.2006 | <1 | 18 | <1 |

4.2.2 Dieselkraftstoff

Für den verwendeten Dieselkraftstoff wurde die Elementarzusammensetzung analysiert. Die Ergebnisse sind Tabelle 6 zu entnehmen. Die Qualität des für die Emissionsmessungen verwendeten Dieselkraftstoffs ist in Tabelle 7 aufgeführt. Über die Anforderungen der DIN EN 590 hinaus wird ein Elementscreening mittels ICP-OES durchgeführt. Die Ergebnisse sind Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 6: *Ergebnisse der Elementaranalyse des für die Emissionsmessungen verwendeten Dieselkraftstoffs*

| Verwendungsdatum | Kohlenstoff in Masse-% | Wasserstoff in Masse-% | Sauerstoff in Masse-% | Stickstoff in mg/kg |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| 24.05.2007 | 86,0 | 13,9 | <0,5 | 20 |
| 07.03 – 27.03.2007 | 85,6 | 13,6 | <0,5 | 28 |
| 22.03. – 19.04.2006 | 86,1 | 13,4 | 0,4 | 54 |

Tabelle 7: Anforderungen der DIN EN 590 und Qualität des für die Emissionsmessungen verwendeten Dieseldieselkraftstoffs

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|--|--|--------------------------|---|--|---|--|--|---|---|---|---|---|---|--|
| Dichte (15 °C) in kg/m ³ DIN EN ISO 12185 | Flammpunkt in °C DIN EN ISO 2719 | Cetanindex DIN EN ISO 12185 | Cetanzahl IP 498 | Kin. Viskosität (40 °C) in mm ² /s DIN EN ISO 3104 | Koksrückstand in Masse-% (10 % Destillationsrückstand) DIN EN ISO 10370 | CFPP in °C DIN EN 116 | Schwefelgehalt in mg/kg DIN EN ISO 20884 | Gesamtverschmutzung in mg/kg DIN EN 12662 | Korrosionswirkung auf Kupfer in Korrosionsklasse DIN EN ISO 2160 | Oxidationsstabilität in g/m ³ DIN EN ISO 12205 | HFRR (Lubricity) in µm DIN EN ISO 12156-1 | Aromatengehalt in Masse-% DIN EN 12916 | Aschegehalt in Masse-% DIN EN ISO 6245 | Wassergehalt in mg/kg DIN EN ISO 12937 | Fettsäuremethylestergehalt in Volumen-% DIN EN 14078 | Destillation % (V/V) aufgefangan bei 250 °C in Volumen-% DIN EN ISO 3405 | Destillation % (V/V) aufgefangan bei 350 °C in Volumen-% DIN EN ISO 3405 | Destillation 95 % (V/V) aufgefangan bei in °C DIN EN ISO 3405 |
| Anforderungen der DIN EN 590 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 820-845 | min. 55 | min. 46,0 | min. 51,0 | 2,00-4,50 | max. 0,30 | 2) | max. 10 ^{b)} | max. 24 | 1 | max. 25 | max. 460 | max. 11 | max. 0,01 | max. 200 | max. 5 | max. 65 | min. 85 | max. 360 |
| Dieseldieselkraftstoffqualität bei den Emissionsmessungen am 24.05.2007 (1064 Bh) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 829,8 | 65 | 51,9 | 54,6 | 2,33 | <0,01 | -13 | 6,7 | 5 | 1 | 23 | 217 | 3,2 | <0,001 | 35 | 4,5 | 45 | 95 | 349 |
| Dieseldieselkraftstoffqualität bei den Emissionsmessungen von 07.03.2007 (863 Bh) bis 27.03.2007 (875 Bh) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 839,8 | 72 | 51,5 | 52,4 | 2,75 | <0,01 | -26 | <1 | 2 | 1 | n.b. | 232 | 3,5 | <0,001 | 29 | 4,2 | 35 | 94 | 353 |
| Dieseldieselkraftstoffqualität bei den Emissionsmessungen vom 22.03.2006 (245 Bh) bis 19.04.2006 (265 Bh) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 836,9 | 61 | 50,2 | 53,0 | 2,52 | 0,02 | -18 | 6,9 | n.b. | 1 | 4 | 205 | 3,3 | 0,001 | 27 | 4,8 | 42 | 93 | 357 |

1) für schwefelfreien Dieseldieselkraftstoff

2) abhängig von der Jahreszeit

n.b.: nicht bestimmt

Tabelle 8: *Ergebnisse des Elementscreenings mittels ICP-OES des für die Emissionsmessung verwendeten Dieseldieselkraftstoffs*

| Verwendungsdatum | Aluminium in mg/kg | Silizium in mg/kg | weitere Elemente in mg/kg |
|-------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 24.05.2007 | 3 | 9 | <1 |
| 07.03 – 27.03.2007 | 3 | 11 | <1 |
| 22.03. – 19.04.2006 | <1 | 17 | <1 |

4.3 Prüfstand

Die Abgasemissionsmessungen wurden am Abgasprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) durchgeführt. Der Prüfstand ist konzipiert für die Messung von gasförmigen Abgasbestandteilen und Partikelemissionen von Traktormotoren im eingebauten Zustand. Die Emissionsmessungen am Prüfstand erfolgen in Anlehnung an die Richtlinie 2000/25/EG bzw. 97/68/EG. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, auch nicht in der Richtlinie genannte Emissionsbestandteile mit alternativen Messverfahren zu erfassen.

Im Folgenden werden der Aufbau des Prüfstands und die technischen Merkmale der einzelnen Prüfstandsbestandteile beschrieben.

4.3.1 Aufbau

In Abbildung 3 ist der schematische Aufbau des Abgasemissionsprüfstands am Technologie- und Förderzentrum dargestellt. Im Wesentlichen besteht der Prüfstand aus einer Zapfwellenbremse und einer Abgasmessstrecke. An der Abgasmessstrecke ist die Messung der gasförmigen Bestandteile und der Partikelemissionen sowohl im verdünnten als auch im unverdünnten Abgas möglich. Die Daten werden mit Hilfe eines Datenerfassungssystems (LabVIEWTM) aufgezeichnet.

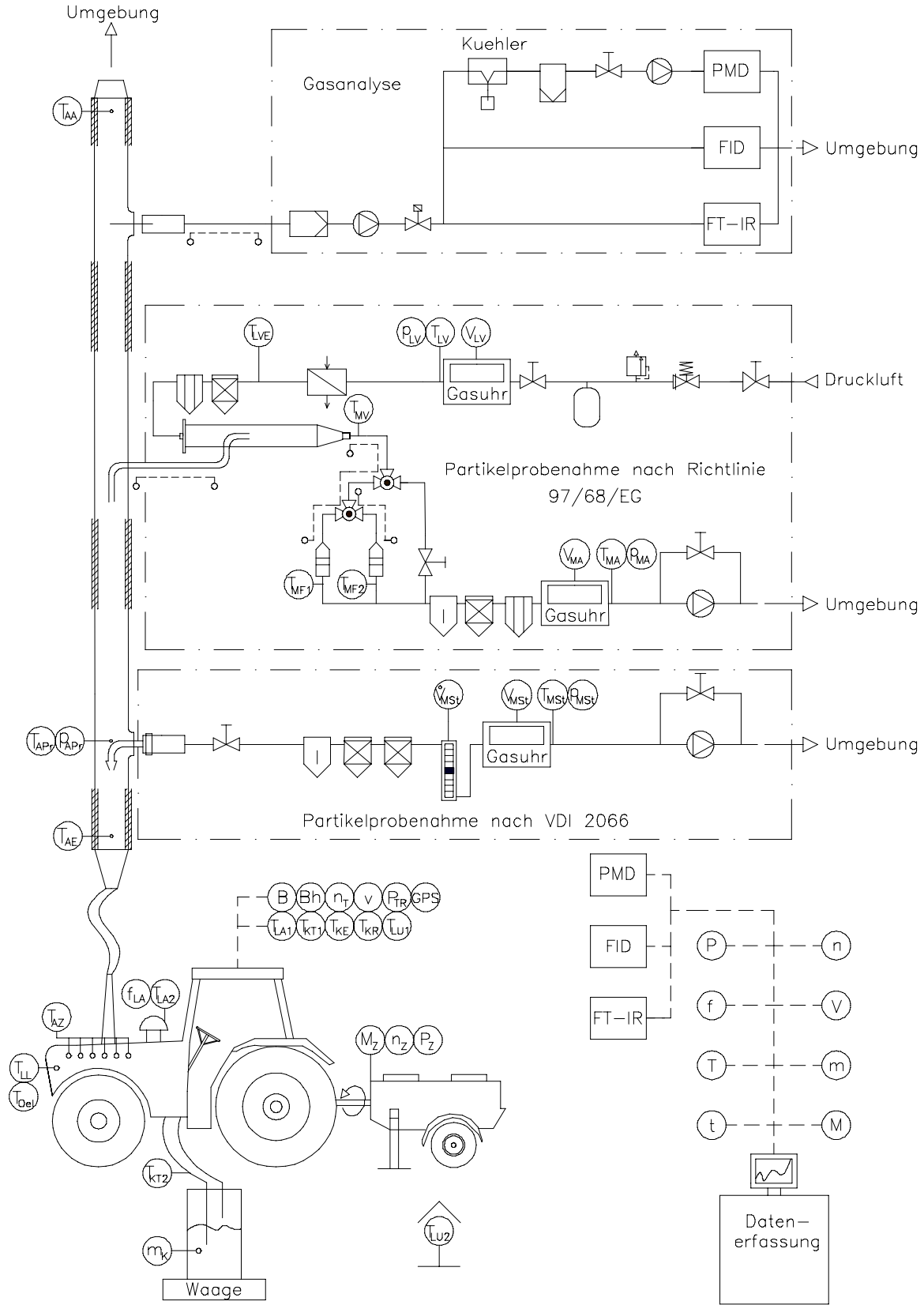


Abbildung 3: Aufbau des Emissionsprüfstands am Technologie- und Förderzentrum (TFZ)

4.3.2 Erfassung der Randbedingungen

Zur Erfassung der Randbedingungen bei den Emissionsmessungen werden wichtige Betriebszustände und Umgebungsbedingungen kontinuierlich aufgezeichnet. Tabelle 9 zeigt eine Übersicht über die während der Emissionsmessungen erfassten Messgrößen.

Tabelle 9: Erfasste Messgrößen mit Messstellen und Messgrößen-Aufnehmer am Abgasprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ)

| Messgrößen | Kürzel | Messstelle | Messgrößen-Aufnehmer |
|-------------------------------|------------------|--|------------------------------|
| Umgebung | | | |
| Temperatur Umgebungsluft | T _{LU1} | Kabinendach außen bei Rundumlampe | PT100 Thermofühler |
| Temperatur Umgebungsluft | T _{LU2} | Raumfühler neben Kabine auf Höhe Rücklicht | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Zeit | t | | |
| Traktor | | | |
| Betriebsstunden | Bh | | CAN-Bus Schlepper |
| GPS-Position | GPS | Traktor | GPS-Empfänger |
| Fahrgeschwindigkeit Schlepper | v | Getriebe | CAN-Bus Schlepper |
| Betrieb Düsenheizung 70 °C | DH1 | Relais Düsenheizung | Voltmeter |
| Betrieb Düsenheizung 100 °C | DH2 | Relais Düsenheizung | Voltmeter |
| Temperatur Ansaugluft | T _{LA1} | Einlassgitter im Ansaugluftkanal | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Temperatur Ansaugluft | T _{LA2} | Einlassgitter im Ansaugluftkanal | Datenlogger Wöhler DC2000Pro |
| Feuchte Ansaugluft | f _{LA} | Einlassgitter im Ansaugluftkanal | Datenlogger Wöhler DC2000Pro |
| Temperatur Ladeluft | T _{LL} | nach Ladeluftkühler | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Ladedruck | p _{LL} | nach Abgasturbolader | CAN-Bus Schlepper |
| Temperatur Kraftstoff | T _{KT1} | Kraftstoffvorlaufleitung direkt nach Tank | PT100 Thermofühler |
| Temperatur Kraftstoff | T _{KT2} | Kraftstoffvorlaufleitung aus Behälter Versuchskraftstoff | PT100 Thermofühler |
| Temperatur Kraftstoff | T _{KE} | Anlegefühler an Einspritzleitung (Zylinder 1) | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Temperatur Kraftstoff | T _{KR} | Rücklauf direkt nach Zylinderkopf (vor Kraftstoffkühler) | CAN-Bus Schlepper |
| Kraftstoffverbrauch | B | berechneter Wert | CAN-Bus Schlepper |

Tabelle 9: Erfasste Messgrößen mit Messstellen und Messgrößen-Aufnehmer am Abgasprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) (Fortsetzung)

| Messgrößen | Kürzel | Messstelle | Messgrößen-Aufnehmer |
|---------------------------------------|-------------------|--|---|
| Traktor | | | |
| Temperatur Abgas (einzelne Zylinder) | T_{AZ1-6} | jeweils direkt nach Ausgang Zylinderkopf im Krümmer | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Temperatur Motoröl | T_{Oel} | im Nebenstrom vor Nebenstromölfilter | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Temperatur Kühlwasser | T_W | Kühlwasseraustritt aus Zylinderkopf | CAN-Bus Schlepper |
| Motordrehzahl | n_{T1} | Kurbelwelle | CAN-Bus Schlepper |
| Motordrehzahl | n_{T2} | Zapfwelle | Eggers Wirbelstrombremse PT 301 MES (berechnet) |
| Last | P_{TR} | Gaspedalstellung | CAN-Bus Schlepper |
| Drehmoment | M_Z | Zapfwelle | Eggers Wirbelstrombremse PT 301 MES |
| Drehzahl | n_Z | Zapfwelle | Eggers Wirbelstrombremse PT 301 MES |
| Leistung | P_Z | Berechnet aus Drehzahl und Drehmoment an der Zapfwelle | Eggers Wirbelstrombremse PT 301 MES |
| Masse Kraftstoff | m_K | Versuchskraftstoffbehälter auf Waage | Waage PESA WT BR 210/B3, 150 kg |
| Abgasmessstrecke | | | |
| Temperatur Abgas einzelne Zylinder | T_{AZ1-6} | jeweils direkt nach Ausgang Zylinderkopf im Krümmer | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Temperatur Abgas | T_{AE} | Eingang Abgasstrecke | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Temperatur Abgas | T_{AA} | Ausgang Abgasstrecke | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Verdünnungsluftvolumen | V_{LV} | vor Verdünnungstunnel | Balgengaszähler mit Impulszähler |
| Temperatur Verdünnungsluft | T_{LV} | direkt nach Balgengaszähler | PT100 Thermofühler |
| Druck Verdünnungsluft | p_{LV} | direkt nach Balgengaszähler | Drucktransmitter Althen HPSA-ADVDA |
| Temperatur Verdünnungsluft | T_{LVE} | vor Eingang Verdünnungstunnel | PT100 Thermofühler |
| Temperatur verdünntes Abgas (Messgas) | T_{MV} | Ausgang Verdünnungstunnel | PT100 Thermofühler |
| Temperatur verdünntes Abgas (Messgas) | T_{MF1}/T_{MF2} | unmittelbar nach Planfilterhalter | PT100 Thermofühler |

Tabelle 9: Erfasste Messgrößen mit Messstellen und Messgrößen-Aufnehmer am Abgasprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) (Fortsetzung)

| Messgrößen | Kürzel | Messstelle | Messgrößen-Aufnehmer |
|---------------------------------------|-----------------|---|------------------------------------|
| Abgasmessstrecke | | | |
| Volumen verdünntes Abgas (Messgas) | V_{MA} | nach Planfilterhalter vor Absaugpumpe | Balgengaszähler mit Impulszähler |
| Temperatur verdünntes Abgas (Messgas) | T_{MA} | Ausgang Messstrecke direkt nach Messgasvolumenmessung | PT100 Thermofühler |
| Druck verdünntes Abgas (Messgas) | p_{MA} | Ausgang Messstrecke direkt nach Messgasvolumenmessung | Drucktransmitter Althen HPSA-ADVDA |
| Staub-Probenahme VDI 2066 | | | |
| Temperatur Abgas | T_{APr} | Abgasstrecke bei Prandtl-Rohr | Mantel-Thermoelement Typ K |
| Dynamischer Druck | p_{APr} | Abgasstrecke an VDI 2066 Entnahmeöffnung | Prandtl-Rohr |
| Messgasvolumen VDI2066 | V_{MSt} | vor Absaugpumpe | Balgengaszähler |
| Temperatur Messgas | T_{MSt} | vor Gasuhr VDI-Messung | Analoges Anzeigegerät |
| Druck Messgas | P_{MSt} | vor Gasuhr VDI-Messung | Analoges Anzeigegerät |
| Messgasvolumenstrom | \dot{V}_{MSt} | vor Gasuhr VDI-Messung | Schwebekörperdurchflussmesser |

4.3.3 Bestimmung von Motorleistung, Motordrehzahl und Kraftstoffverbrauch

Die Bestimmung der Motorleistung und Motordrehzahl nach Richtlinie 2000/25/EG erfolgt an einem Motorenprüfstand direkt an der Kurbelwelle. Dazu ist es notwendig, den Motor aus dem Fahrzeug auszubauen. Da bei dem Forschungsvorhaben vor allem die Abgasemissionen von Traktormotoren, die in der Praxis in Betrieb sind, getestet werden sollen, ist eine Bestimmung der Motorleistung im ausgebauten Zustand nicht beabsichtigt. Daher sind Abweichungen zum Typprüfungsverfahren erforderlich. Am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums wird die Motorleistung des Traktors P_T über die Zapfwellenleistung P_Z bestimmt, unter Berücksichtigung eines durchschnittlichen Übertragungsverlustes von 10 % [7]. Die Motordrehzahl n_T wird über die Zapfwellendrehzahl n_Z und das Übersetzungsverhältnis des Getriebes bestimmt.

Die Zapfwellenleistung P_Z wird über eine Wirbelstrombremse (EGGERS PT 301 MES, max. 340 kW, Auflösung 0,1 kW) durch Messung von Drehmoment M_Z und Drehzahl n_Z ermittelt.

Tabelle 10 gibt einen Überblick über die Abweichungen bei den Emissionsmessungen im Vergleich zur Typprüfung nach der Richtlinie 2000/25/EG.

Tabelle 10: Abweichungen zum Typprüfungsverfahren nach Richtlinie 97/68/EG

| Vorgehen nach Richtlinie 97/68/EG | Vorgehen bei den Prüfstandsmessungen |
|--|---|
| Stationäre Messung der Nutzleistung auf dem Motorenprüfstand direkt an der Kurbelwelle | Bestimmung der Nutzleistung des Motors P_T über die Zapfwellenleistung P_Z bei einem angenommenen durchschnittlichen Übertragungsverlust von 10 % [7] |
| Messung der Drehzahl am Motorprüfstand direkt an der Kurbelwelle | Bestimmung der Motordrehzahl n_T über die Zapfwellendrehzahl n_Z |

Der Kraftstoffverbrauch wird gravimetrisch mittels einer Waage (PESA WT BR 210/B3, max. 150 kg) erfasst. Dazu wird am Traktor das Kraftstoffsystem am Tank aufgetrennt und Kraftstoffvorlauf und -rücklauf in einen Versuchskraftstoffbehälter geleitet, dessen Gewicht über die Waage erfasst wird. Abbildung 4 zeigt den Aufbau zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs.



Abbildung 4: Aufbau zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs mittels Wägung des Versuchskraftstoffbehälters

4.3.4 Gasanalyse

Eine Übersicht über die technischen Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile gibt Tabelle 11. Alle Messwerte werden kontinuierlich in einem Abstand von maximal 20 Sekunden erfasst und mit Hilfe des Datenerfassungssystems (LabVIEW™) aufgezeichnet.

Bei den Emissionsmessungen werden die gasförmigen Abgaskomponenten Kohlenstoffdioxid (CO₂), Wasser (H₂O), Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂), Sauerstoff (O₂) und Kohlenwasserstoff (C_nH_m) erfasst. Als Stickstoffoxidemission (NO_x) wird der Summenwert von NO und NO₂ herangezogen.

Tabelle 11: Technische Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile

| Messgröße | Messgerät/Hersteller | Messprinzip/ -verfahren | aktiver Messbereich | Prüfgas- konzentration ¹⁾ |
|---|---|--|---|---|
| CO ₂ | FT-IR Gasmeter –4000 Fa. Ansyco | Fourier-transformierte Infrarotabsorption | 0 – 25 Vol.-% | 2 % CO ₂ in N ₂ |
| H ₂ O | FT-IR Gasmeter –4000 Fa. Ansyco | Fourier-transformierte Infrarotabsorption | 0 – 30 Vol.-% | -- |
| CO | FT-IR Gasmeter –4000 Fa. Ansyco | Fourier-transformierte Infrarotabsorption | 0 – 15 000 ppm | 0,9 % CO in N ₂ |
| NO NO ₂ ³⁾ | FT-IR Gasmeter –4000 Fa. Ansyco | Fourier-transformierte Infrarotabsorption | 0 – 2000 ppm 0 – 1500 ppm | 900 ppm NO in N ₂ |
| O ₂ | Sauerstoffanalysator PMA 100-L Fa. M&C Products | Paramagnetismus | 0 – 100 Vol.-% | |
| C _n H _m ²⁾ | Thermo-FID Fa. Mess- & Analysen- technik GmbH | Flammenionisation | 0 – 10 000 ppm C ₃ H ₈ -Äquivalent | 80,7 ppm C ₃ H ₈ in N ₂ |

¹⁾ relative Genauigkeit des Prüfgases: ± 1 % (lt. Herstellerangabe)

²⁾ Summe der flüchtigen organischen Verbindungen; Messung im heißen Abgas

³⁾ NO_x = NO + NO₂

4.3.5 Partikelmassebestimmung

Am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums können die Partikelemissionen diskontinuierlich nach VDI 2066 im heißen Abgas und nach den Vorgaben der Richtlinie 97/68/EG bzw. ISO 8178 im verdünnten Abgas erfasst werden.

Bei der Messung nach **VDI 2066** Blatt 1 am Prüfstand wird aus dem Abgasstrom ein Teilgasstrom isokinetisch abgesaugt und die darin mitgeführten Partikel in einer außerhalb der Abgasmessstrecke befindlichen Abscheidevorrichtung (Out-Stack-Filtration) gesammelt. Zur Abscheidung dienen Quarz-Mikrofaserfilter (Munktell, MK 360, getempert, Durchmesser 45 mm) mit einem Abscheidegrad von 99,998 % und einer Penetration von <0,002 % Dioctylphtalat (DOP 0,3 µm). Damit werden auch die Anforderungen der Richtlinie 97/68/EG an den Abscheidegrad des Filtermaterials eingehalten. Als Filtergehäuse wird ein Planfilterkopf nach VDI 2066 verwendet. Im

Anschluss an die Abscheidevorrichtung befindet sich die Absaugapparatur. Diese besteht aus einer Einheit zur Gastrocknung, den Geräten zur Ermittlung des Volumenstromes sowie des Gaszustandes und einer Saugpumpe. Mit Hilfe eines Schwebekörper-Durchflussmessgerätes wird der für die isokinetische Probenahme erforderliche Volumenstrom am Bypass der Pumpe eingestellt.

Bei der Messung nach Richtlinie **97/68/EG**, welche im Wesentlichen auf der ISO 8178 beruht, wird aus dem Abgasstrom ein Teilgasstrom entnommen. Der Teilgasstrom wird über ein auf 250 °C beheiztes Übertragungsrohr in den Verdünnungstunnel geleitet. Über die Zufuhr von Verdünnungsluft wird der verdünnte Abgasstrom unmittelbar über dem Filterhalter auf Temperaturen zwischen 42 °C und 52 °C gehalten. Die Verdünnungsluft wird aus dem Druckluftnetz entnommen und erfüllt die Druckluftklasse 1.4.1 nach ISO 8573. Das Verdünnungsluftvolumen wird über einen Balgengaszähler (Elster, Experimentiergaszähler trockene Bauart, Messgenauigkeit $\pm 2\%$, Ablesegenauigkeit 0,1 l) erfasst. Die Verdünnungsluft wird über einen Wärmetauscher auf Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C konditioniert und anschließend über einen Aktivkohlefilter (Riegler, FA 33 K) und über einen Mikrofilter (Riegler, FM 33 K, Borosilikat-POM, Filterfeinheit 0,01 μm , Wirkungsgrad 99,999 %) weiter aufbereitet.

Die Partikelabscheidung erfolgt in einem Filtergehäuse durch ein im Abstand von 17 mm hintereinander angeordnetes Filterpaar (Hauptfilter und Nachfilter). Zur Abscheidung dienen teflonbeschichtete Glasfaserfilter (Pall Life Sciences, EmfabTM Filters, TX40HI20WW, 44 mm Durchmesser) mit einem Abscheidegrad von 99,9 % Dioctylphtalat (DOP 0,3 μm).

Nach der Partikelabscheidung wird das verdünnte Abgas getrocknet und gefiltert, bevor das Volumen über einen Balgengaszähler (Elster, Experimentiergaszähler trockene Bauart, Messgenauigkeit $\pm 2\%$, Ablesegenauigkeit 0,1 l) erfasst wird. Alle Temperaturen, Drücke und Volumina werden kontinuierlich mit Hilfe des Datenerfassungssystems (LabVIEWTM) aufgezeichnet.

Zur Bestimmung der Gewichte der Filter wird für beide Probenahmeverfahren eine Analysenwaage mit einer Auflösung von 1 μg und einer Genauigkeit von 1,5 μg (Mettler-Toledo, Mikrowaage XP 56) verwendet. Die Filter werden vor der Auswägung zur Konditionierung mindestens 12 h in einem klimatisierten Raum bei 23 °C gelagert.

Eine davon abweichende Vorgehensweise bei der Rückwägung der beladenen Filter im Rahmen der Mutagenitätsuntersuchungen wird in Kapitel 4.4.3 beschrieben.

4.4 Durchführung der Emissionsmessungen

Die Emissionsmessungen erfolgen in Anlehnung an die EU-Richtlinie 2000/25/EG. Diese verweist bei den Anforderungen, Grenzwerten und Prüfverfahren auf die EU-Richtlinie 97/68/EG [2] [3]. Für Traktormotoren bis Abgasstufe IIIA findet der sogenannte Non-Road-Steady-Cycle (NRSC) Anwendung, welcher dem C1-Zyklus (8-Phasen-Zyklus) der ISO 8178-4 entspricht.

4.4.1 Vorbereitung des Traktors und des Prüfstands

Da sich der Traktor im täglichen Einsatz auf dem Feld befindet, muss dieser auf die Durchführung der Emissionsmessungen vorbereitet werden.

Vor Beginn einer Messkampagne werden folgende Maßnahmen durchgeführt:

- Erneuerung des Ansaugluftfilters
- Kontrolle und Reinigung des Kühlsystems
- Deaktivierung aller nicht benötigten Nebenverbraucher
- Durchführung eines Motorenöl- und Motorenölfilterwechsels (Ölsorte: esterbasisches Motorenöl Fuchs Plantomot 5W-40)
- Kontrolle und Erneuerung der weiteren Betriebsmittel je nach Bedarf
- Auftrennung des Kraftstoffsystems direkt am Tank und Verlegung von Kraftstoffvorlauf und -rücklauf in den Versuchskraftstoffbehälter

Während einer Messkampagne wird darüber hinaus bei jedem Kraftstoffwechsel das Kraftstoffsystem mit mindestens 10 l Versuchskraftstoff gespült und anschließend ein Kraftstofffilterwechsel durchgeführt.

Für die Emissionsmessungen zur Bestimmung der Mutagenität der Partikelemission wird im speziellen vor jedem Kraftstoffwechsel auch ein Motorenöl- und Motorenölfilterwechsel durchgeführt, um vergleichbare Bedingungen herzustellen. Für die Emissionsmessungen bei den Mutagenitätsuntersuchungen mit Dieselkraftstoff werden wesentliche Teile der Umrüstung, nämlich die Beheizung der Einspritzdüsen und die Kraftstoffvorwärmung, deaktiviert, um den Motor annähernd in den Ursprungszustand zurückzusetzen. Es wird jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der Motor bei den Messungen nicht vollständig in den Ursprungszustand vor der Umrüstung zurückversetzt werden kann.

4.4.2 NRSC-Prüfzyklus

Vor Beginn der eigentlichen Abgasmessungen wird der Leistungs- und Drehmomentverlauf über die Drehzahl aufgenommen, um die Last- und Drehzahleinstellung für die acht Phasen zu ermitteln. Bei Durchführung einer Messung gemäß dem NRSC-Prüfzyklus nach Richtlinie 97/68/EG werden die Prüfphasen der Reihe nach von eins bis acht durchlaufen. Anhand der kontinuierlich gemessenen Abgastemperaturen, Motortemperaturen und der Schadstoffkonzentrationen im Abgas wird die Motorstabilisierung für jede einzelne Prüfphase abgewartet. Erst im Anschluss an die Motorstabilisierung bzw. erst nach mindestens zehn Minuten wird mit der Partikelprobenahme begonnen. Zur Auswertung der gasförmigen Emissionen werden die Messwerte der letzten sechs Minuten vor Beendigung der Partikelprobenahme herangezogen.

Die Ergebnisse der Schadstoff- und Leistungsmessungen aus den einzelnen Prüfphasen fließen mit unterschiedlicher Wichtung in die Berechnung der spezifischen Emissionen ein [3]. Abbildung 5 zeigt die Lage der Prüfphasen im Leistungs-/Drehmomentdiagramm. Tabelle 12 gibt einen Überblick zu den einzelnen Prüfphasen.

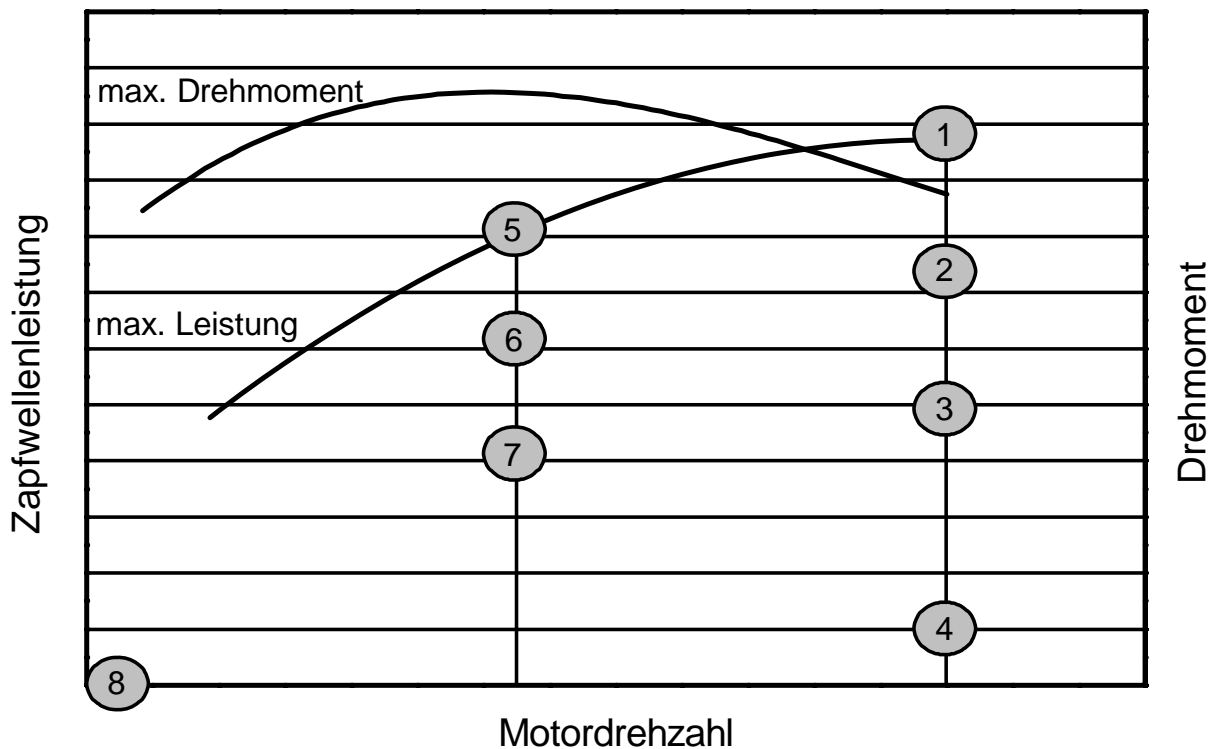


Abbildung 5: Lage der Prüfphasen im Leistungs-/Drehmomentdiagramm

Tabelle 12: Übersicht zu den acht Prüfphasen nach Richtlinie 97/68/EG [3]

| Phase | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------|---------------|------|------|-----|------------------|-----|-----|----------|
| Last in % | 100 | 75 | 50 | 10 | 100 | 75 | 50 | 0 |
| Drehzahl | Nenn Drehzahl | | | | Zwischendrehzahl | | | Leerlauf |
| Wichtungsfaktor | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,15 |

4.4.3 Partikelprobenahme für die Mutagenitätstests

Zur Bestimmung der mutagenen Wirkung von Partikeln aus rapsöl- bzw. dieselmotoren betriebenen Dieselmotoren werden die Partikel auf teflonbeschichteten Glasfaserfiltern (Pall Life Sciences, EmfabTM Filters, TX40HI20WW, 44 mm Durchmesser) gesammelt.

Um Verfälschungen der Untersuchungsergebnisse bei den Mutagenitätsmessungen zu vermeiden, werden die Filter, sowie alle Flächen, mit denen die Filter in Kontakt kommen, mit Dichlormethan (>99,8 %, für die Rückstandsanalyse) gereinigt.

Nach folgender Vorgehensweise werden die Filter vorbereitet:

- Waschung der Petrischalen zur Filteraufbewahrung mit Dichlormethan
- Lagerung der Petrischalen bis zur weiteren Verwendung in Exsikkatoren
- Waschung der einzelnen Filter mit Dichlormethan
- Aufbewahrung der Filter in den gereinigten Petrischalen in Exsikkatoren
- Entnahme der Petrischalen aus den Exsikkatoren mindestens vier Stunden vor Auswiegung der Filter; Temperatur- und Feuchteconditionierung in einem klimatisierten Raum
- Waschung des Filterhalters der Analysenwaage mit Dichlormethan
- Wägung der Filter
- Aufbewahrung der Filter in geschlossenen Petrischalen im klimatisierten Raum bis zur Durchführung der Partikelprobenahme

Die Partikelprobenahme erfolgt in Anlehnung an die Richtlinie 97/68/EG aus dem verdünnten Abgas. Die unterschiedliche Wichtung der einzelnen Prüfphasen erfolgt in Übereinstimmung mit den Angaben in Anhang III 3.7.5. nach der Probenahmedauer [3]. Tabelle 13 zeigt eine Übersicht über die Dauer der Partikelprobenahme.

Tabelle 13: Übersicht zur Dauer der Partikelprobenahme bei den einzelnen Prüfphasen des 8-Phasen-Zyklus in Anlehnung an die Richtlinie 97/68/EG

| Phase | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------|--------------|----------|----------|----------|------------------|----------|----------|----------|
| Last in % | 100 | 75 | 50 | 10 | 100 | 75 | 50 | 0 |
| Drehzahl | Nenndrehzahl | | | | Zwischendrehzahl | | | Leerlauf |
| Probenahmezeit in s | 900 | 900 | 900 | 600 | 600 | 600 | 600 | 900 |

Um die Anforderungen des maximalen Druckabfalls über das Filterpaar von 25.000 Pa nach Richtlinie 97/68/EG Anhang III Anlage 1 zu erfüllen, wird für jede einzelne Prüfphase ein neues Filterpaar beladen. Dadurch können Beschädigungen des Filtermaterials aufgrund erhöhter Druckverluste über die Filter ausgeschlossen und gleichzeitig die für die Untersuchungen notwendigen Partikelmengen von insgesamt ca. 30 mg pro Prüfzyklus gesammelt werden. Alle während eines Prüfzyklus beladenen Filterpaare werden als eine Gesamtprobe hinsichtlich der mutagenen Wirkung untersucht.

Zusätzlich zu den Gesamtproben des 8-Phasen-Zyklus wird die Phase 8 (Leerlauf) gesondert betrachtet. Hierzu verbleibt der Traktor nach Durchlauf des letzten Prüfzyklus im Leerlauf und es werden vier weitere Filterpaare mit Partikeln beladen. Die Partikelprobenahmezeit beträgt je Filterpaar 900 s. Für die Partikelproben aus dem Betrieb mit Rapsölkraftstoff zur Untersuchung der mutagenen Wirkung werden das erste und das dritte Filterpaar, bzw. das zweite und das vierte

Filterpaar zusammen untersucht, um die notwendige Partikelmasse von ca. 30 mg je Probe zu erreichen. Für den Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff werden, aufgrund der geringeren Partikelmasse während der Probenahmezeit, alle vier Filterpaare als eine Probe hinsichtlich der mutagenen Wirkung untersucht.

Das Bestücken der Filterhalter bzw. die Partikelprobenahme erfolgt bei jeder Beladung eines Filterpaares nach folgender Vorgehensweise:

- Waschung des Wägigitters an der Filterwaage mit Dichlormethan
- Waschung des Filterhalters und der Dichtungen des Filterhalters mit Dichlormethan (Abbildung 6)
- Einlegen der Filter in die Filterhalter
- Einlegen des bestückten Filterhalters in die Partikelprobenahmeverrichtung am Verdünnungstunnel
- Durchführung der Partikelprobenahme
- Entfernen des beladenen Filterhalters (Abbildung 6)
- Auswägung der Filter mit der Filterwaage
- Lagerung der Filter im Kühlraum bei 6 bis 10 °C



Abbildung 6: Waschung der Filterhalter mit Dichlormethan (links) und Entfernung des beladenen Filterhalters aus der Partikelprobenahmeverrichtung (rechts)

Am Ende des Versuchstages werden die zuvor im Kühlraum bei 5 °C gelagerten Filter bei –20 °C eingelagert, bis sie am Ende des Versuchsprogramms in tiefgekühltem Zustand zum Analyselabor transportiert werden.

Abweichend zu der in Kapitel 4.3.5 beschriebenen Filterkonditionierung werden die Filter bereits nach max. fünf Minuten ausgewogen, um diese für die Mutagenitätsbestimmung in möglichst unverfälschtem beladenen Zustand zu erhalten. Um zu ermitteln, in wie weit sich hier Differenzen beim Filtergewicht zur üblichen Vorgehensweise ergeben, wurden Vorversuche durchgeführt. Bei den Vorversuchen wurde der Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 mit Rapsölkraftstoff betrieben und

die Partikelprobenahme entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass die beladenen Filter nach einer Lagerdauer von 13 bis 20 h im klimatisierten Raum ein um durchschnittlich 1,0 % geringeres Gewicht aufwiesen, als die direkt nach der Probenahme ausgewogenen Filter. Die maximale Abweichung bei einer Einzelwägung betrug für ein Filterpaar, beladen in Phase 7, max. 4,8 %. Somit zeigt sich, dass auch ohne Filterkonditionierung eine hinreichend genaue Filterwägung möglich ist. Die Ergebnisse der Vorversuche sind aus Tabelle 14 zu entnehmen.

Tabelle 14: *Ergebnisse der Vorversuche zur Ermittlung des Einflusses der Filterkonditionierung auf das Filtergewicht*

| Phase | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|----------|-------|-------|------------------|-------|-------|----------|--------|
| Last in % | 100 | 75 | 50 | 10 | 100 | 75 | 50 | 0 |
| Drehzahl | Nennzahl | | | Zwischendrehzahl | | | Leerlauf | |
| Probenahmezeit in s | 900 | 900 | 900 | 600 | 600 | 600 | 600 | 900 |
| Wägung 1 in mg direkt nach Probenahme | 1,414 | 1,863 | 1,145 | 1,751 | 1,155 | 1,77 | 2,681 | 14,294 |
| Wägung 2 in mg | 1,419 | 1,863 | 1,114 | 1,727 | 1,140 | 1,760 | 2,559 | 14,268 |
| Zeit zw. Wägung 1 u. 2 in h | 19,5 | 18,0 | 17,5 | 16,5 | 16,0 | 15,0 | 14,5 | 13,0 |
| Differenz zu Wägung 1 | 0,4% | 0,0% | -2,8% | -1,4% | -1,3% | -0,6% | -4,8% | -0,2% |
| Wägung 3 in mg | 1,418 | 1,872 | 1,122 | 1,740 | 1,163 | 1,783 | 2,576 | 14,288 |
| Zeit zw. Wägung 1 u. 3 in h | 20,0 | 18,5 | 18,0 | 17,0 | 16,5 | 15,5 | 15,0 | 13,5 |
| Differenz zu Wägung 1 | 0,3% | 0,5% | -2,0% | -0,6% | 0,7% | 0,7% | -4,1% | 0,0% |

4.5 Versuchsvarianten

Im Rahmen der Untersuchungen zur Mutagenität der Partikelemission werden insgesamt acht Versuchsvarianten ausgewählt. Abbildung 7 zeigt eine Übersicht über alle Versuchsvarianten.

Die Emissionsmessungen werden sowohl mit Rapsölkraftstoff als auch mit Dieseldieselkraftstoff durchgeführt, wobei der Motor durch die Umrüstung nach dem Ein-Tank-System der Firma Hausmann auf den Rapsölkraftstoffbetrieb optimiert ist. Beim Betrieb des Traktors mit Dieseldieselkraftstoff werden die wesentlichen Teile der Umrüstung, die Düsenstockheizung und die Kraftstoffvorwärmung, deaktiviert, um den Traktor so annähernd in den Ausgangszustand vor der Umrüstung zurückzusetzen.

Der Prüfzyklus wird für jeden Kraftstoff zweimal durchlaufen, so dass für jeden Kraftstoff zwei Partikelproben für die Mutagenitätsuntersuchungen bereitgestellt werden können.

Die Prüfphase 8 (Leerlauf) wird gesondert betrachtet, da dieser Betriebszustand hinsichtlich des Kontakts mit dem Abgas eine besondere Relevanz aufweist. Für die Untersuchungen beim Betrieb

des Traktors mit Rapsölkraftstoff werden zwei Partikelproben genommen und untersucht, beim Betrieb des Traktors mit Dieseldkraftstoff eine Partikelprobe.

Darüber hinaus wird eine Blindprobe (Blank) hergestellt, um Kontaminationen mit mutagenen Substanzen beim Versuchsablauf feststellen zu können. Mit der Blindprobe wird nach der beschriebenen Vorgehensweise verfahren, mit dem Unterschied, dass die Filter im Filterhalter nicht mit Abgas beaufschlagt werden.

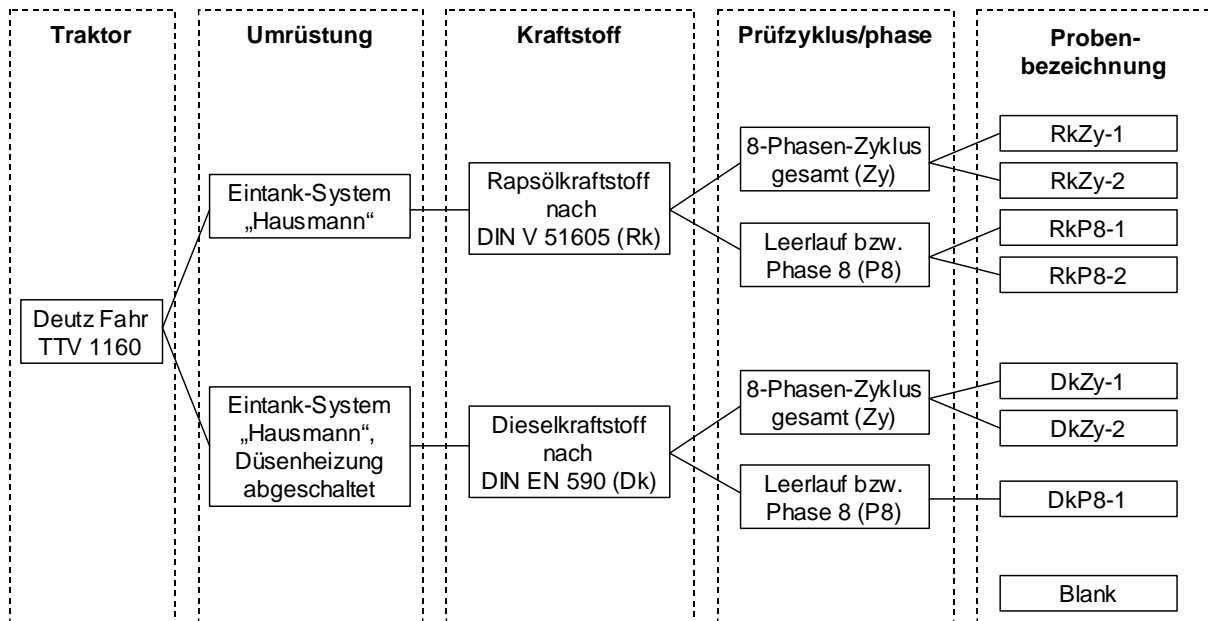


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Versuchsvarianten für die Emissionsmessungen zur Bestimmung der mutagenen Wirkung von Partikeln

4.6 Auswertung

Die Auswertung und Angabe der Ergebnisse der Emissionsmessungen erfolgt im Wesentlichen nach Richtlinie 97/68/EG. Da die Verwendung von Rapsölkraftstoff als Prüfkraftstoff nicht vorgesehen ist und aufgrund der Anwendung alternativer Messmethoden am Prüfstand des TFZ, sind zum Teil alternative Berechnungsmethoden anzuwenden. Die von der Richtlinie abweichenden Berechnungsmethoden werden im Folgenden beschrieben.

Berechnung des Abgasmassenstromes

Nach Anhang III Anlage 1 Abschnitt 1.2.5 kann der Abgasmassenstrom über die Messung des Luftdurchsatzes und des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses berechnet werden. Abweichend davon wird für die Bestimmung des Abgasmassenstromes je Prüfphase am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) anstelle des Luftdurchsatzes der Kraftstoffdurchsatz herangezogen.

Der Abgasmassenstrom berechnet sich nach folgender Formel:

$$G_{EXHW} = G_{FUEL} \cdot \left(1 + \lambda \cdot \frac{A}{F_{St}} \cdot \left(1 + \frac{H_a}{1000} \right) \right)$$

| | |
|------------|--|
| G_{EXHW} | Abgasmassenstrom, feucht [kg/h] |
| G_{FUEL} | Kraftstoffmassenstrom (Mittelwert je Prüfphase) [kg/h] |
| λ | Relatives-Luft-Kraftstoff-Verhältnis [-] |
| A/F_{St} | Stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis [kg Luft/kg Kraftstoff] |
| H_a | absolute Feuchtigkeit der Ansaugluft [g H ₂ O/kg Luft] |

Das stöchiometrische Luft-Kraftstoff-Verhältnis beträgt für Dieselkraftstoff 14,5 kg Luft pro kg Kraftstoff [3]. Für Rapsölkraftstoff sind in der Richtlinie keine Angaben zum stöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Verhältnis genannt, daher wird dieses anhand der Elementarzusammensetzung nach folgender Formel berechnet:

$$\frac{A}{F_{St}} = \left(\frac{\left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \cdot \frac{\text{kmol O}_2}{\text{kg Rapsöl}}}{0,21 \cdot \frac{\text{kmol O}_2}{\text{kmol Luft}}} \right) \cdot M_{Air}$$

| | |
|------------|--|
| A/F_{St} | Stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis [kg Luft/kg Kraftstoff] |
| C | Gravimetrischer Kohlenstoffanteil im Rapsölkraftstoff [-] |
| H | Gravimetrischer Wasserstoffanteil im Rapsölkraftstoff [-] |
| S | Gravimetrischer Schwefelanteil im Rapsölkraftstoff [-] |
| O | Gravimetrischer Sauerstoffanteil im Rapsölkraftstoff [-] |
| M_{Air} | molare Masse der Luft; 28,9626 [kg/kmol] |

Für Rapsölkraftstoff ergibt sich ein stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis von 12,49 kg Luft pro kg Kraftstoff.

Das relative Luft-Kraftstoff-Verhältnis λ kann für Dieselkraftstoff anhand der Richtlinie aus den Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid (CO_2), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoff (HC) berechnet werden. Zur Berechnung des relativen Luft-Kraftstoff-Verhältnisses von Rapsölkraftstoff werden in der Richtlinie keine Angaben gemacht. Zur Bestimmung von λ für die Emissionsmessungen mit Rapsölkraftstoff findet eine zweimalige Kohlenstoffbilanz, unter Berücksichtigung einer unvollständigen Verbrennung (Kohlenwasserstoffe (HC) werden vernachlässigt), nach folgenden Formeln Anwendung:

$$\lambda = 1 + \frac{V_{\min t}}{A / F_{St}} \cdot \left(\frac{\text{CO}_{2\max t}}{\text{CO}_{2t} + \text{CO}_t} - 1 \right)$$

| | |
|-----------------------|--|
| λ | Relatives-Luft-Kraftstoff-Verhältnis [-] |
| $V_{\min t}$ | Mindestabgasvolumen bei vollständiger Verbrennung ohne Luftüberschuss, trocken [m^3 Abgas/kg Rapsölkraftstoff] |
| A/F_{St} | Stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis [kg Luft/kg Kraftstoff] |
| $\text{CO}_{2\max t}$ | maximale CO_2 -Konzentration im Abgas bei vollständiger Verbrennung ohne Luftüberschuss, trocken [$\text{m}^3 \text{CO}_2/\text{m}^3$ Abgas] |
| CO_{2t} | CO_2 -Konzentration im Abgas, trocken [$\text{m}^3 \text{CO}_2/\text{m}^3$ Abgas] |
| CO_t | CO -Konzentration im Abgas, trocken [$\text{m}^3 \text{CO}/\text{m}^3$ Abgas] |

$$V_{\min t} = \frac{C}{12} \cdot \frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kg Rapsöl}} \cdot V_{mn\text{CO}_2} + \frac{S}{32} \cdot \frac{\text{kmol SO}_2}{\text{kg Rapsöl}} \cdot V_{mn\text{SO}_2} + 0,79 \cdot \frac{A / F_{St}}{\rho_{\text{Luft},n}} \cdot V_{mn\text{N}_2}$$

| | |
|------------------------|--|
| $V_{\min t}$ | Mindestabgasvolumen bei vollständiger Verbrennung ohne Luftüberschuss, trocken [m^3 Abgas/kg Rapsölkraftstoff] |
| C | Gravimetrischer Kohlenstoffanteil im Rapsölkraftstoff [-] |
| S | Gravimetrischer Schwefelanteil im Rapsölkraftstoff [-] |
| $V_{mn\text{CO}_2}$ | Molares Normvolumen CO_2 ; 22,264 [m^3/kmol] |
| $V_{mn\text{SO}_2}$ | Molares Normvolumen SO_2 ; 21,876 [m^3/kmol] |
| $V_{mn\text{N}_2}$ | Molares Normvolumen N_2 ; 22,403 [m^3/kmol] |
| A/F_{St} | Stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis [kg Luft/kg Kraftstoff] |
| $\rho_{\text{Luft},n}$ | Normdichte von Luft, trocken; 1,293 [kg/m^3] |

$$CO_{2max t} = \frac{C \cdot \frac{kmol CO_2}{kg Rapsöl} \cdot V_{mnCO_2}}{V_{min t}}$$

| | |
|---------------|--|
| $CO_{2max t}$ | maximale CO_2 -Konzentration im Abgas bei vollständiger Verbrennung ohne Luftüberschuss, trocken [$m^3 CO_2/m^3$ Abgas] |
| C | Gravimetrischer Kohlenstoffanteil im Rapsölkraftstoff [-] |
| V_{mnCO_2} | Molares Normvolumen CO_2 ; 22,264 [$m^3/kmol$] |
| $V_{min t}$ | Mindestabgasvolumen bei vollständiger Verbrennung ohne Luftüberschuss, trocken [m^3 Abgas/kg Rapsölkraftstoff] |

Umrechnung der gasförmigen Abgaskomponenten CO und NO_x vom trockenen in den feuchten Bezugszustand

Die gasförmigen Abgaskomponenten CO und NO_x werden bezogen auf das trockene Abgas gemessen. Die Umrechnung erfolgt nicht anhand der für Dieselmotorkraftstoff spezifischen Umrechnung nach Richtlinie mit Hilfe des CO und CO_2 Gehaltes. Durch die zusätzliche Messung des Wassergehaltes im Abgas kann die Umrechnung brennstoffunabhängig anhand folgender Formel durchgeführt werden:

$$X_f = \frac{X_t \cdot (100 - H_2O)}{100}$$

| | |
|--------|---|
| X_f | Konzentration der Abgaskomponente X bezogen auf feuchtes Abgas [m^3/m^3] |
| X_t | Konzentration der Abgaskomponente X bezogen auf trockenes Abgas [m^3/m^3] |
| H_2O | Wassergehalt des Abgases [Vol.-%] |

Alle weiteren Berechnungen werden nach den Vorgaben der Richtlinie 97/68/EG durchgeführt.

4.7 Untersuchung der Abgaspartikel

Die Proben der Abgaspartikel wurden am bifa Umweltinstitut in Augsburg hinsichtlich der mutagenen Wirkung, des Gehaltes an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und des Gehaltes an Nitro-PAK untersucht. Im Folgenden werden die Probenaufbereitung und Durchführung der Analysen beschrieben.

4.7.1 Untersuchung zur Mutagenität

4.7.1.1 Probenaufbereitung

Die Filter einer Probe werden in 150 – 200 ml Dichlormethan (Geyer, BAKER ULTRA RESI-ANALYZED) im Soxhlet über 12 h extrahiert ($T_{\text{Heizbad}} = 70 \text{ °C}$; $T_{\text{Kühler}} = 4 \text{ °C}$). Anschließend wird der Extrakt in einen Glaskolben überführt. Alle verwendeten Geräte (z. B. Glaskolben, Messkolben) Materialien (z. B. Siedeperlen, Siedestein, Pinzetten) und Arbeitsflächen, die in direkten Kontakt zu den Proben kommen, werden mit Dichlormethan vorgereinigt.

Vor dem Eindampfen im Rotationsverdampfer werden aus dem Extrakt 10 % als Rückstellprobe für chemische Analysen entnommen.

Der restliche Extrakt wird im Rotationsverdampfer ($T_{\text{Wasserbad}} = 54 \text{ °C}$; $T_{\text{Kühler}} = 4 \text{ °C}$) auf ca. 5 bis 10 ml eingengt. Das übrige Dichlormethan wird dann mit hochreinem Stickstoff abgeblasen. Die Menge an Rückstand, die im Glaskolben zurückbleibt, wies bei den Untersuchungen eine ölige Konsistenz auf und war bei allen Proben – außer der Blindprobe – sichtbar. Die einzelnen Extrakte unterschieden sich hinsichtlich ihrer Farbe nicht signifikant.

Der Rückstand wird in 5000 μl hochreinem Dimethylsulfoxid (Merck, Qualitätsstufe pro analysi) rückgelöst und in dieser Form im Ames-Test eingesetzt.

4.7.1.2 Ames-Test

Im Ames-Test wird die mutagene Wirkung der Extrakte mit Hilfe von Bakterien bestimmt. Testorganismen sind die Mutantenstämme TA98 und TA100 von *Salmonella typhimurium* LT2 (His-). Diese sind nicht mehr in der Lage, die lebenswichtige Aminosäure Histidin selbst herzustellen und können so in einem histidinfreien Medium nur dann wachsen, wenn sie durch den Einfluss von mutagenen Substanzen die Fähigkeit zur Bildung von Histidin wiedererlangen (Rückmutation).

Mit den eingesetzten Stämmen werden Punktmutationen erfasst. Zwei Stämme kommen deshalb zum Einsatz, da bei Punktmutationen zwei Klassen unterschieden werden müssen – Basenpaar-substitutionen (Nachweis mit TA100) und Rasterschubmutationen (Nachweis mit TA98).

Die Anzahl der Rückmutationen (Revertanten) ist ein Maß für die Mutagenität. Durch Zugabe von Rattenleberextrakt (S9-Mix) können auch Substanzen erfasst werden, die erst nach einer metabolischen Aktivierung im Säugetierorganismus mutagen sind.

Obwohl sich die Struktur des bakteriellen „Chromosoms“ sehr stark von der viel komplexeren Struktur der Chromosomen von Säugerzellen unterscheidet und der Ames-Test somit nicht bei allen chemischen Verbindungsklassen eine gute Korrelation zwischen Mutagenität und Kanzerogenität aufweist, wird doch mit einer Sensitivität von annähernd 83 % ein kanzerogenes Potenzial erkannt.

4.7.1.3 Anzucht der Salmonellen

Die Salmonella-Mutantenstämme TA98 und TA100 werden am Tag vor dem Test von einer Master-Platte in Nährbouillon mit 3,15 % Ampicillin überimpft und über Nacht bei 37 °C angezogen. Nach etwa 14 h Kultivierung bei 37 °C werden die Teststämme am Morgen des Testtages nochmals in Ampicillin-Nährbouillon überimpft und 3 h bei 37 °C kultiviert, um sicherzustellen, dass sich die Salmonellen in der exponentiellen Wachstumsphase befinden.

4.7.1.4 Testansatz

Gemäß OECD-Guideline 471 (*Salmonella typhimurium*, Reverse Mutation Assay) wird der Ames-Test in Anlehnung an das Protokoll von MARON und AMES (1983) [9] durchgeführt.

Vom jeweiligen Probenextrakt werden zunächst durch Verdünnung mit hochreinem Dimethylsulfoxid (DMSO) insgesamt sechs Konzentrationsstufen (3,13 %; 6,25 %; 12,5 %; 25 %; 50 %; 100 %) hergestellt.

In einer ersten Testreihe werden jeweils 100 µl Probenextrakt bzw. Extraktverdünnung mit 100 µl frischer Bakterienkultur ($\sim 10^9$ Zellen pro ml), 500 µl Natriumhydrogenphosphat-Puffer und 2000 µl Softagar als Topagar auf einer Petrischale mit histidinfreiem Minimalmedium inkubiert. Der Softagar enthält gemäß der Testvorschrift auch eine geringe Menge Histidin, um den Salmonellen einige wenige Zellteilungen zu ermöglichen. Hintergrund ist, dass viele Mutagene erst während einer Wachstumsphase eine Wirkung erzielen können. In einer zweiten Testreihe wird der Topagar zusätzlich mit 500 µl 4 %-igem S9-Mix versetzt. Abbildung 8 zeigt schematisch die Vorgehensweise beim Ames-Test.

Nach 48 bis max. 72 h Stunden Inkubation bei 37 °C (bei Vorliegen auswertbarer Koloniebilder) werden die Kolonien gezählt, die durch reverse Mutation zum Wildtyp auf den Platten wachsen können. Durch den Vergleich mit den Negativ-Kontrollen (dotiert mit jeweils 100 µl hochreinem DMSO) wird der Anteil an Revertanten bestimmt, der nicht spontan auftritt, sondern durch die Testsubstanzen verursacht wird.

Als Positivkontrollen kommen die Mutagene Methylmethansulfonat und 3-Nitrobenzanthron (im Test ohne metabolische Aktivierung durch S9-Mix) bzw. 2-Aminofluoren (im Test mit S9-Mix) zum Einsatz.

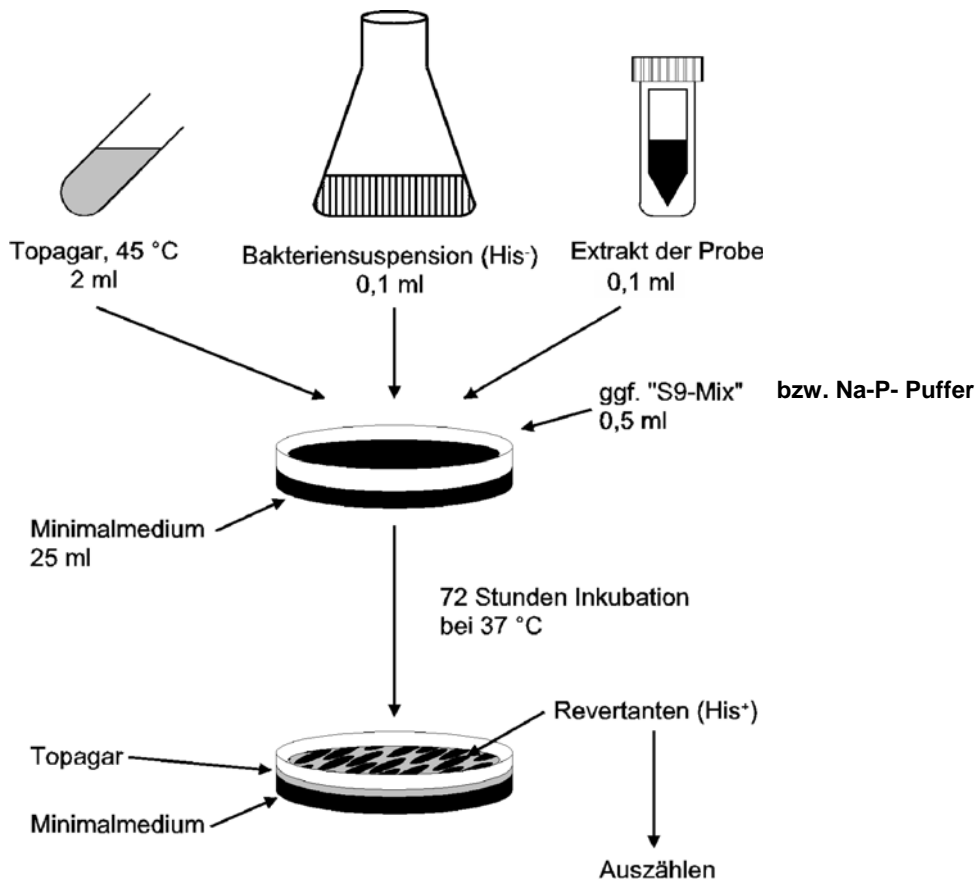


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Salmonella-Mutagenitätstests (Ames-Test)

4.7.1.5 Auswertung

Bei der Prüfung der Mutagenität von Reinstoffen ist es möglich, im Testansatz nahezu beliebig hohe Konzentrationen der Testsubstanzen einzusetzen. Dies macht es möglich, in Vorversuchen jenen Konzentrationsbereich zu identifizieren, in dem mutagene Wirkungen nachweisbar werden. Für diesen Konzentrationsbereich werden bis zu sechs unterschiedliche Prüfkonzentrationen hergestellt, wobei der Konzentrationsbereich möglichst den unteren Wirkungsbereich sowie mehrere Prüfkonzentrationen im linearen Bereich der Dosis-Wirkungsbeziehung abdecken sollte. Häufig ergibt sich dieser lineare Bereich erst bei einer Auftragung des Wirkeffektes (hier die Anzahl der Revertanten) gegen den Logarithmus der Prüfkonzentration. Abbildung 9 zeigt die idealisierte Dosis-Wirkungsbeziehung mit dem für die Auswertung von Ames-Tests relevanten Anteil.

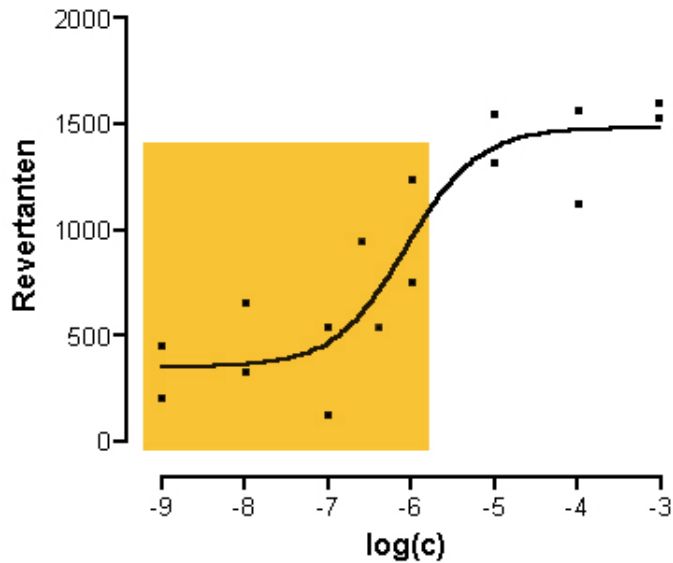


Abbildung 9: *Idealisierte Dosis-Wirkungsbeziehung. Gekennzeichneter Bereich: Relevanter Anteil der Dosis-Wirkungsbeziehung für die Auswertung von Ames-Tests*

Für die weitere Auswertung werden die Messwerte aus dem linearen Bereich der Dosis-Wirkungsbeziehung herangezogen. Hierzu wird von der ermittelten Anzahl der Revertanten die Anzahl der Spontanrevertanten subtrahiert und die Netto-Revertantenanzahl gegen den Logarithmus der Prüfkonzentrationen aufgetragen. Mit Hilfe einer linearen Regression kann dann rechnerisch die für eine bekannte Prüfkonzentration erwartete Revertantenanzahl abgeschätzt werden.

Gerade bei niedrigen Spontanrevertantenanzahlen (z. B. beim TA98-Stamm: 20 bis 50 Revertanten pro Platte) ist es in der Praxis aufgrund der Schwankung der Messwerte meist schwierig, den Beginn des linearen Bereichs der Dosis-Wirkungsbeziehung zu erkennen. Deshalb werden in diesem Fall erst Revertantenanzahlen als signifikant erhöht gewertet, wenn sie doppelt so hoch sind wie die Spontanrevertantenanzahl. Die Einhaltung dieser „Zweifachregel“ ist jedoch bei hinreichend hohen Spontanrevertantenanzahlen, wie sie z. B. beim TA100-Stamm (75 bis 200 Revertanten pro Platte) beobachtet werden, nicht erforderlich [8] [11].

Im Vergleich zur Prüfung von Reinchemikalien ist die Auswertung der Prüfungen von Partikelextrakten erschwert. Einerseits stehen nur begrenzte Mengen der Partikelextrakte zur Verfügung, so dass nicht immer wünschenswert hohe Wirkbereiche der Partikelextraktbestandteile erreicht werden. Zudem können sich die Dosis-Wirkungsbeziehungen unterschiedlicher, mutagen wirkender Partikelextraktbestandteile so ergänzen, dass untypische summarische Dosis-Wirkungsbeziehungen erhalten werden.

4.7.2 Untersuchungen zum Gehalt an PAK und Nitro-PAK

Aliquote der im Ames-Test eingesetzten Dichlormethanextrakte der Diesel- und Rapsölpartikelproben wurden zusätzlich genutzt, um die Konzentrationen wichtiger polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) und ausgewählter Nitro-PAK zu bestimmen. Dabei wird ein Drittel der Rückstellproben auf PAK untersucht, zwei Drittel werden für die Bestimmung der Nitro-PAK verwendet.

Die Analyse der Nitro-PAK-Konzentrationen wurde vom Institut für Ökologische Chemie der GSF in Neuherberg durchgeführt. Die PAK-Konzentrationen wurden vom bifa Umweltinstitut in Anlehnung an die Bestimmung nach U.S. EPA method 8270 bestimmt.

Um die Nitro-PAK zu bestimmen, werden die Probenextrakte auf ca. 100 µl eingeeengt und in 1 ml Hexan aufgenommen. Zur Abtrennung interferierender Matrixkomponenten wird eine Festphasenextraktion an Kieselgel durchgeführt. Die Nitro-PAK enthaltende Fraktion wird bis zur Trocknung eingeeengt und in 200 µl Acetonitril aufgenommen. Diese Probe wird der HPLC-Analyse zugeführt.

5 Ergebnisse

5.1 Limitierte Abgaskomponenten

5.1.1 Gesamtbeobachtungszeitraum

Die Emissionsmessungen mit dem Deutz-Fahr Traktor fanden unmittelbar vor der Umrüstung mit Dieseldieselkraftstoff (bei ca. 245 Betriebsstunden) sowie wiederkehrend nach der Umrüstung mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff statt. Nach 870 Bh wurden die Einspritzdüsen gegen neue gleicher Bauart ausgetauscht, um ggf. Auswirkungen auf die Abgasemissionen festzustellen. Bei den Untersuchungen zur Mutagenität von Abgaspartikeln bei 1064 Bh mit Dieseldieselkraftstoff wurde die Düsenbeheizung und Kraftstoffvorwärmung abgeschaltet, da diese lediglich als Anpassungsmaßnahme bei der Umrüstung für den Einsatz von Rapsölkraftstoff dient.

Im Dieseldieselbetrieb vor der Umrüstung erfüllte der Deutz-Fahr Traktor die Abgasstufe II (Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12, Abbildung 13). Die NO_x -Emissionen lagen exakt am Grenzwert. Bei der Umrüstung wurden die Einspritzdüsen ausgetauscht, der Einspritzdruck erhöht und die Kraftstofftemperatur über eine Düsenvorheizung angehoben, wodurch sich das Emissionsverhalten änderte. So wurden anschließend beim Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff ca. 50 % höhere Partikelmasse- und ca. 4 % höhere NO_x -Emissionen ermittelt.

Beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff konnte eine weitere Erhöhung der NO_x -Emissionen festgestellt werden, so dass der Grenzwert um ca. 14 % überschritten wurde (Abbildung 11). Bei den Partikelmasseemissionen wurde hingegen ein Rückgang mit Rapsölkraftstoff beobachtet (Abbildung 13). Eine deutliche Reduzierung um über 60 % konnte im Rapsölkraftstoffbetrieb bei den Kohlenwasserstoffen (HC), verglichen mit dem Dieseldieselbetrieb vor und nach der Umrüstung, beobachtet werden, so dass sogar die Anforderung der Abgasstufe IIIB hinsichtlich der HC-Emissionen mit Rapsölkraftstoff eingehalten wurde.

Der Düsenwechsel bei 870 Betriebsstunden führte zu einer Verminderung von CO, HC und Partikelmasse beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff und für HC beim Dieseldieselbetrieb.

Zu Beginn der Untersuchungen bei 245 und 265 Bh wurde die Partikelmasse im heißen Abgas nach VDI 2066 bestimmt. Bei 863 und 875 Bh wurde zusätzlich die Partikelprobenahme nach ISO 8178 durchgeführt (Kapitel 4.3.5). Dabei zeigten sich erwartungsgemäß um 12 bis 27 % höhere Partikelemissionen. Der Grund für die höheren Werte nach ISO 8178 liegt darin, dass es bei der Probenahme im kalten Abgas zur Kondensation von Kohlenwasserstoffen kommt, die sich an den Partikeln anlagern können und somit bei der gravimetrischen Auswertung miterfasst werden. Bei allen weiteren Messungen erfolgte die Bestimmung der Partikelemission nach ISO 8178 bzw. Richtlinie 97/68/EG.

Die Untersuchungen zur Mutagenität der Abgaspartikel fanden bei den Emissionsmessungen bei 1064 und 1073 Bh statt. Die spezifischen Emissionen der limitierten Abgaskomponenten entsprechen hierbei im Wesentlichen denen der vorangegangenen Messungen, so dass von einem für diesen Traktor repräsentativen Motorbetrieb bei den Mutagenitätsuntersuchungen auszugehen ist (Abbildung 10 bis Abbildung 13). Lediglich im Dieseldieselbetrieb bei 1064 Bh sind höhere CO- und Partikelmasseemissionen zu verzeichnen. Der teilweise Rückbau der Rapsöl-Umrüstung (durch

Ausschalten der Düsenbeheizung) führte also entgegen der Erwartungen zu einer Verschlechterung des Emissionsverhaltens gegenüber dem Dieselbetrieb mit Düsenbeheizung. Die Betriebsdaten des Traktors und des Prüfstands sowie die Randbedingungen bei den Emissionsmessungen sind in Anhang 1 bis Anhang 5 aufgeführt.

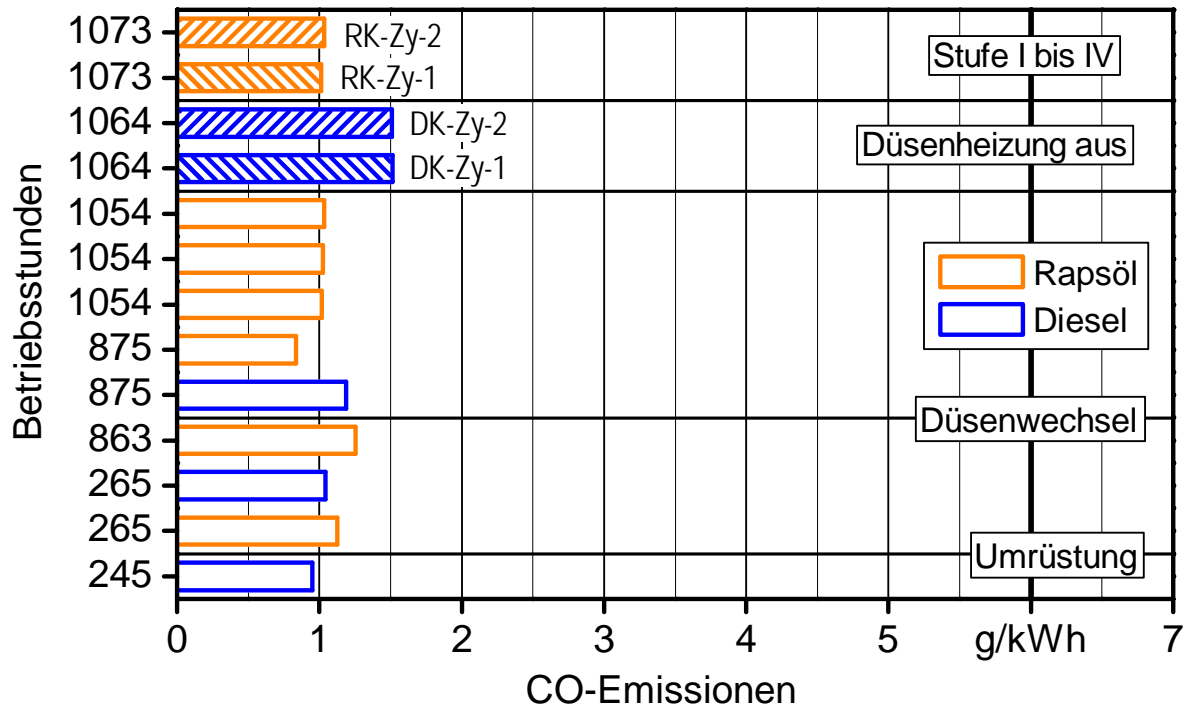


Abbildung 10: CO-Emissionen eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff bei wiederkehrenden Messungen (Balken bei den Mutagenitätsmessungen sind schraffiert dargestellt)

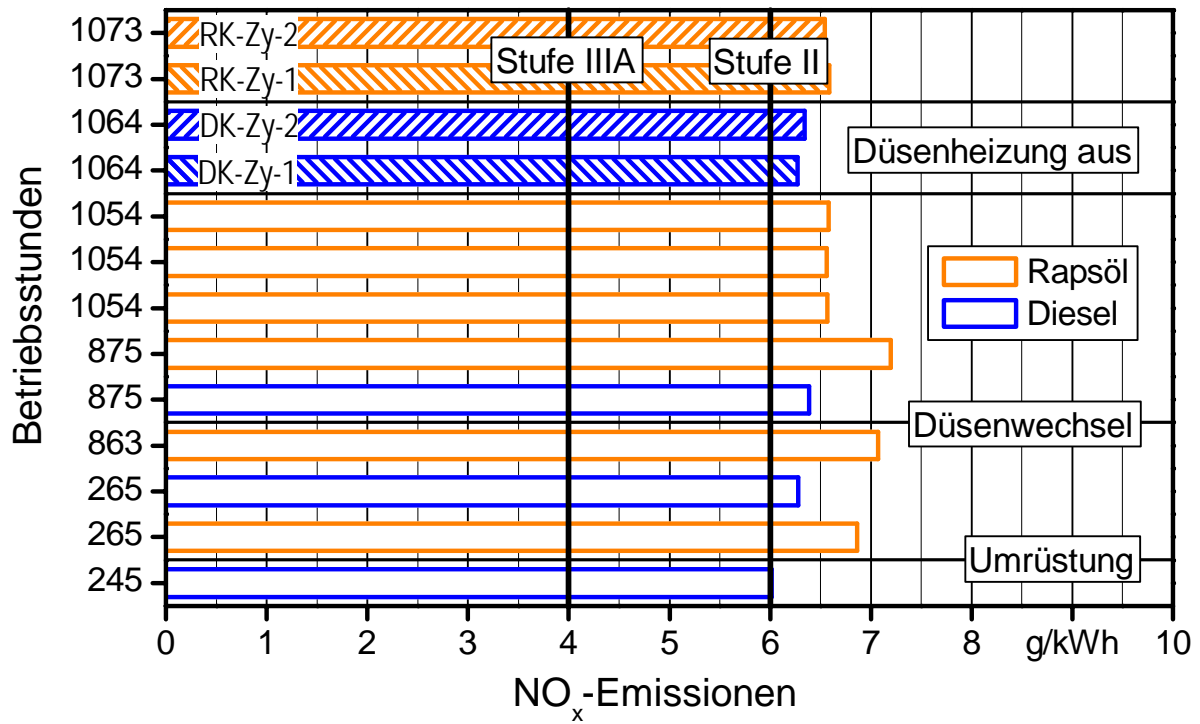


Abbildung 11: NO_x-Emissionen eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieseldieselfkraftstoff bei wiederkehrenden Messungen (Balken bei den Mutagenitätsmessungen sind schraffiert dargestellt)

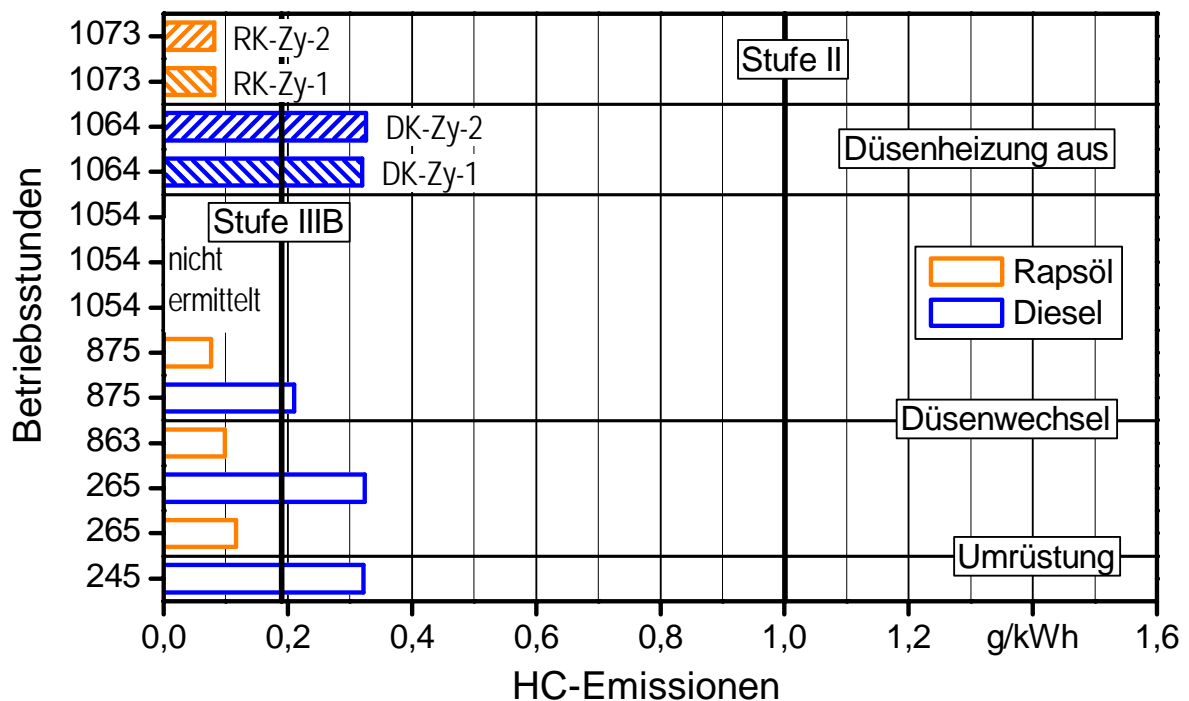


Abbildung 12: HC-Emissionen eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieseldieselfkraftstoff bei wiederkehrenden Messungen (Balken bei den Mutagenitätsmessungen sind schraffiert dargestellt)

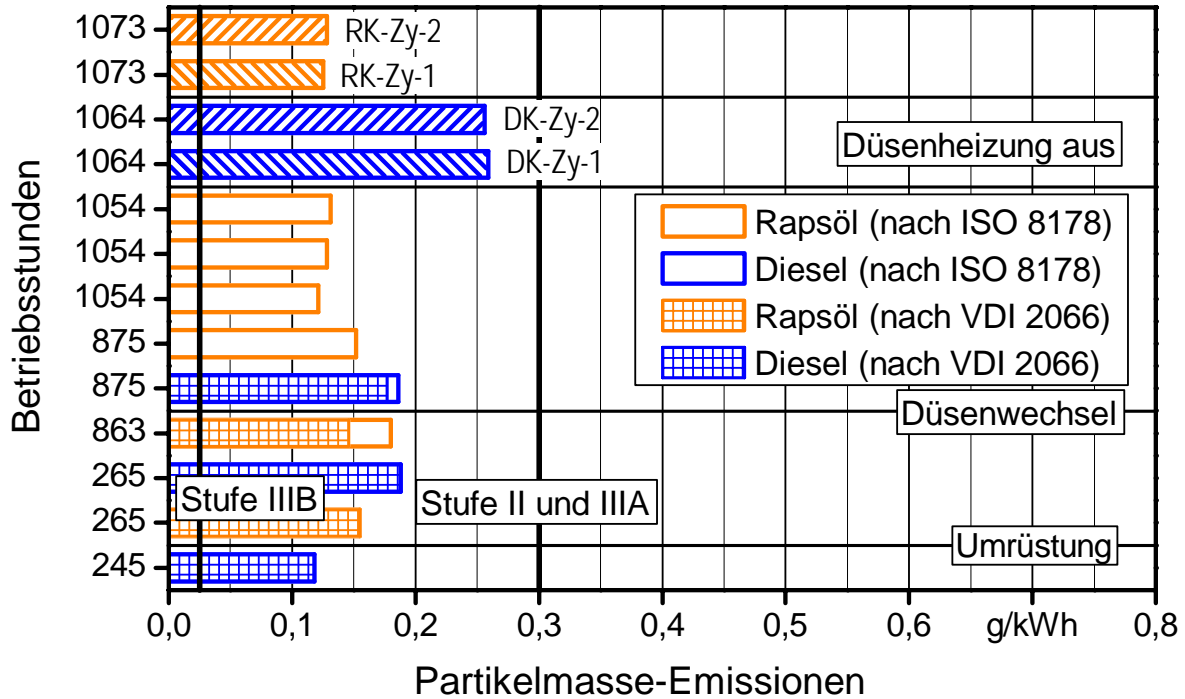


Abbildung 13: Partikelmasse-Emissionen eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff bei wiederkehrenden Messungen (Balken bei den Mutagenitätsmessungen sind schraffiert dargestellt)

5.1.2 Mutagenitätsuntersuchungen

Bei detaillierter Betrachtung der limitierten Abgasemissionen des Traktors in den einzelnen Prüfphasen während der Mutagenitätsuntersuchungen wird deutlich, dass es im Leerlauf (Prüfphase 8) mit Rapsölkraftstoff zu höheren CO- und Partikelmasseemissionen kommt als mit Dieselmotorkraftstoff (Abbildung 14 und Abbildung 17). In allen anderen Lastpunkten waren die CO- und Partikelmasseemissionen geringer. In sieben der acht Prüfphasen wies der Betrieb mit Rapsölkraftstoff leicht höhere NO_x-Emissionen auf (Abbildung 15), wohingegen die HC-Emissionen über alle Prüfphasen deutlich geringer waren als mit Dieselmotorkraftstoff (Abbildung 16).

Es ist bekannt, dass sich hohe Drehzahlen und Lasten günstig auf den Verbrennungsprozess von Rapsölkraftstoff auswirken, da die dabei herrschenden Bedingungen im Brennraum, wie hohe Drücke, Temperaturen und verstärkte Ladungsbewegung zu einem besseren Einspritzstrahlbild, einer intensiveren Gemischbildung und geringeren Abgasemissionen führen [10]. Im Schwachlastbetrieb hingegen bedingt die hohe Viskosität des Rapsölkraftstoffs eine zunehmend schlechtere Zerstäubungsqualität und damit einen erhöhten Schadstoffausstoß.

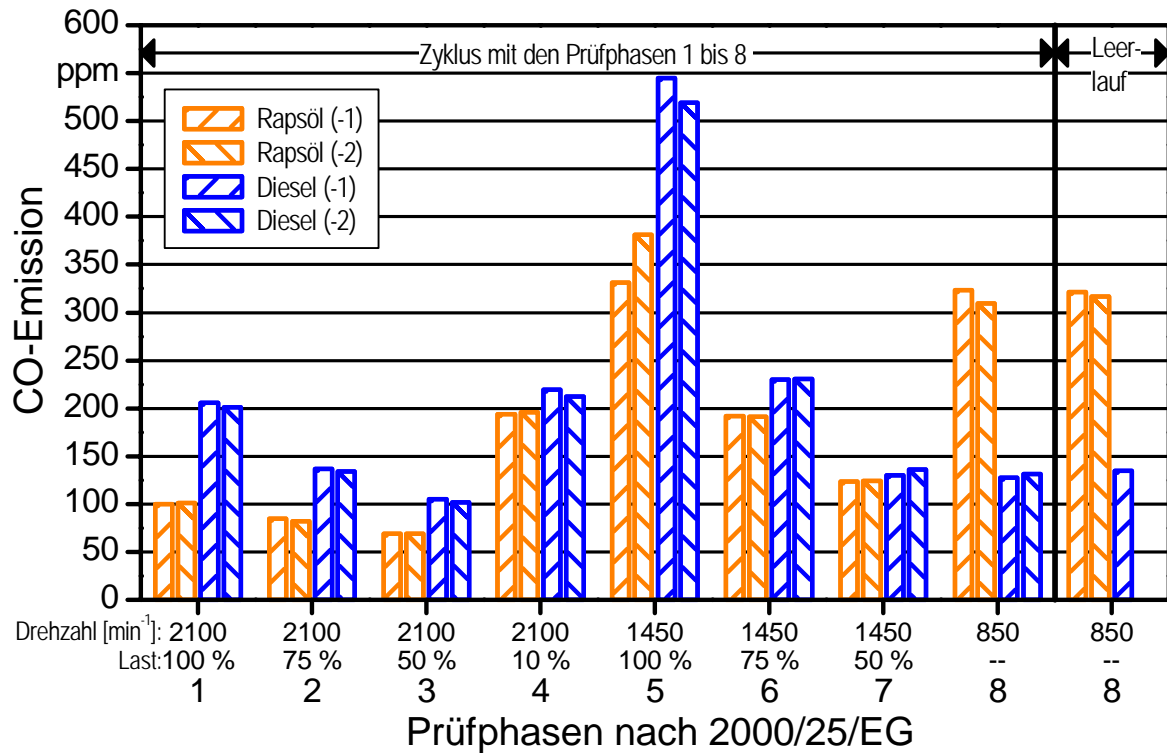


Abbildung 14: CO-Emissionen (bezogen auf trockenes Abgas) eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei den Mutagenitätsuntersuchungen

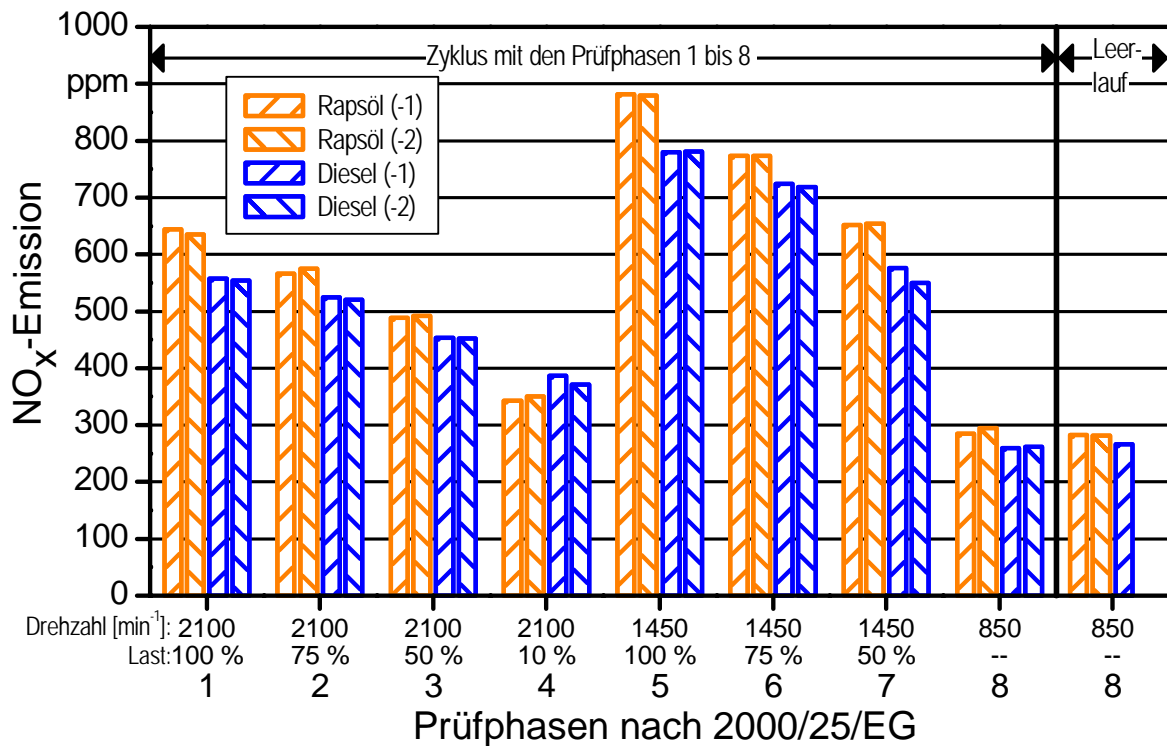


Abbildung 15: NO_x-Emissionen (bezogen auf trockenes Abgas) eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei den Mutagenitätsuntersuchungen

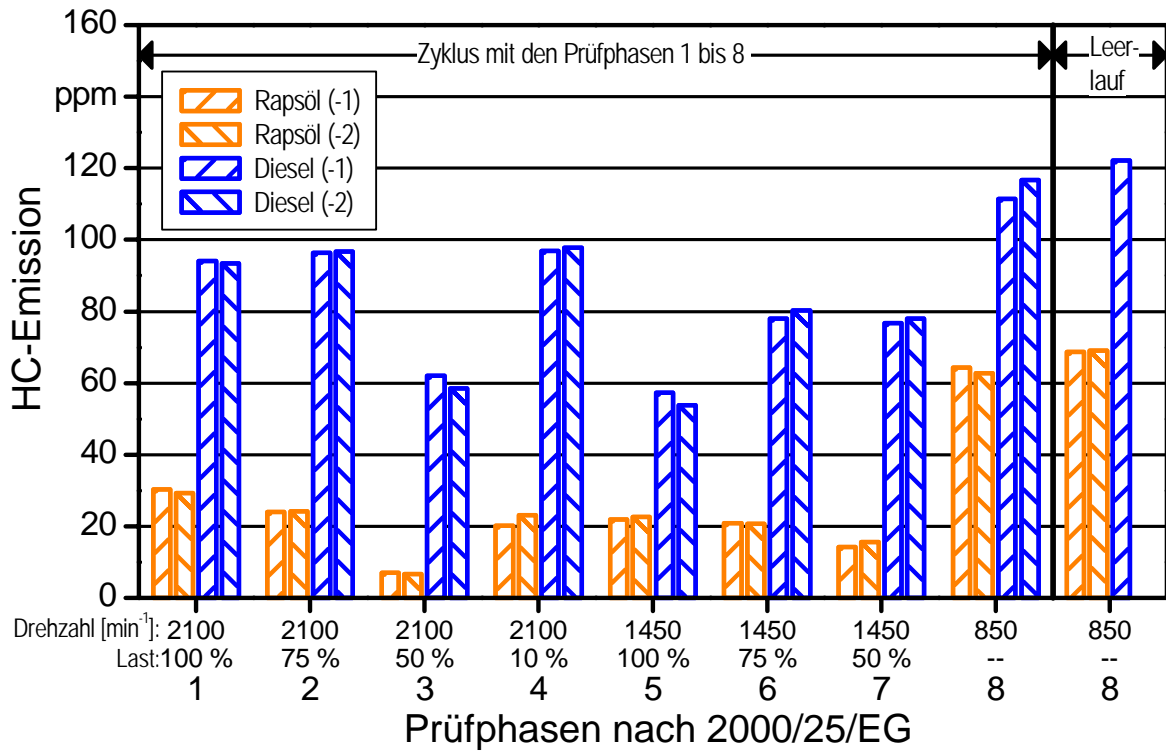


Abbildung 16: HC-Emissionen (bezogen auf trockenes Abgas) eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei den Mutagenitätsuntersuchungen

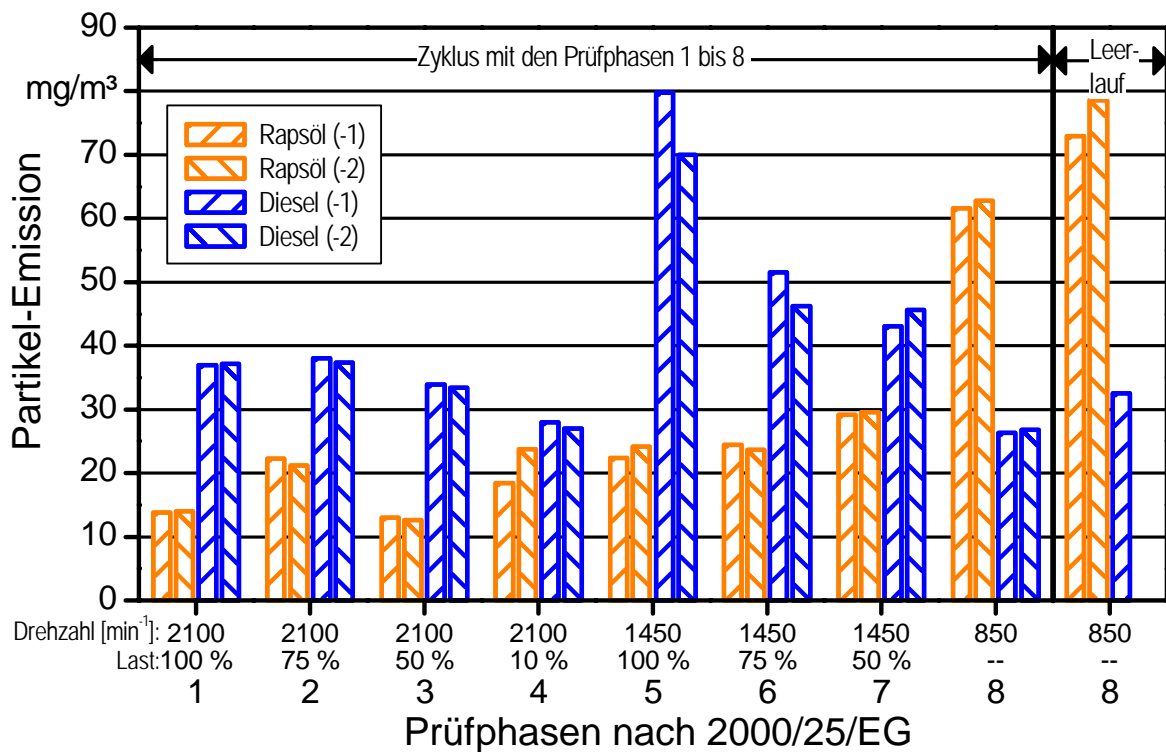


Abbildung 17: Partikel-Emissionen (bezogen auf trockenes Abgas) eines Deutz-Fahr Traktors (Abgasstufe II) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei den Mutagenitätsuntersuchungen

5.2 Analyse der Abgaspartikel

5.2.1 Bestimmung der Mutagenität mittels Ames-Test

5.2.1.1 Mutantenstamm TA98 ohne S9-Mix

Für die Negativkontrollen (nur DMSO 100 µl) wurden im Mittel 21, 30, 16 und 30 Revertanten ermittelt (Tabelle 15). Die Mittelwerte liegen damit weitgehend im Wertebereich, der bei TA98 im Ames-Test erreicht werden soll (20 bis 50 Revertanten pro Platte).

Tabelle 15: *Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 ohne S9-Mix für das geprüfte DMSO*

| Proben | Dosis/Platte µl | DMSO | | | | | Mittelwert |
|-----------------|--------------------|------|----|----|----|----|------------|
| | | A | B | C | D | E | |
| DkZy-1 / RkZy-1 | 100 | 21 | 22 | 25 | 19 | 18 | 21 |
| DkZy-2 / RkZy-2 | 100 | 33 | 27 | 29 | 35 | 24 | 30 |
| DkP8-1 / RkP8-1 | 100 | 16 | 15 | 15 | 19 | - | 16 |
| Blank / RkP8-2 | 100 | 21 | 27 | 30 | 34 | 39 | 30 |

In Tabelle 16 und Tabelle 17 sind die Revertantenzahlen mit TA 98 ohne S9-Mix für die Positivkontrolle mit 3-Nitrobenzanthron (3-NBA), für die Extrakte der Partikelproben und die Blindprobe dargestellt. Dabei beziehen sich die Dosisangaben bei den Positivkontrollen auf die dosierte Masse des jeweiligen Stoffs. Bei den Partikelproben gibt die Dosis jene Menge an Partikeln an, aus der die dichlormethanollöslichen Anteile extrahiert und auf die Platte dosiert worden sind.

Tabelle 16: Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 ohne S9-Mix für die Positivkontrolle (3-NBA) sowie für die Extrakte der Partikelproben aus dem Dieselmotortrieb

| Dosis/Platte | 3-NBA | | | |
|--------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| | A | B | C | Mittelwert |
| pg | | | | |
| 17 | 50 | 39 | 31 | 40 |
| 35 | 43 | 54 | 40 | 46 |
| 69 | 69 | 50 | 49 | 56 |
| 139 | 60 | 72 | 70 | 67 |
| 278 | 90 | 113 | 98 | 100 |
| 555 | 140 | 163 | 181 | 161 |
| Dosis/Platte | DkZy-1 (Diesel Zyklus 1) | | | |
| | A | B | C | Mittelwert |
| µg Partikel | | | | |
| 20 | 23 | 28 | 20 | 24 |
| 40 | 22 | 16 | 31 | 23 |
| 80 | 26 | 36 | 35 | 32 |
| 161 | 32 | 28 | 25 | 28 |
| 321 | 44 | 40 | 57 | 47 |
| 643 | 66 | 44 | 62 | 57 |
| Dosis/Platte | DkZy-2 (Diesel Zyklus 2) | | | |
| | A | B | C | Mittelwert |
| µg Partikel | | | | |
| 17 | 34 | 22 | 22 | 26 |
| 33 | 34 | 24 | 33 | 30 |
| 66 | 51 | 37 | 32 | 40 |
| 133 | 31 | 46 | 33 | 37 |
| 266 | 55 | 52 | 68 | 58 |
| 532 | 79 | 97 | 86 | 87 |
| Dosis/Platte | DkP8-1 (Diesel Leerlauf) | | | |
| | A | B | C | Mittelwert |
| µg Partikel | | | | |
| 19 | 18 | 20 | 36 | 25 |
| 37 | 27 | 28 | 28 | 28 |
| 75 | 37 | 34 | 42 | 38 |
| 149 | 45 | 57 | 46 | 49 |
| 299 | 48 | 59 | 56 | 54 |
| 598 | 91 | 101 | 114 | 102 |

Fettdruck: Anzahlen an Revertanten oberhalb der Schwelle „2facher Blindwert“
 3-NBA: 3-Nitrobenzanthron

Tabelle 17: *Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 ohne S9-Mix für die Extrakte der Partikelproben aus dem Rapsölkraftstoffbetrieb sowie für die Blindprobe (Blank)*

| Dosis/Platte | RkZy-1 (Rapsöl Zyklus 1) | | | |
|--------------|----------------------------|-----------|-----------|------------|
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 15 | 19 | 16 | 16 | 17 |
| 31 | 20 | 29 | 23 | 24 |
| 61 | 21 | 34 | 19 | 25 |
| 122 | 25 | 24 | 40 | 30 |
| 245 | 27 | 37 | 30 | 31 |
| 489 | 38 | 32 | 42 | 37 |
| Dosis/Platte | RkZy-2 (Rapsöl Zyklus 2) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 15 | 26 | 28 | 31 | 28 |
| 31 | 41 | 33 | 37 | 37 |
| 62 | 37 | 41 | 35 | 38 |
| 124 | 38 | 36 | 46 | 40 |
| 248 | 42 | 41 | 49 | 44 |
| 496 | 69 | 63 | 48 | 60 |
| Dosis/Platte | RkP8-1 (Rapsöl Leerlauf 1) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 16 | 18 | 21 | 15 | 18 |
| 32 | 22 | 31 | 30 | 28 |
| 65 | 26 | 22 | 26 | 25 |
| 129 | 30 | 31 | 36 | 32 |
| 259 | 39 | 43 | 38 | 40 |
| 517 | 73 | 52 | 43 | 56 |
| Dosis/Platte | RkP8-2 (Rapsöl Leerlauf 2) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 18 | 43 | 37 | 40 | 40 |
| 37 | 50 | 34 | 41 | 42 |
| 73 | 47 | 36 | 42 | 42 |
| 147 | 32 | 46 | 35 | 38 |
| 294 | 37 | 54 | 35 | 42 |
| 587 | 64 | 68 | 59 | 64 |
| Dosis/Platte | Blank (Blindprobe) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 0 | 27 | 30 | 31 | 29 |
| 0 | 27 | 12 | 33 | 24 |
| 0 | 35 | 27 | 31 | 31 |
| 0 | 27 | 26 | 31 | 28 |
| 0 | 27 | 29 | 28 | 28 |
| 0 | 32 | 31 | 28 | 30 |

Fettdruck: Anzahlen an Revertanten oberhalb der Schwelle „2facher Blindwert“

Die als Positivkontrolle eingesetzte Substanz 3-Nitrobenzanthron (3-NBA) lieferte bereits ab einer Dosis von ca. 139 pg / Platte Revertantenanzahlen, die um mehr als Faktor 2 über dem Mittelwert der Blindwertextrakte lagen. Die Auswertung dieser Netto-Revertantenanzahlen ergab eine rechnerische Netto-Anzahl von $2,3 \times 10^8$ Revertanten pro mg 3-NBA. Dieser Wert deckt sich gut mit Angaben von MÜCKE et al. (2002) [12], die $3,2 \times 10^8$ Revertanten pro mg 3-NBA angaben.

Im Vergleich dazu lieferten die Extrakte der untersuchten Partikelproben nur sehr kleine Revertantenanzahlen. Dies verdeutlicht auch Abbildung 18.

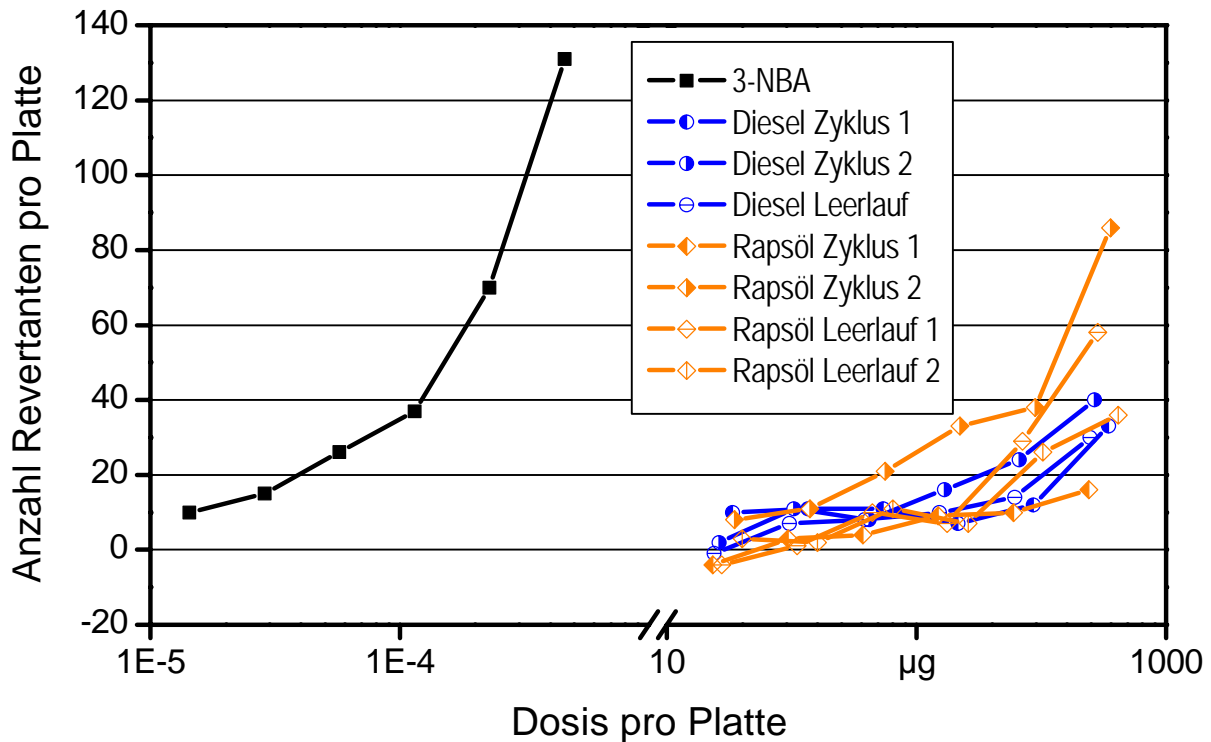


Abbildung 18: Vergleich der mit dem TA98-Stamm ohne S9-Mix erzielte Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Positivkontrolle mit 3-NBA sowie für die Extrakte aller Proben

Platten mit Extrakt aus Probe DkZy-1 (Diesel Zyklus 1) zeigten für den unverdünnten und 1:2 verdünnten Extrakt nach MARON und AMES (1983) [9] signifikante Revertantenanzahlen. Bezogen auf 1 mg ergab sich eine Netto-Anzahl von 43 Revertanten.

Platten mit Extrakt aus Probe DkZy-2 (Diesel Zyklus 2) wiesen gegenüber Probe DkZy-1 etwas höhere Mutationsraten auf. Bei Einsatz von unverdünntem Extrakt wurde das Kriterium von MARON und AMES (1983) [9] erfüllt. Bezogen auf 1 mg Partikel ergab sich rechnerisch eine Netto-Revertantenanzahl von 80.

Der Extrakt aus Probe DkP8-1 (Diesel Leerlauf) erreichte von allen Proben die höchsten Revertantenanzahlen mit im Mittel 102 Revertanten pro Platte beim Einsatz des unverdünnten Extrakts. Die Revertantenanzahlen waren hier bei insgesamt vier Verdünnungsstufen (ab 1:8, entspricht

75 µg Partikel) signifikant erhöht. Es ergab sich eine Netto-Revertantenanzahl von 121 pro mg Partikel.

Probe RkZy-1 (Rapsöl Zyklus 1) wies tendenziell leicht erhöhte Revertantenanzahlen gegenüber den von DMSO ausgelösten Spontanmutationen auf. Die von MARON und AMES (1983) [9] für den Nachweis einer mutagenen Wirkung empfohlene Erhöhung der Revertantenanzahl je Platte (Verdopplung der Revertantenanzahl im Vergleich zum Blindwert) wurde dabei aber nicht erreicht. Auf die Berechnung der Revertantenanzahl pro mg Partikel wurde deshalb verzichtet.

Probe RkZy-2 (Rapsöl Zyklus 2) wies nur beim unverdünnten Extrakt signifikante Revertantenanzahlen auf. Die rechnerische Ermittlung der Revertantenanzahl pro mg Partikel ergab 47.

Der Extrakt aus Probe RkP8-1 (Rapsöl Leerlauf 1) löste unverdünnt und in der 1:2 Verdünnung signifikant erhöhte Revertantenanzahlen aus. Bezogen auf 1 mg Partikel ergab sich rechnerisch eine Netto-Revertantenanzahl von 55.

Bei Probe RkP8-2 (Rapsöl Leerlauf 2) löste der unverdünnte Extrakt signifikant erhöhte Revertantenanzahlen aus. Rechnerisch ergab sich eine Netto-Revertantenanzahl von 50 pro mg Partikel.

Bei der Blindprobe ergaben sich bei allen Verdünnungsstufen Werte, die den von DMSO ausgelösten Spontanmutationen entsprachen.

5.2.1.2 Mutantenstamm TA98 mit S9-Mix

Für die Negativkontrollen (nur DMSO) wurden im Mittel 29, 30, 27 und 34 Revertanten ermittelt. Die Werte lagen damit im üblichen Wertebereich von 20 bis 50 Revertanten pro Platte (Tabelle 18).

Tabelle 18: *Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 mit S9-Mix für das geprüfte DMSO*

| Proben | Dosis/Platte | DMSO | | | | | Mittelwert |
|-----------------|--------------|------|----|----|----|----|------------|
| | | µl | A | B | C | D | |
| DkZy-1 / RkZy-1 | 100 | 35 | 22 | 23 | 32 | 33 | 29 |
| DkZy-2 / RkZy-2 | 100 | 21 | 27 | 30 | 36 | 35 | 30 |
| DkP8-1 / RkP8-1 | 100 | 27 | 33 | 20 | 26 | 31 | 27 |
| Blank / RkP8-2 | 100 | 2 | 51 | 29 | 43 | 46 | 34 |

Die als Positivkontrolle eingesetzte Substanz 2-Aminofluoren (2-AF) lieferte bei 4 geprüften Dosierungen signifikante Revertantenanzahlen. Die Auswertung der zugehörigen Netto-Revertantenanzahlen ergab eine rechnerische Netto-Anzahl von $1,76 \times 10^5$ Netto-Revertanten pro mg 2-AF. Dieser Wert liegt in der Größenordnung der Befunde von MARON und AMES (1983) [9], die für TA98 $6,2 \times 10^5$ Revertanten pro mg 2-AF erfasst haben.

Platten mit Extrakt aus Probe DkZy-1 (Diesel Zyklus 1) wiesen beim unverdünnten Extrakt nach MARON und AMES (1983) [9] signifikante Revertantenanzahlen auf. Bezogen auf 1 mg Partikel ergab sich eine Netto-Revertantenanzahl von 59.

Platten mit Extrakt aus Probe DkZy-2 (Diesel Zyklus 2) wiesen tendenziell leicht erhöhte Revertantenanzahlen gegenüber den von DMSO ausgelösten Spontanmutationen auf. Die von MARON und AMES (1983) [9] für den Nachweis einer mutagenen Wirkung empfohlene Erhöhung der Revertantenanzahl je Platte (Verdopplung der Revertantenanzahl im Vergleich zum Blindwert) wurde dabei aber nicht erreicht. Auf die Berechnung der Revertantenanzahl pro mg Partikelmasse wurde deshalb verzichtet. Dasselbe galt für Probe RkZy-1 (Rapsöl Zyklus 1).

Der Extrakt aus Probe DkP8-1 (Diesel Leerlauf) erreichte von allen Proben die höchsten Revertantenanzahlen mit im Mittel 130 Revertanten pro Platte beim Einsatz des unverdünnten Extrakts. Die Revertantenanzahlen waren hier bei insgesamt drei Verdünnungsstufen (ab 1:4, entspricht 149 µg Partikel) signifikant erhöht. Es ergab sich eine Netto-Revertantenanzahl von 149 Revertanten pro mg Partikel.

Bei den restlichen Partikelproben aus dem Rapsölkraftstoffbetrieb löste jeweils nur der unverdünnte Extrakt nach MARON und AMES (1983) [9] signifikante Revertantenanzahlen aus. Bezogen auf 1 mg Partikelmasse ergaben sich Netto-Revertantenanzahlen von 53 für Probe RkZy-2 (Rapsöl Zyklus 2), von 58 für Probe RkP8-1 (Rapsöl Leerlauf 1) und von 50 für Probe RkP8-2 (Rapsöl Leerlauf 2).

Bei der Blindprobe (Blank) ergaben sich bei allen Verdünnungsstufen Werte, die den von DMSO ausgelösten Spontanmutationen entsprachen.

Insgesamt konnte durch die Zugabe von S9-Mix keine Erhöhung der Mutationsraten gegenüber den Ansätzen ohne S9-Mix erzielt werden. Die metabolische Wirkung ist bei diesen Extrakten für den Teststamm TA98 vernachlässigbar.

Tabelle 19 und Tabelle 20 zeigen die Bruttoanzahlen an Revertanten für die Positivkontrolle mit 2-Aminofluoren (2-AF), für die Extrakte der Partikelproben und die Blindprobe. Dabei beziehen sich die Dosisangaben bei den Positivkontrollen auf die dosierte Masse des jeweiligen Stoffs. Bei den Partikelproben gibt die Dosis jene Menge an Partikeln an, aus der die dichlormethanollöslichen Anteile extrahiert und auf die Platte dosiert worden sind. Abbildung 20 zeigt die Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Positivkontrolle und die Extrakte der Partikelproben.

Tabelle 19: *Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 mit S9-Mix für die Positivkontrolle (2-AF) sowie für die Extrakte der Partikelproben aus dem Dieselkraftstoffbetrieb*

| Dosis/Platte | 2-AF | | | |
|------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| μg | A | B | C | Mittelwert |
| 0,156 | 32 | 30 | 30 | 31 |
| 0,313 | 61 | 48 | 49 | 53 |
| 0,625 | 109 | 125 | 129 | 121 |
| 1,25 | 206 | 223 | 252 | 227 |
| 2,50 | 491 | 350 | 476 | 439 |
| 5,00 | 887 | 955 | 879 | 907 |
| Dosis/Platte | DkZy-1 (Diesel Zyklus 1) | | | |
| μg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 20 | 33 | 35 | 37 | 35 |
| 40 | 30 | 42 | 39 | 37 |
| 80 | 27 | 37 | 64 | 43 |
| 161 | 31 | 41 | 40 | 37 |
| 321 | 50 | 39 | 41 | 43 |
| 643 | 60 | 72 | 79 | 70 |
| Dosis/Platte | DkZy-2 (Diesel Zyklus 2) | | | |
| μg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 17 | 46 | 48 | 45 | 46 |
| 33 | 33 | 43 | 39 | 38 |
| 66 | 47 | 36 | 52 | 45 |
| 133 | 43 | 49 | 40 | 44 |
| 266 | 46 | 39 | 49 | 45 |
| 532 | 54 | 56 | 55 | 55 |
| Dosis/Platte | DkP8-1 (Diesel Leerlauf) | | | |
| μg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 19 | 27 | 28 | 32 | 29 |
| 37 | 43 | 32 | 34 | 36 |
| 75 | 45 | 41 | 41 | 42 |
| 149 | 65 | 46 | 58 | 56 |
| 299 | 74 | 52 | 77 | 68 |
| 598 | 133 | 131 | 127 | 130 |

Fettdruck: Anzahlen an Revertanten oberhalb der Schwelle „2facher Blindwert“
 2-AF: 2-Aminofluoren

Tabelle 20: *Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA98 mit S9-Mix für die Extrakte der Partikelproben aus dem Rapsölkraftstoffbetrieb sowie für die Blindprobe (Blank)*

| Dosis/Platte | RkZy-1 (Rapsöl Zyklus 1) | | | |
|--------------|----------------------------|-----------|-----------|------------|
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 15 | 33 | 32 | 41 | 35 |
| 31 | 35 | 33 | 35 | 34 |
| 61 | 43 | 30 | 42 | 38 |
| 122 | 48 | 32 | 44 | 41 |
| 245 | 48 | 47 | 52 | 49 |
| 489 | 52 | 45 | 42 | 46 |
| Dosis/Platte | RkZy-2 (Rapsöl Zyklus 2) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 15 | 40 | 33 | 37 | 37 |
| 31 | 37 | 39 | 42 | 39 |
| 62 | 27 | 34 | 31 | 31 |
| 124 | 41 | 37 | 45 | 41 |
| 248 | 59 | 53 | 54 | 55 |
| 496 | 80 | 66 | 63 | 70 |
| Dosis/Platte | RkP8-1 (Rapsöl Leerlauf 1) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 16 | 27 | 32 | 30 | 30 |
| 32 | 27 | 32 | 38 | 32 |
| 65 | 41 | 43 | 31 | 38 |
| 129 | 39 | 32 | 47 | 39 |
| 259 | 47 | 45 | 46 | 46 |
| 517 | 52 | 69 | 78 | 66 |
| Dosis/Platte | RkP8-2 (Rapsöl Leerlauf 2) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 18 | 43 | 37 | 40 | 40 |
| 37 | 50 | 34 | 41 | 42 |
| 73 | 47 | 36 | 42 | 42 |
| 147 | 32 | 46 | 35 | 38 |
| 294 | 37 | 54 | 35 | 42 |
| 587 | 64 | 68 | 59 | 64 |
| Dosis/Platte | Blank (Blindprobe) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 0 | 27 | 30 | 31 | 29 |
| 0 | 27 | 12 | 33 | 24 |
| 0 | 35 | 27 | 31 | 31 |
| 0 | 27 | 26 | 31 | 28 |
| 0 | 27 | 29 | 28 | 28 |
| 0 | 32 | 31 | 28 | 30 |

Fettdruck: Anzahlen an Revertanten oberhalb der Schwelle „2facher Blindwert“

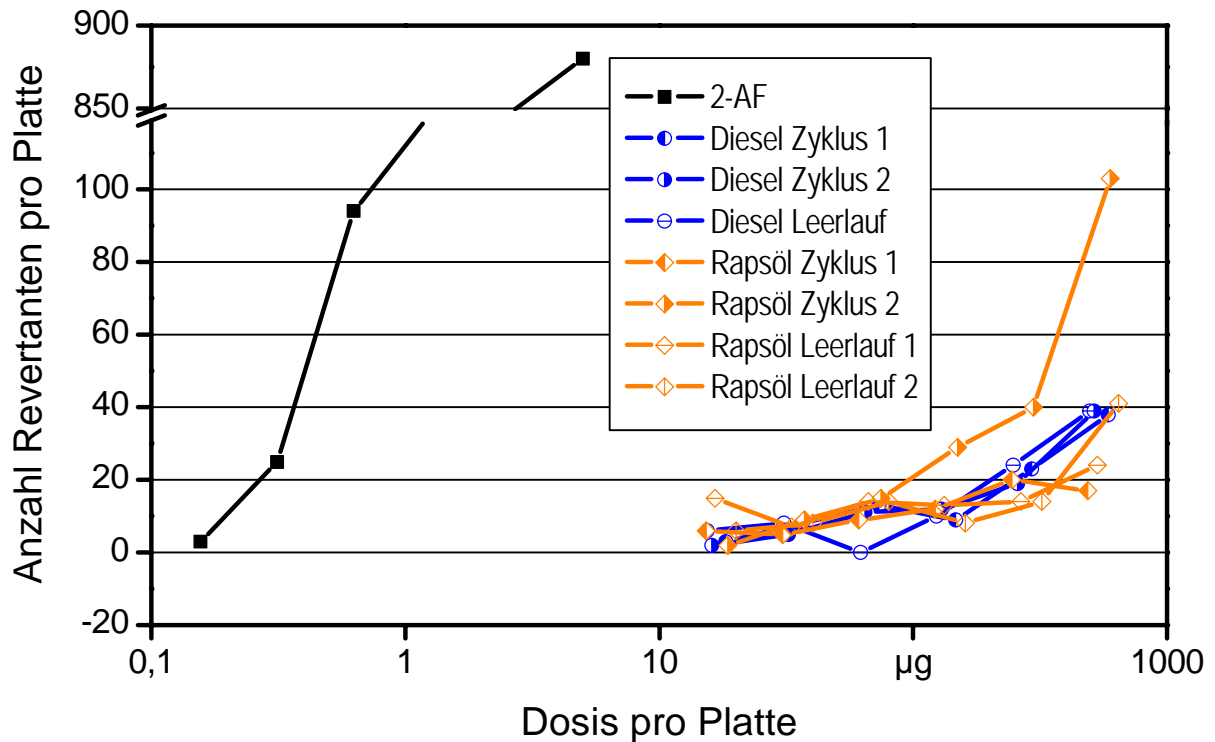


Abbildung 19: Vergleich der mit dem TA98-Stamm mit S9-Mix erzielten Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Positivkontrolle mit 2-AF sowie für die Extrakte aller Proben

5.2.1.3 Mutantenstamm TA100 ohne S9-Mix

Für die Negativkontrollen (Tabelle 21; nur DMSO) wurden im Mittel 127, 111, 95 und 159 Revertanten ausgezählt. Die Werte lagen im üblichen Wertebereich von 75 bis 200 Revertanten pro Platte.

Tabelle 21: Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 ohne S9-Mix für das geprüfte DMSO

| Proben | Dosis/Platte µl | DMSO | | | | | Mittelwert |
|-----------------|--------------------|------|-----|-----|-----|-----|------------|
| | | A | B | C | D | E | |
| DkZy-1 / RkZy-1 | 100 | 112 | 133 | 142 | 104 | 144 | 127 |
| DkZy-2 / RkZy-2 | 100 | 109 | 138 | 113 | 104 | 90 | 111 |
| DkP8-1 / RkP8-1 | 100 | 98 | 102 | 105 | 83 | 85 | 95 |
| Blank / RkP8-2 | 100 | 183 | 163 | 154 | 148 | 148 | 159 |

Beim Teststamm TA100 erhöhte sich die Revertantenanzahl bei Einsatz der Positivkontrolle Methylmethansulfonat (MMS) in linearer Abhängigkeit von der eingesetzten Menge an MMS auf ca. 436 Revertanten pro Platte. Die spezifische mutagene Wirkung von Methylmethansulfonat auf

den Stamm TA100 errechnet sich damit zu $1,25 \times 10^3$ Netto-Revertanten pro mg^2 . Dieser Wert korreliert gut mit dem Literaturwert von MARON und AMES (1983) [9], der $2,10 \times 10^3$ Revertanten pro mg^3 beträgt.

Im Vergleich zur Positivkontrolle lieferten die Extrakte der untersuchten Partikelproben ähnliche Revertantenanzahlen (Abbildung 20). Zudem ist bei den Proben DkZy-1, DkZy-2 und DkP8-1 ein linearer Zusammenhang von zugegebener Extraktmenge (Konzentration) und Revertantenanzahl erkennbar. TA100 ohne metabolische Aktivierung war das Testsystem, das am empfindlichsten auf die geprüften Extrakte reagierte.

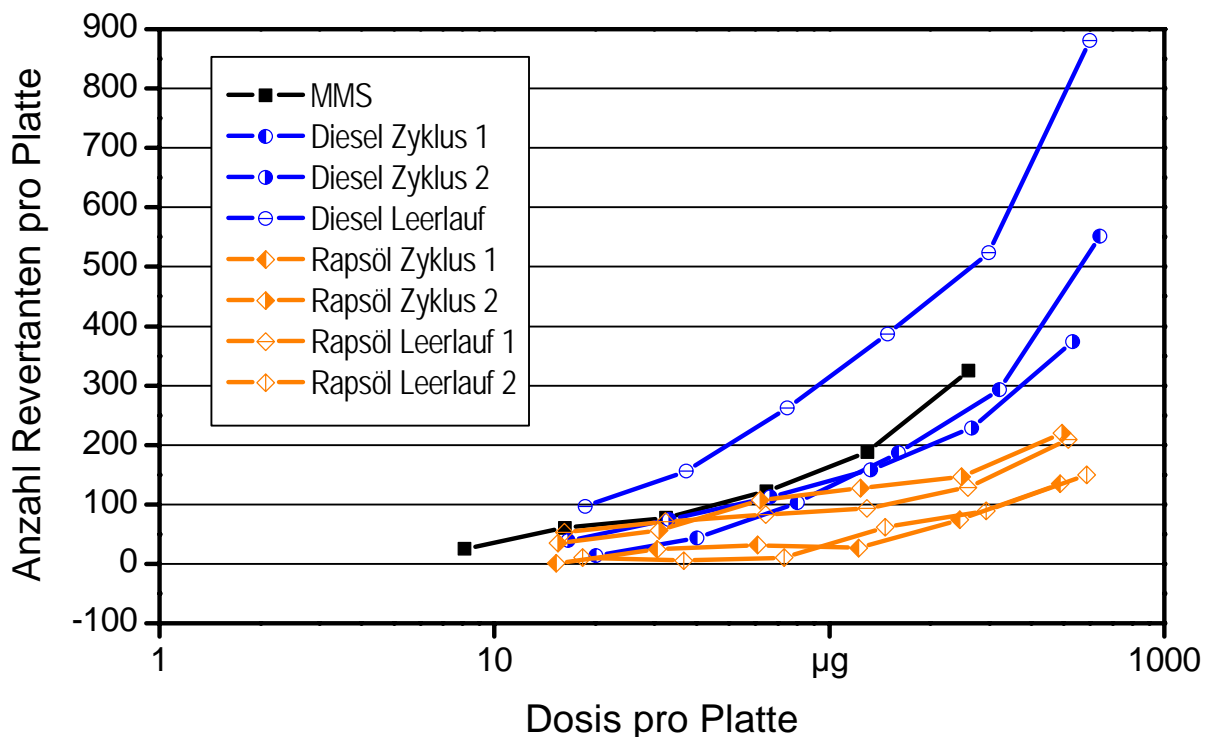


Abbildung 20: Vergleich der mit dem TA100-Stamm ohne S9-Mix erzielten Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Positivkontrolle mit MMS sowie für die Extrakte aller Proben

Platten mit Extrakt aus Probe DkZy-1 (Diesel Zyklus 1) zeigten für drei Verdünnungsstufen hohe Revertantenanzahlen, die den doppelten Wert gegenüber dem Spontanmutationswert erreichten (bei TA100 ist das aber keine notwendige Voraussetzung zum Nachweis von Mutationen). Bezogen auf 1 mg ergab sich eine Netto-Anzahl von 716 Revertanten.

Platten mit Extrakt aus Probe DkZy-2 (Diesel Zyklus 2) wiesen gegenüber Probe DkZy-1 etwas niedrigere Mutationsraten auf. Bei vier Verdünnungsstufen wurde das Kriterium von MARON und

² Hinweis zur Interpretation: Diese Anzahl wäre zu erwarten, wenn 1 mg Methylmethansulfonat in Dosen von ca. 260 μg auf eine entsprechend große Anzahl von Agarschalen einwirken würde.

³ MARON u. AMES (1983) [9]: 2730 Revertanten / μl MMS ($r = 1,3 \text{ g / ml}$)

AMES (1983) [9] erfüllt. Bezogen auf 1 mg Partikel ergab sich rechnerisch eine Netto-Revertantenanzahl von 506.

Der Extrakt aus Probe DkP8-1 (Diesel Leerlauf) erreichte wieder von allen Proben die höchsten Revertantenanzahlen mit im Mittel 976 Revertanten pro Platte beim Einsatz des unverdünnten Extrakts. In diesem Testsystem war sogar der am stärksten verdünnte Extrakt signifikant mutagen. Es ergab sich eine Netto-Revertantenanzahl von 1146 pro mg Partikel.

Probe RkZy-1 (Rapsöl Zyklus 1) zeigte für die höchste Verdünnungsstufe signifikante Revertantenanzahlen. Bezogen auf 1 mg ergab sich eine Netto-Anzahl von 189 Revertanten.

Probe RkZy-2 (Rapsöl Zyklus 2) wies bei drei Verdünnungsstufen signifikante Revertantenanzahlen auf. Die rechnerische Ermittlung der Revertantenanzahl pro mg Partikel ergab 293.

Der Extrakt aus Probe RkP8-1 (Rapsöl Leerlauf 1) löste unverdünnt, in der 1:2 Verdünnung und teilweise in der 1:4 Verdünnung signifikant erhöhte Revertantenanzahlen aus. Bezogen auf 1 mg Partikel ergab sich rechnerisch eine Netto-Revertantenanzahl von 286.

Platten mit Extrakt aus Probe RkP8-2 (Rapsöl Leerlauf 2) wiesen bei drei Verdünnungsstufen erhöhte Revertantenanzahlen gegenüber den von DMSO ausgelösten Spontanmutationen auf, wobei das Kriterium von MARON und AMES (1983) [9] nur beim unverdünnten Extrakt teilweise erfüllt wurde. Dennoch konnte eine Netto-Revertantenanzahl errechnet werden: Sie betrug 242 Revertanten pro mg Partikel.

Bei der Blindprobe (Blank) ergaben sich bei allen Verdünnungsstufen Werte, die den von DMSO ausgelösten Spontanmutationen entsprachen.

Tabelle 22 und Tabelle 23 zeigen die Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 ohne S9-Mix für alle untersuchten Extrakte. Dabei beziehen sich die Dosisangaben bei den Positivkontrollen auf die dosierte Masse des jeweiligen Stoffs. Bei den Partikelproben gibt die Dosis jene Menge an Partikeln an, aus der die dichlormethanol-löslichen Anteile extrahiert und auf die Platte dosiert worden sind.

Tabelle 22: *Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 ohne S9-Mix für die Positivkontrolle (MMS) sowie für die Extrakte der Partikelproben aus dem Dieselkraftstoffbetrieb*

| Dosis/Platte | MMS | | | |
|--------------|--------------------------|-------------|------------|------------|
| µg | A | B | C | Mittelwert |
| 8,1 | 123 | 136 | 148 | 136 |
| 16 | 164 | 159 | 189 | 171 |
| 33 | 161 | 202 | 202 | 188 |
| 65 | 216 | 244 | 239 | 233 |
| 130 | 287 | 307 | 302 | 299 |
| 260 | 431 | 428 | 449 | 436 |
| Dosis/Platte | DkZy-1 (Diesel Zyklus 1) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 20 | 155 | 157 | 111 | 141 |
| 40 | 180 | 154 | 176 | 170 |
| 80 | 228 | 209 | 253 | 230 |
| 161 | 303 | 316 | 323 | 314 |
| 321 | 456 | 393 | 412 | 420 |
| 643 | 641 | 732 | 662 | 678 |
| Dosis/Platte | DkZy-2 (Diesel Zyklus 2) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 17 | 142 | 145 | 161 | 149 |
| 33 | 182 | 194 | 178 | 185 |
| 66 | 218 | 212 | 242 | 224 |
| 133 | 250 | 285 | 272 | 269 |
| 266 | 350 | 339 | 327 | 339 |
| 532 | 484 | 486 | 483 | 484 |
| Dosis/Platte | DkP8-1 (Diesel Leerlauf) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 19 | 203 | 193 | 180 | 192 |
| 37 | 236 | 259 | 257 | 251 |
| 75 | 361 | 376 | 333 | 357 |
| 149 | 509 | 477 | 458 | 481 |
| 299 | 649 | 596 | 610 | 618 |
| 598 | 914 | 1090 | 923 | 976 |

Fettdruck: Anzahlen an Revertanten oberhalb der Schwelle „2facher Blindwert“
MMS: Methylmethansulfonat

Tabelle 23: *Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 ohne S9-Mix für die Extrakte der Partikelproben aus dem Rapsölkraftstoffbetrieb sowie für die Blindprobe (Blank)*

| Dosis/Platte | RkZy-1 (Rapsöl Zyklus 1) | | | |
|--------------|----------------------------|------------|------------|------------|
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 15 | 130 | 134 | 120 | 128 |
| 31 | 147 | 161 | 145 | 151 |
| 61 | 154 | 158 | 166 | 159 |
| 122 | 166 | 146 | 148 | 153 |
| 245 | 178 | 231 | 193 | 201 |
| 489 | 252 | 263 | 272 | 262 |
| Dosis/Platte | RkZy-2 (Rapsöl Zyklus 2) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 15 | 136 | 158 | 142 | 145 |
| 31 | 171 | 157 | 172 | 167 |
| 62 | 214 | 249 | 190 | 218 |
| 124 | 257 | 231 | 225 | 238 |
| 248 | 267 | 231 | 274 | 257 |
| 496 | 324 | 335 | 332 | 330 |
| Dosis/Platte | RkP8-1 (Rapsöl Leerlauf 1) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 16 | 148 | 172 | 122 | 147 |
| 32 | 155 | 184 | 159 | 166 |
| 65 | 178 | 171 | 184 | 178 |
| 129 | 170 | 196 | 197 | 188 |
| 259 | 260 | 188 | 219 | 222 |
| 517 | 280 | 305 | 325 | 303 |
| Dosis/Platte | RkP8-2 (Rapsöl Leerlauf 2) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 18 | 184 | 156 | 167 | 169 |
| 37 | 151 | 172 | 170 | 164 |
| 73 | 180 | 162 | 168 | 170 |
| 147 | 257 | 218 | 231 | 235 |
| 294 | 210 | 236 | 251 | 232 |
| 587 | 270 | 320 | 328 | 309 |
| Dosis/Platte | Blank (Blindprobe) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 0 | 155 | 112 | 143 | 137 |
| 0 | 160 | 163 | 148 | 157 |
| 0 | 165 | 216 | 178 | 186 |
| 0 | 150 | 177 | 151 | 159 |
| 0 | 155 | 246 | 143 | 181 |
| 0 | 153 | 112 | 148 | 138 |

Fettdruck: Anzahlen an Revertanten oberhalb der Schwelle „2facher Blindwert“

5.2.1.4 Mutantenstamm TA100 mit S9-Mix

Für die Negativkontrollen mit S9-Mix (Tabelle 24) wurden im Mittel 158, 206, 203 und 180 Revertanten pro Agarplatte ermittelt. Die Werte lagen somit weitgehend im üblichen Wertebereich von 75 - 200 Revertanten pro Platte.

Tabelle 24: Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 mit S9-Mix für das geprüfte DMSO

| Proben | Dosis/Platte μl | DMSO | | | | | Mittelwert |
|-----------------|--------------------|------|-----|-----|-----|-----|------------|
| | | A | B | C | D | E | |
| DkZy-1 / RkZy-1 | 100 | 148 | 157 | 152 | 160 | 171 | 158 |
| DkZy-2 / RkZy-2 | 100 | 190 | 224 | 211 | 187 | 216 | 206 |
| DkP8-1 / RkP8-1 | 100 | 226 | 192 | 201 | 196 | 201 | 203 |
| Blank / RkP8-2 | 100 | 176 | 153 | 188 | 189 | 194 | 180 |

Abbildung 21 zeigt die mit dem TA100-Stamm mit S9-Mix erzielten Dosis-Wirkungsbeziehungen.

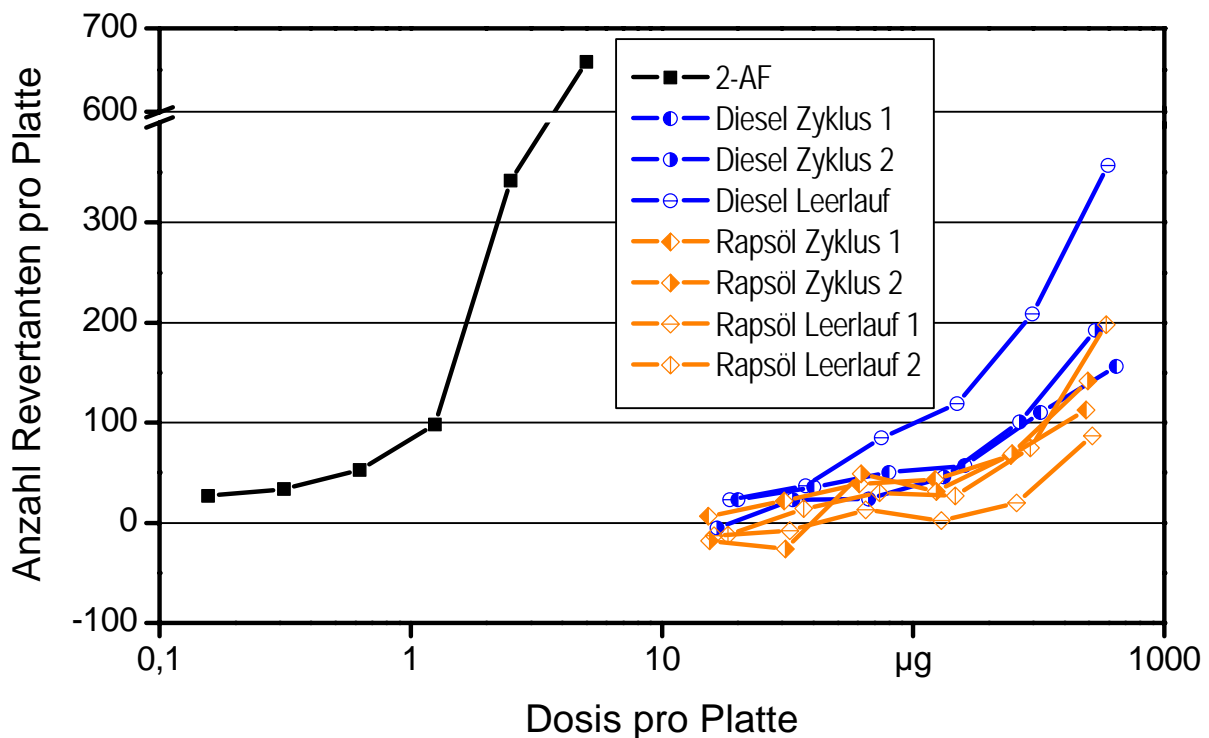


Abbildung 21: Vergleich der mit dem TA100-Stamm mit S9-Mix erzielten Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Positivkontrolle mit 2-AF sowie für die Extrakte aller Proben

Die Positivkontrolle 2-Aminofluoren (2-AF) lieferte bei 2 geprüften Dosierungen signifikant erhöhte Revertantenzahlen. Die Auswertung ergab $1,3 \times 10^5$ Netto-Revertanten pro mg 2-AF. Dieser Wert liegt in der Größenordnung der Befunde von MARON und AMES (1983) [9], die $3,0 \times 10^5$ Revertanten pro mg 2-AF erfasst haben.

Platten mit Extrakt aus Probe DkZy-1 (Diesel Zyklus 1) zeigten tendenziell erhöhte Revertantenzahlen mit steigender Extraktkonzentration. Bezogen auf 1 mg Partikel ergab sich eine Netto-Anzahl von 188 Revertanten.

Platten mit Extrakt aus Probe DkZy-2 (Diesel Zyklus 2) wiesen gegenüber Probe DkZy-1 etwas höhere Mutationsraten auf. Bei Einsatz von unverdünntem Extrakt wurde das Kriterium von MARON und AMES (1983) [9] teilweise erfüllt. Bezogen auf 1 mg Partikel ergab sich rechnerisch eine Netto-Revertantenzahl von 275.

Der Extrakt aus Probe DkP8-1 (Diesel Leerlauf) erreichte auch hier von allen Proben die höchsten Revertantenzahlen mit im Mittel 560 Revertanten pro Platte beim Einsatz des unverdünnten Extrakts. Die Revertantenzahlen waren hier bei zwei Verdünnungsstufen signifikant erhöht. Es ergab sich eine Netto-Revertantenzahl von 436 pro mg Partikel.

Probe RkZy-1 (Rapsöl Zyklus 1) wies tendenziell leicht erhöhte Revertantenzahlen gegenüber den von DMSO ausgelösten Spontanmutationen auf. Die von MARON und AMES (1983) [9] für den Nachweis einer mutagenen Wirkung empfohlene Erhöhung der Revertantenzahl je Platte (Verdopplung der Revertantenzahl im Vergleich zum Blindwert) wurde zwar nicht erreicht, doch konnte die Netto-Revertantenzahl berechnet werden. Sie betrug 161 Revertanten pro mg Partikel.

Auch Probe RkZy-2 (Rapsöl Zyklus 2) und Probe RkP8-1 (Rapsöl Leerlauf 1) wiesen steigende Revertantenzahlen bei höheren Konzentrationen auf, allerdings wurde das Kriterium von MARON und AMES (1983) [9] nicht erfüllt. Die Netto-Revertantenzahlen pro mg Partikel konnten mit 215 für Probe RkZy-2 und 152 für Probe RkP8-1 berechnet werden.

Bei Probe RkP8-2 (Rapsöl Leerlauf 2) löste der unverdünnte Extrakt signifikant erhöhte Revertantenzahlen aus. Rechnerisch ergab sich eine Netto-Revertantenzahl von 292 pro mg Partikel.

Bei der Blindprobe (Blank) ergaben sich bei allen Verdünnungsstufen Werte, die den von DMSO ausgelösten Spontanmutationen entsprachen.

Tabelle 25 und Tabelle 26 zeigen die Ergebnisse im Überblick. Dabei beziehen sich die Dosisangaben bei den Positivkontrollen auf die dosierte Masse des jeweiligen Stoffs. Bei den Partikelproben gibt die Dosis jene Menge an Partikeln an, aus der die dichlormethanollöslichen Anteile extrahiert und auf die Platte dosiert worden sind.

Insgesamt führte die Zugabe von S9-Mix nicht zu einer Erhöhung der Mutationsraten gegenüber den Ansätzen ohne S9-Mix.

Tabelle 25: *Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 mit S9-Mix für die Positivkontrolle (2-AF) sowie die Extrakte der Partikelproben aus dem Dieselmotortrieb*

| Dosis/Platte | 2-AF | | | |
|--------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| µg | A | B | C | Mittelwert |
| 0,156 | 184 | 184 | 185 | 184 |
| 0,313 | 203 | 207 | 164 | 191 |
| 0,625 | 211 | 212 | 210 | 211 |
| 1,25 | 231 | 323 | 212 | 255 |
| 2,50 | 509 | 488 | 503 | 500 |
| 5,00 | 772 | 849 | 831 | 817 |
| Dosis/Platte | DkZy-1 (Diesel Zyklus 1) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 20 | 190 | 178 | 173 | 180 |
| 40 | 198 | 188 | 196 | 194 |
| 80 | 216 | 217 | 191 | 208 |
| 161 | 201 | 212 | 231 | 215 |
| 321 | 276 | 260 | 266 | 267 |
| 643 | 318 | 281 | 341 | 313 |
| Dosis/Platte | DkZy-2 (Diesel Zyklus 2) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 17 | 217 | 207 | 177 | 200 |
| 33 | 254 | 213 | 218 | 228 |
| 66 | 214 | 227 | 249 | 230 |
| 133 | 259 | 261 | 235 | 252 |
| 266 | 312 | 318 | 289 | 306 |
| 532 | 356 | 414 | 423 | 398 |
| Dosis/Platte | DkP8-1 (Diesel Leerlauf) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 19 | 219 | 213 | 246 | 226 |
| 37 | 266 | 226 | 229 | 240 |
| 75 | 269 | 330 | 266 | 288 |
| 149 | 324 | 324 | 319 | 322 |
| 299 | 408 | 426 | 404 | 413 |
| 598 | 564 | 524 | 593 | 560 |

Fettdruck: Anzahlen an Revertanten oberhalb der Schwelle „2facher Blindwert“
 2-AF: 2-Aminofluoren

Tabelle 26: *Bruttoanzahlen an Revertanten mit TA100 mit S9-Mix für die Extrakte der Partikelproben aus dem Rapsölkraftstoffbetrieb sowie für die Blindprobe*

| Dosis/Platte | RkZy-1 (Rapsöl Zyklus 1) | | | |
|--------------|----------------------------|-----|------------|------------|
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 15 | 178 | 166 | 149 | 164 |
| 31 | 164 | 188 | 188 | 180 |
| 61 | 181 | 197 | 213 | 197 |
| 122 | 184 | 203 | 216 | 201 |
| 245 | 239 | 220 | 214 | 224 |
| 489 | 300 | 273 | 239 | 271 |
| Dosis/Platte | RkZy-2 (Rapsöl Zyklus 2) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 15 | 193 | 196 | 175 | 188 |
| 31 | 167 | 183 | 189 | 180 |
| 62 | 252 | 252 | 259 | 254 |
| 124 | 249 | 227 | 234 | 237 |
| 248 | 263 | 278 | 283 | 275 |
| 496 | 323 | 349 | 370 | 347 |
| Dosis/Platte | RkP8-1 (Rapsöl Leerlauf 1) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 16 | 195 | 156 | 221 | 191 |
| 32 | 164 | 221 | 201 | 195 |
| 65 | 215 | 205 | 229 | 216 |
| 129 | 210 | 221 | 186 | 206 |
| 259 | 215 | 220 | 234 | 223 |
| 517 | 293 | 275 | 304 | 291 |
| Dosis/Platte | RkP8-2 (Rapsöl Leerlauf 2) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 18 | 178 | 173 | 152 | 168 |
| 37 | 192 | 211 | 178 | 194 |
| 73 | 198 | 230 | 203 | 210 |
| 147 | 215 | 209 | 198 | 207 |
| 294 | 246 | 273 | 246 | 255 |
| 587 | 382 | 345 | 407 | 378 |
| Dosis/Platte | Blank (Blindprobe) | | | |
| µg Partikel | A | B | C | Mittelwert |
| 1 | 145 | 159 | 148 | 151 |
| 1 | 169 | 170 | 154 | 164 |
| 1 | 147 | 173 | 177 | 166 |
| 1 | 182 | 156 | 155 | 164 |
| 1 | 173 | 165 | 183 | 174 |
| 1 | 161 | 170 | 210 | 180 |

Fettdruck: Anzahlen an Revertanten oberhalb der Schwelle „2facher Blindwert“

5.2.1.5 Vergleich der Ergebnisse

In Relation zu den mutagen wirkenden Reinchemikalien (Positivkontrollen) – mit Ausnahme von Methylmethansulfonat – erwiesen sich die untersuchten Extraktinhaltsstoffe aller Proben im Ames-Test mit den Prüfstämmen TA98 und TA100 als vergleichsweise wenig wirksam. Der Teststamm TA100 ohne metabolische Aktivierung mit S9-Mix zeigte die größte Sensitivität gegenüber der Partikelextrakte auf. Bei diesem Teststamm sind auch die Unterschiede der mutagenen Wirkung zwischen den Partikelextrakten aus dem Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff und Rapsölkraftstoff am größten.

Tabelle 27, Abbildung 22 und Abbildung 23 geben einen Überblick über die ermittelte Anzahl an Netto-Revertanten bei den Untersuchungen und zeigen die Ergebnisse bezogen auf ein mg Partikel bzw. einen Liter Abgas (unverdünnt).

Tabelle 27: *Ermittelte Anzahlen an zusätzlichen Revertanten bezogen auf ein Milligramm der Prüfsubstanzen bzw. auf einen Liter Abgas (unverdünnt)*

| Netto-Revertanten | TA98 ohne S9 | | TA98 mit S9 | | TA100 ohne S9 | | TA100 mit S9 | |
|-------------------|-----------------------|------|------------------------|------|------------------------|------|------------------------|------|
| Positivkontrolle | 3-NBA | | 2-AF | | MMS | | 2-AF | |
| | 2,3 x 10 ⁸ | | 1,76 x 10 ⁵ | | 1,25 x 10 ³ | | 1,32 x 10 ⁵ | |
| Bezugsgröße | 1 mg | 1 l | 1 mg | 1 l | 1 mg | 1 l | 1 mg | 1 l |
| Dieselbetrieb | | | | | | | | |
| DkZy-1 | 43 | 1,6 | 59 | 2,3 | 716 | 27,3 | 188 | 7,2 |
| DkZy-2 | 80 | 3,0 | n.d. | n.d. | 506 | 19,0 | 275 | 10,3 |
| DkP8-1 | 121 | 4,0 | 149 | 4,9 | 1146 | 37,4 | 436 | 14,2 |
| Rapsölbetrieb | | | | | | | | |
| RkZy-1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 189 | 5,7 | 161 | 4,9 |
| RkZy-2 | 47 | 1,5 | 53 | 1,6 | 293 | 9,1 | 215 | 6,7 |
| RkP8-1 | 55 | 4,0 | 58 | 4,2 | 286 | 20,8 | 152 | 11,1 |
| RkP8-2 | 50 | 3,9 | 50 | 3,9 | 242 | 19,0 | 292 | 23,0 |

n.d.: nicht bestimmbar

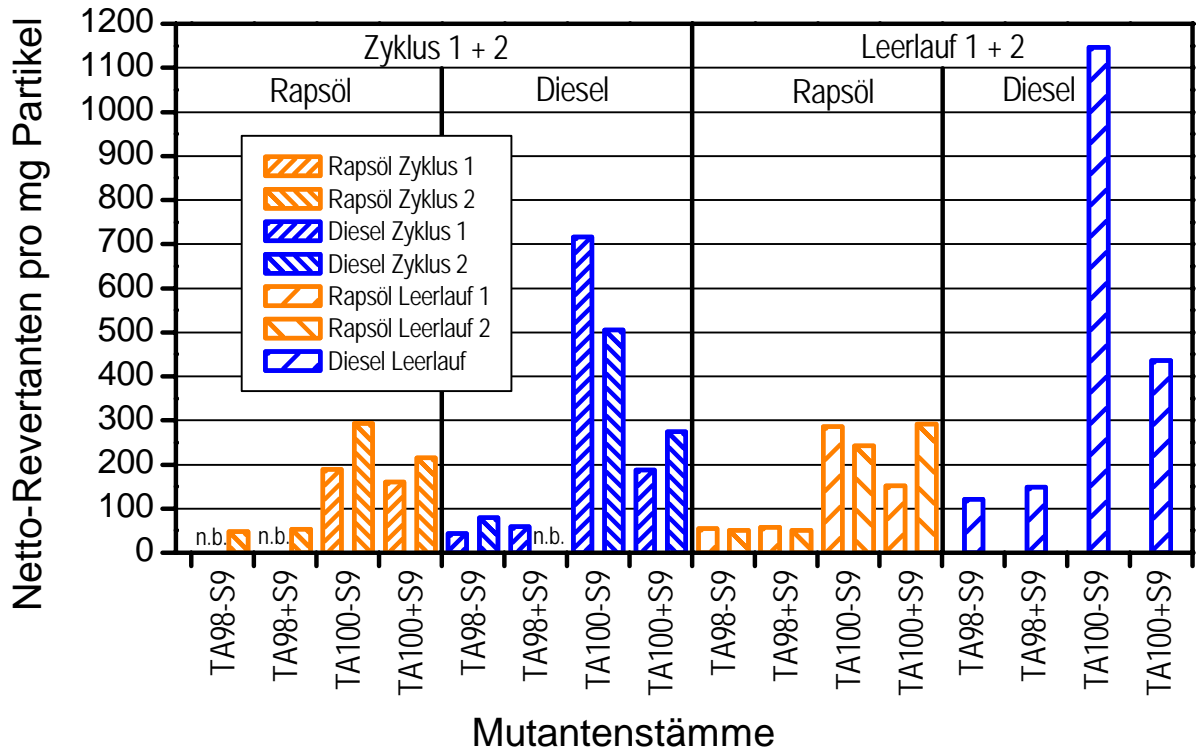


Abbildung 22: Anzahl an zusätzlichen Revertanten (Netto-Revertanten) bezogen auf 1 mg der Partikelproben

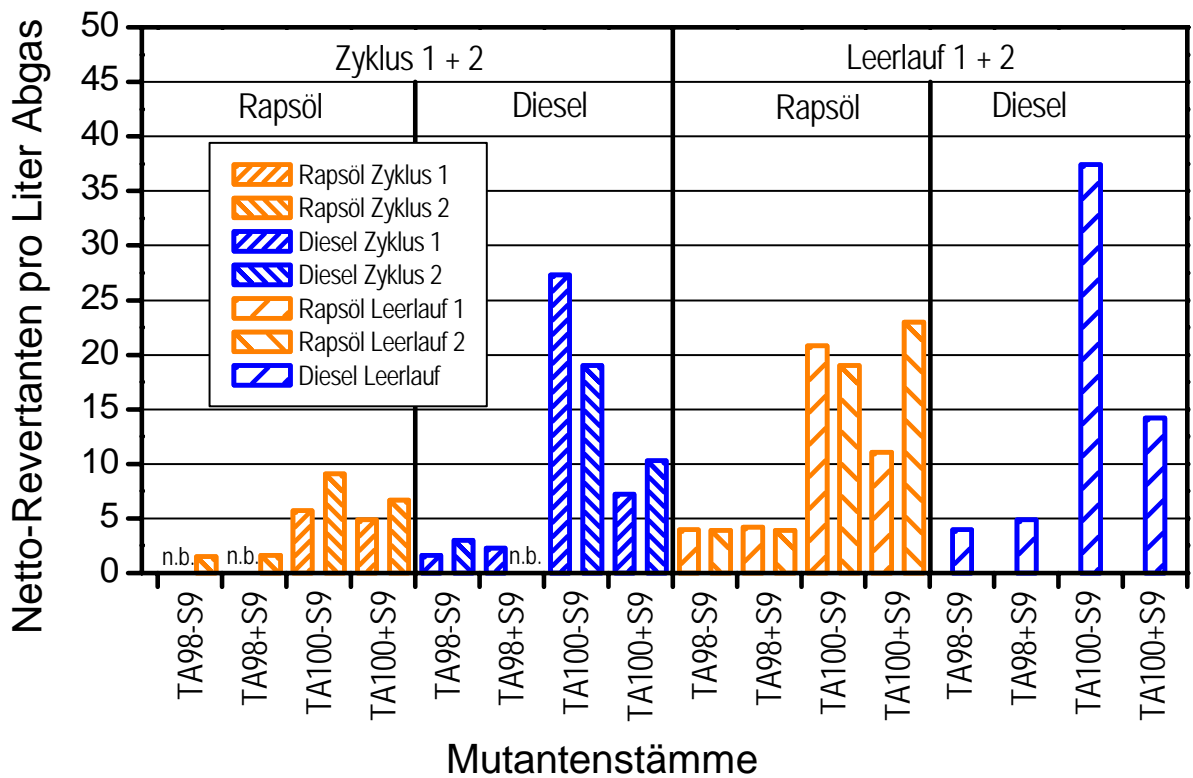


Abbildung 23: Anzahl an zusätzlichen Revertanten (Netto-Revertanten) pro Liter Abgas (unverdünn)

In Abbildung 24 ist die relative Mutagenität der Abgaspartikelextrakte beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zum Betrieb mit Diesellokraftstoff über den gesamten 8-Phasen-Prüfzyklus und im Leerlauf dargestellt. Die Ergebnisse werden wiederum zum einen auf die gleiche Partikelmasse und zum anderen auf das gleiche Abgasvolumen bezogen.

Dabei zeigt sich, dass die Mutagenität von Partikelemissionen bezogen auf die gleiche Partikelmasse beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff über alle 8 Prüfphasen mit ca. 39 bis 90 % auf deutlich geringerem Niveau als beim Betrieb mit Diesellokraftstoff liegt. Da sich jedoch die Partikelmasseemissionen je nach Prüfphase sehr stark unterscheiden und insbesondere im Leerlauf mit Rapsölkraftstoff höher liegen als mit Diesellokraftstoff (Abbildung 17), ist auch die Betrachtung der Ergebnisse, bezogen auf das gleiche Abgasvolumen, von Bedeutung. In Bezug auf das gleiche Abgasvolumen beträgt die mutagene Wirkung der Partikelemissionen bei Rapsölkraftstoffbetrieb ca. 32 bis 73 % des Diesellokraftstoffbetriebs.

In der Leerlaufphase ist die Mutagenität von Rapsölkraftstoff bezogen auf eine einheitliche Partikelmasse mit einem Niveau von 23 bis 51 % ebenfalls deutlich geringer als bei Diesellokraftstoff. Bezogen auf das gleiche Abgasvolumen ist das mutagene Potenzial mit Rapsölkraftstoff beim Bakterienstamm TA100 mit S9-Mix um 20 % höher, bei dem Bakterienstamm TA98 ohne S9-Mix etwa gleich hoch und bei TA98 mit S9-Mix um 16 % geringer als mit Diesellokraftstoff. Beim Bakterienstamm TA100 ohne metabolische Aktivierung, welcher die größte Sensitivität aller Teststämme aufwies, war nahezu eine Halbierung der mutagenen Wirkung gegenüber Diesellokraftstoff festzustellen (Abbildung 24).

Insgesamt ist bei den hier durchgeführten Untersuchungen die Mutagenität von Abgaspartikeln, die bei der Verbrennung von Rapsölkraftstoff auf einem Planfilter bei max. 52 °C gemäß der Richtlinie 97/68/EG gesammelt wurden, sowohl über den gesamten 8-Phasen-Prüfzyklus als auch im Leerlauf meist deutlich geringer als bei der Verbrennung von Diesellokraftstoff.

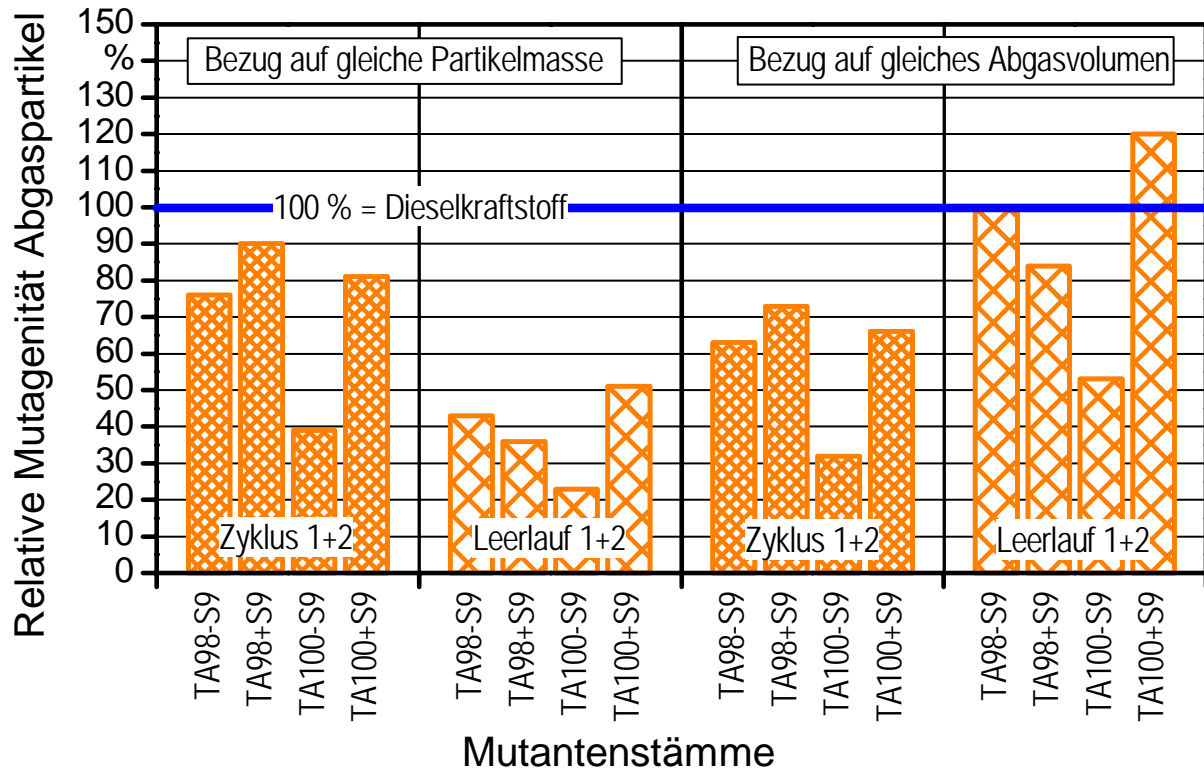


Abbildung 24: Relative Mutagenität von Abgaspartikeln beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zum Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff, bezogen auf Partikelmasse und Abgasvolumen beim 8-Phasen-Prüfzyklus und im Leerlauf

5.2.2 Chemische Analyse der Abgaspartikel

Für die Einordnung der Ergebnisse im Ames-Test ist die Betrachtung der in der chemischen Analyse gemessenen Werte für Nitro-PAK (Tabelle 28) hilfreich.

Die meisten Nitro-PAK sind deutlich wirksamer in Ames-Testsystemen ohne metabolische Aktivierung, also ohne Zugabe von S9-Mix (KIELHORN et al., 2003 [4]). Dies gilt insbesondere (ein bis mehrere Größenordnungen) für 2-Nitropyren und 3-Nitrofluoranthene, die zudem um eine Größenordnung mutagener sind als 1-Nitropyren und 2-Nitrofluoranthene.

3-Nitrofluoranthene war nur in den Proben der Dieselmotorkraftstoffpartikel nachweisbar. Die Proben DkZy-1 und DkZy-2 wiesen zudem hohe Mengen an 2-Nitropyren auf. Beides kann die im Testsystem TA100 ohne S9-Mix gefundenen hohen Revertantenzahlen für diese Proben erklären (Abbildung 22 und Abbildung 23). Auf das Testsystem TA100 mit S9-Mix war dagegen wie erwartet keine Auswirkung sichtbar.

Tabelle 28: Ergebnisse der chemischen Analyse für Nitro-PAK

| Nitro-PAK | DkZy-1 | DkZy-2 | DkP8-1 | RkZy-1 | RkZy-2 | RkP8-1 | RkP8-2 | Blank |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1-Pyr in ng/g | 912,13 | 1063,29 | 1310,81 | 729,57 | 1004,89 | 1524,45 | 1426,61 | n.d. |
| 2-Pyr in ng/g | 1774,06 | 1716,46 | 391,89 | 1108,06 | 765,89 | 135,28 | 155,96 | n.d. |
| 2-Fla in ng/g | 221,76 | 237,97 | 243,24 | 400,44 | 358,50 | 348,60 | 293,58 | n.d. |
| 3-Fla in ng/g | 460,25 | 506,33 | 585,59 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| Summe | 3368 | 3524 | 2531 | 2238 | 2129 | 2008 | 1876 | 0 |

1-Pyr: 1-Nitropyren

2-Pyr: 2-Nitropyren

2-Fla: 2-Nitrofluoranthren

3-Fla: 3-Nitrofluoranthren

n.d.: Wert unterhalb der Nachweisgrenze

In den getesteten Prüfzyklen war die Summe der Nitro-PAK im Dieselbetrieb um mehr als 1000 ng/g Partikel höher als im Rapsölbetrieb. Die deutlichsten Unterschiede ergaben sich für 2-Nitropyren sowie für 3-Nitrofluoranthren. Letztere Substanz wurde sowohl über die Gesamtzyklen, als auch in der Leerlaufphase mit Diesel festgestellt, jedoch nicht im Rapsölbetrieb. Im Extrakt der Partikel aus dem Dieselbetrieb wurden für die Einzelsubstanzen und in der Summe, außer für 2-Nitrofluoranthren, durchgehend höhere Werte je g Partikel ermittelt als im Extrakt der Partikel aus dem Rapsölkraftstoffbetrieb.

Die Ergebnisse der einzelnen Substanzen gleicher Testabläufe (Gesamtzyklus und Leerlauf) zeigen in ihrer Größenordnung bei den Nitro-PAK und den PAK gute Übereinstimmung (DkZy-1 und DkZy-2; RkZy-1 und RkZy-2; RkP8-1 und RkP8-2).

Bei den PAK beinhaltet in Summe der Extrakt der Proben DkZy-1 und DkZy-2 mehr PAK je g Partikel als die Proben RkZy-1 und RkZy-2 aus dem Rapsölbetrieb (Tabelle 29). Die Menge an PAK der Partikelemissionen im Rapsölbetrieb ist in der Leerlaufphase größer als bei den Proben der Gesamtzyklen. Die Summe der PAK aus dem Dieselbetrieb zeigen diesbezüglich ein umgekehrtes Bild (Abbildung 25).

Tabelle 29: Ergebnisse der chemischen Analyse für PAK

| PAK in µg/g Partikel | DkZy-1 | DkZy-2 | DkP8-1 | RkZy-1 | RkZy-2 | RkP8-1 | RkP8-2 | Blank |
|---------------------------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| Acenaphthen | 3,07 | 2,75 | 4,78 | 1,53 | 1,44 | 2,05 | 2,01 | < 0,23 |
| Acenaphthylen | 6,81 | 5,69 | 4,01 | 7,96 | 10,55 | 15,91 | 18,69 | < 0,2 |
| Anthracen | 77,89 | 86,85 | 24,22 | 12,22 | 18,59 | 28,01 | 22,90 | 0,41 |
| Benz(a)anthracen | 8,68 | 10,99 | 21,33 | 19,03 | 25,34 | 41,58 | 44,25 | < 0,06 |
| Benzo(a)pyren | 1,01 | 1,64 | 6,16 | 12,99 | 15,80 | 23,99 | 22,60 | < 0,29 |
| Benzo(e)pyren | 1,60 | 2,35 | 10,21 | 28,60 | 33,54 | 53,68 | 50,22 | < 0,27 |
| Benzo(g,h,i)perylene | < 1,36 | < 1,64 | 2,28 | 24,51 | 38,57 | 70,14 | 65,01 | < 1,48 |
| Benzo(k)fluoranthren | 3,47 | 4,75 | 19,15 | 59,22 | 71,60 | 124,79 | 123,27 | < 0,29 |
| Chrysen / Triphenylen | 54,91 | 66,89 | 90,96 | 70,04 | 79,89 | 137,85 | 136,00 | < 0,06 |
| Coronen | < 1,36 | < 1,64 | < 1,45 | 13,54 | 30,74 | 70,11 | 65,48 | < 1,48 |
| Dibenz(a,h)anthracen | < 1,36 | < 1,64 | < 1,45 | 2,73 | 3,92 | 8,42 | 7,99 | < 1,48 |
| Fluoranthren | 201,95 | 216,68 | 77,64 | 171,78 | 196,19 | 242,18 | 258,54 | 0,62 |
| Fluoren | 14,67 | 11,77 | 17,47 | 8,07 | 10,35 | 17,45 | 21,43 | < 0,23 |
| Indeno[1,2,3,c,d]pyren | < 1,19 | < 1,44 | 1,41 | 16,88 | 28,61 | 69,00 | 66,34 | < 1,3 |
| Naphthalin | 0,62 | 0,68 | 0,81 | 0,37 | 0,80 | 0,92 | 1,66 | 0,32 |
| Perylen | 1,47 | 1,65 | 1,52 | 4,55 | 5,86 | 9,10 | 9,21 | < 0,15 |
| Phenanthren | 611,65 | 583,51 | 323,76 | 132,20 | 147,58 | 227,81 | 272,97 | 1,57 |
| Pyren | 251,00 | 266,03 | 190,31 | 204,43 | 231,05 | 311,96 | 339,97 | 0,19 |
| Summe Benzo-(b,j,k)fluoranthene | 2,20 | 3,36 | 12,73 | 42,80 | 51,46 | 94,10 | 93,22 | < 0,14 |
| Summe PAK | 1241 | 1265 | 808 | 833 | 1001 | 1549 | 1621 | 3 |

BEACHTEN: Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sich die Analysen auf die mit Dichlormethan aus den Partikeln extrahierten PAK beziehen. Häufig werden auch alle im Abgas vorhandenen PAK (gasförmige und am Partikel gebundene PAK) analysiert

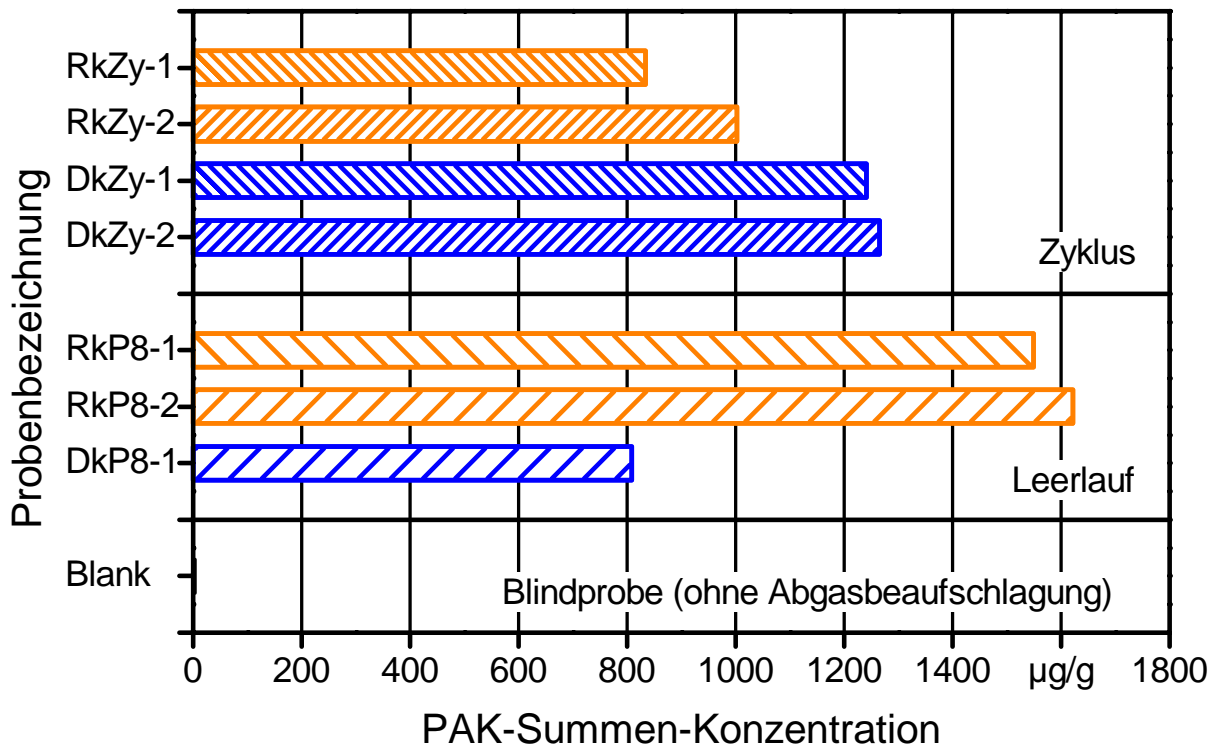


Abbildung 25: Vergleich der PAK-Summen-Konzentrationen in den Rapsöl- und Dieselabgaspartikelproben über den gesamten Zyklus, im Leerlauf sowie der Blindprobe

In Abbildung 26 sind die einzelnen PAK-Komponenten für den gesamten Prüfzyklus, in Abbildung 27 für den Leerlauf mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass im Dieseldieselkraftstoffbetrieb über den gesamten Prüfzyklus insbesondere Anthracen und Phenanthren in deutlich höheren Konzentrationen in den Partikelextrakten wiederzufinden sind, als im Rapsölkraftstoffbetrieb. Mit Rapsölkraftstoff hingegen sind bei den PAK-Komponenten Benzo(a)pyren, Benzo(e)pyren, Benzo(g,h,i)perylene, Benzo(k)fluoranthren, Indeno[1,2,3,c,d]pyren und bei den Benzo(g,h,i)fluoranthenen höhere Konzentrationen in den Partikelextrakten feststellbar als im Dieseldieselbetrieb (Abbildung 26). Im Leerlaufbetrieb sind beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff mit Ausnahme von Phenanthren und Acenaphthen höhere Konzentrationen bei den einzelnen partikelgebundenen PAK zu verzeichnen als im Dieseldieselbetrieb (Abbildung 27).

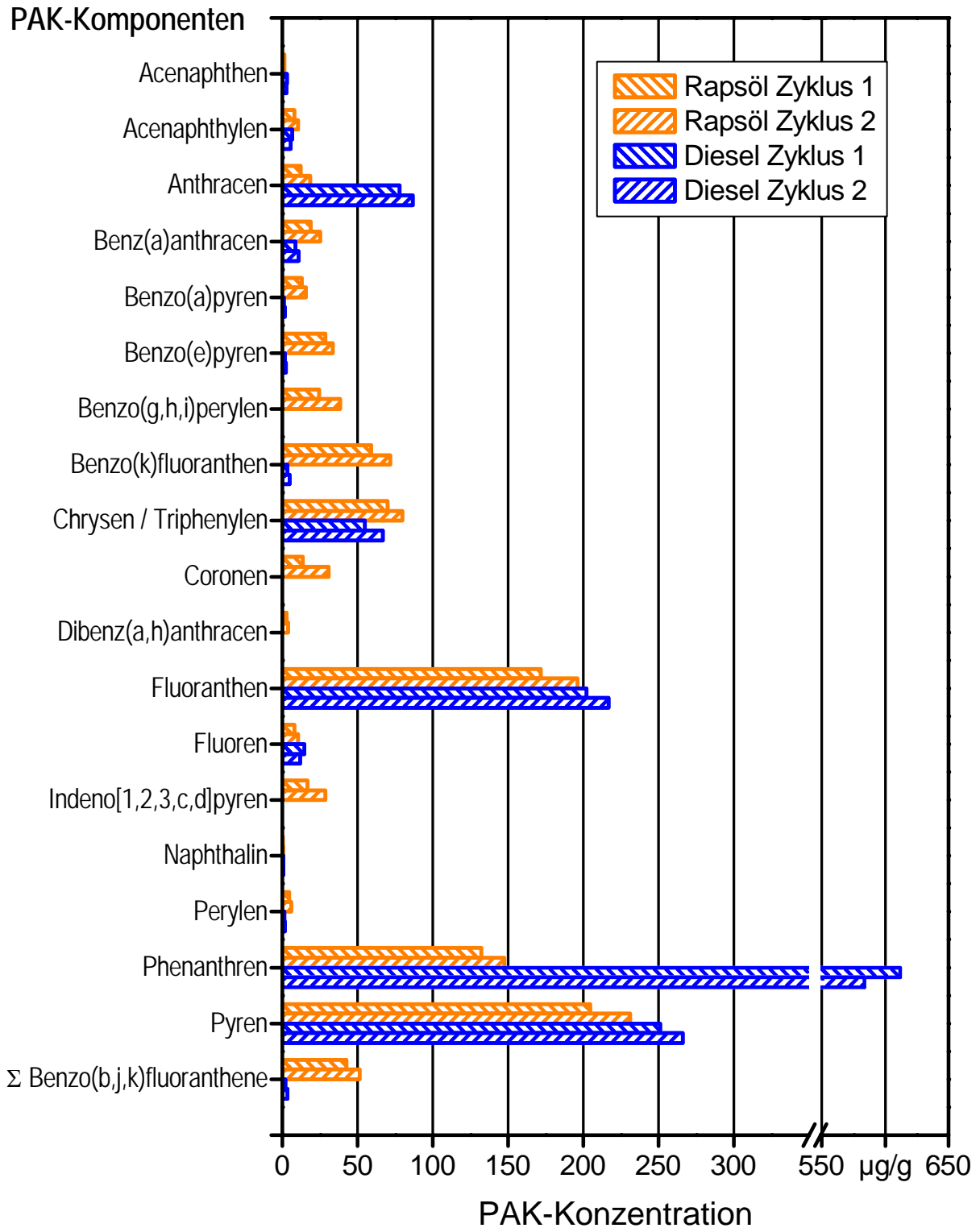


Abbildung 26: Vergleich der PAK-Konzentrationen in den Proben aus den Gesamtzyklen beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff

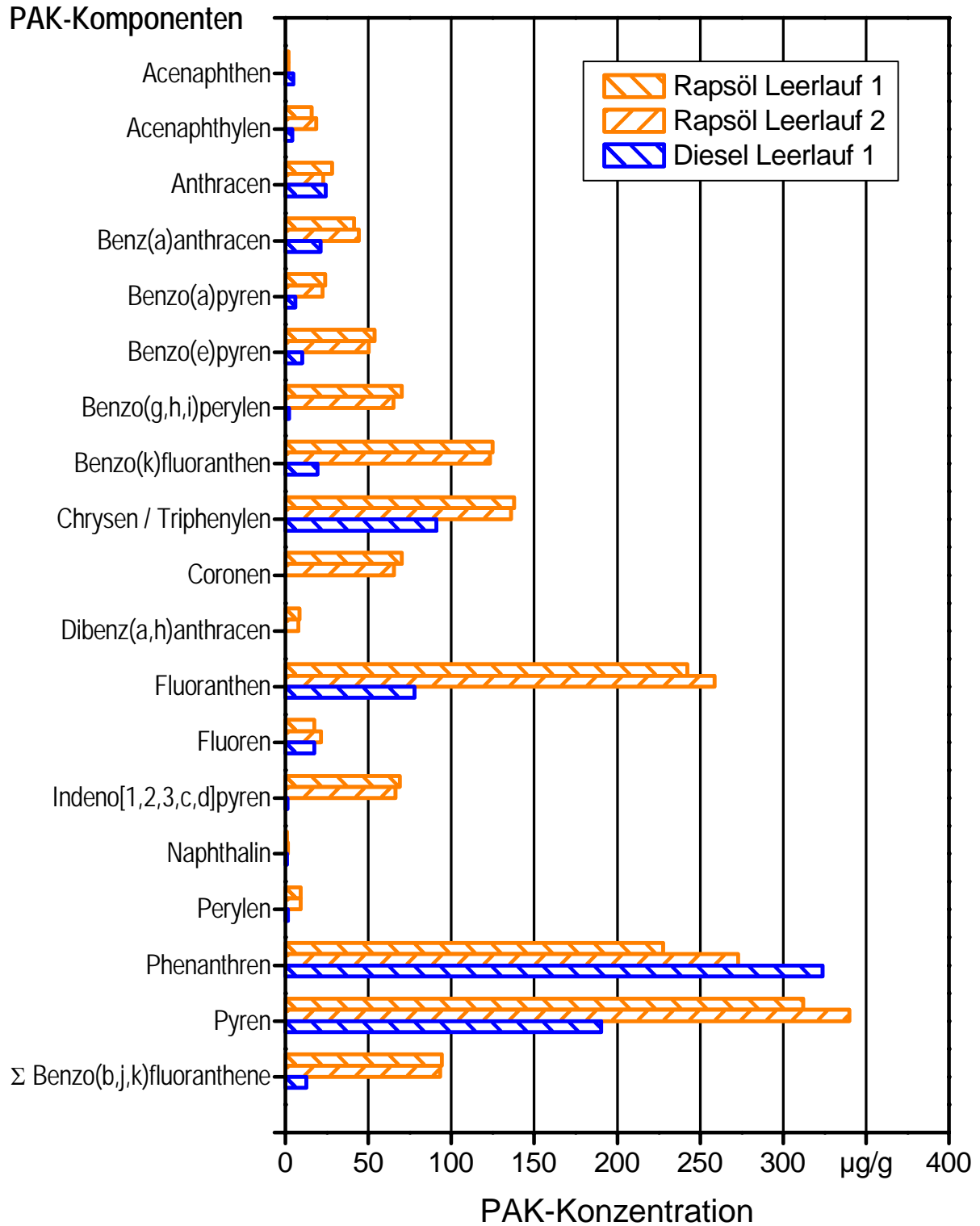


Abbildung 27: Vergleich der PAK-Konzentrationen in den Proben aus den Leerlaufphasen beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff

6 Diskussion

Die mutagene Wirkung der Probenextrakte sowohl aus dem Betrieb mit Rapsöl- als auch mit Dieselmotorkraftstoff ist insgesamt sehr gering und liegt teilweise an der unteren Nachweisgrenze, so dass der beobachtete Anstieg der Revertantenanzahlen nicht immer eindeutig dem Extrakt zurechenbar ist.

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden ca. 30 mg Partikel je Probe verwendet. Für die Gewinnung dieser Proben wurden bei den Prüfzyklen jeweils ca. 0,9 m³ Abgas, bezogen auf Normbedingungen (anteilig im verdünnten Abgas) in 100 min über zwei hintereinander angeordnete Planfilter gesaugt. Im Leerlauf betrug das abgesaugte Abgasvolumen ca. 1,0 m³ bei Dieselmotorbetrieb und ca. 0,4 m³ bei Rapsölbetrieb bei einer Absaugdauer von 30 bzw. 60 min. Für größere Probenmengen müsste entweder die Absaugzeit erhöht bzw. mehrere beladene Filter aus Wiederholungszyklen zu einer Probe vereint werden. Da es keine speziellen Vorschriften zur Probenahme von Abgaspartikeln für die Untersuchung des mutagenen Potenzials gibt, erfolgte die Probenahme in Anlehnung an die Partikelmassebestimmung gemäß der Richtlinie 97/68/EG im verdünnten Abgas bei max. 52 °C (siehe Kapitel 4.3.5). Dies erschien sinnvoll, da es sich hierbei um ein standardisiertes Verfahren handelt und die Verdünnung des Abgases den realen Verhältnissen des Motorbetriebs unter Umgebungsbedingungen nahe kommt.

Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff zeigt, dass das mutagene Potenzial der Partikel beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff über den gesamten Testzyklus etwa 10 bis 60 % und im Leerlaufbetrieb etwa 50 bis 80 % niedriger ist als mit Dieselmotorkraftstoff. Bezogen auf ein einheitliches Abgasvolumen ist die Mutagenität der Partikel beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zum Dieselmotorbetrieb über den gesamten Prüfzyklus um ca. 30 bis 70 % niedriger und im Leerlauf zwischen ca. 20 % höher und 50 % niedriger.

Im Unterschied zu den vorliegenden Ergebnissen ermittelten BÜNGER et al. (2007) [1] an einem nicht für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepassten Motor anderer Bauart und dem dafür vorgeschriebenen (im Vergleich zu den vorliegenden Untersuchungen unterschiedlichen) Prüfzyklus (ESC test cycle) mit einem nicht näher definierten Rapsölkraftstoff und einem abweichenden Partikelprobenahmeverfahren (im unverdünnten, gekühlten Abgas), eine um den Faktor 5 bis 18 (Rapsöl nicht vorgewärmt) bzw. eine um den Faktor 13 bis 59 (Rapsöl auf 70 °C vorgewärmt) höhere Mutagenität von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff (Tabelle 30). Es ist bekannt, dass der Motortyp, das Motor- und Abgasreinigungssystem, die verwendeten Testzyklen, die Betriebsbedingungen, die Kraftstoffqualitäten und die Probenahmebedingungen einen großen Einfluss auf die Zusammensetzung und damit auch auf die mutagene Wirkung der Partikel im Abgas haben [15]. Somit lassen sich die unterschiedlichen Ergebnisse verschiedener Untersuchungen erklären. Eine verallgemeinernde Aussage über das mutagene Potenzial verschiedener Kraftstoffe im Vergleich ist deshalb derzeit nicht möglich, da die Ergebnisse der einzelnen Studien immer nur für die jeweils gewählten Rahmenbedingungen gelten. Hierzu ist eine breitere Datenbasis erforderlich.

Als Versuchsträger diente ein Deutz-Fahr Traktor der Abgasstufe II, der durch ein Ein-Tank-System an den Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepasst war. Bei der Verwendung von Dieselmotorkraftstoff in einem auf Rapsölkraftstoffbetrieb umgerüsteten Motor ist mit einer Veränderung des

Emissionsverhaltens im Vergleich zum Zustand vor der Umrüstung zu rechnen. Dies lässt sich auch anhand der Ergebnisse der wiederkehrenden Emissionsmessungen erkennen (Kapitel 5.1.1). Möglicherweise könnten sich deshalb bei einem Vergleich des mutagenen Potenzials eines Serien-Dieselmotors mit Dieselkraftstoff mit einem optimierten Pflanzenölmotor mit Rapsölkraftstoff andere Ergebnisse ergeben. Allerdings beeinflusst eine Umrüstung eines konventionellen Serien-Dieselmotors auf Rapsölkraftstoff den Dieselbetrieb meist weniger stark als die Verwendung von Rapsölkraftstoff in einem nicht umgerüsteten modernen konventionellen Dieselmotor, wo es zu einer vermehrt unvollständigen Verbrennung durch schlechte Einspritzstrahlqualität und Wandanlagerungen des Kraftstoffs im Brennraum kommen kann.

Tabelle 30: Übersicht bisheriger Untersuchungen zur Mutagenität von Rapsölkraftstoff

| Quelle | STALDER et al. (1994) [14] | BÜNGER et al. (2007) [1] | KRIST et al. (2007) [6] | Vorliegende Untersuchung |
|---|---------------------------------------|---|-----------------------------------|---|
| Testzyklus bei Probenahme | Volllast | 13-Stufen Test | 13-Stufen-Test | 8-Stufen-Test und Leerlauf |
| Maschine/ Fahrzeug/Motor | Traktor KHD-Wirbelkammermotor F4L912W | Lkw Mercedes-Benz Motor OM 906 LA, EURO III | Lkw DAF CF 85, EURO V | Traktor mit Deutz-Motor BF6M1013EC, Abgasstufe II |
| Motoranpassung/ Umrüstung | Gilt als pflanzenölauglich | mit und ohne Kraftstoffheizung (70 °C) im Tank | Zweitank-System „Bioltec“ | Ein-Tank-System „Hausmann“ |
| Kraftstoff | Rapsöl und Diesel | Rapsöl und Diesel | Rapsöl-/Dieselmischung und Diesel | Rapsölkraftstoff (DIN V 51605), Diesel (EN 590) |
| Mutagenität bezogen auf gleiche Masse extrahierter Partikel | | | 0,4 bis 0,6 x DK | 8-Stufen-Zyklus: 0,4 bis 0,9 x DK Leerlauf: 0,2 bis 0,5 x DK |
| Mutagenität bezogen auf gleiches Volumen gefilterten Abgases | 0,1 bis 4,0 x DK | RK nicht vorgeheizt: 5 bis 18 x DK RK vorgeheizt: 13 bis 59 x DK | - | 8-Stufen-Zyklus: 0,3 bis 0,7 x DK Leerlauf: 0,5 bis 1,2 x DK |

DK = Dieselkraftstoff
RK = Rapsölkraftstoff

Um mögliche Ursachen für die mutagenen Wirkungen der Abgaspartikel herauszufinden, wurde eine chemische Analyse der Abgaspartikel hinsichtlich polyzyklisch aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie im speziellen auch ausgewählter nitrierter PAK (Nitro-PAK) durchgeführt. Nitro-PAK stehen in Verdacht einen wesentlichen Anteil an der mutagenen Aktivität der Partikel zu haben.

Die Summe der Nitro-PAK der Partikelproben weist trotz geringerer NO_x -Emissionen, die die Bildung von Nitro-PAK begünstigen (Kapitel 3), eine deutlich höhere Konzentration bei Dieseltrieb im Vergleich zum Rapsölbetrieb auf. Dies ist insbesondere auf die erhöhten Konzentrationen der stark mutagen wirksamen Komponenten 2-Nitropyren und 3-Nitrofluoranthren zurückzuführen. Letztere wurde in allen Betriebsarten und Testverfahren (Zyklus und Leerlauf) mit Diesel festgestellt, jedoch nicht im Rapsölbetrieb. Die höheren Revertantenanzahlen im Dieseltrieb können somit unter anderem auch auf die erhöhten Konzentrationen an Nitro-PAK zurückgeführt werden.

Die Summenkonzentration der PAK hingegen zeigt kein eindeutiges Bild. Die Menge an PAK im Rapsölbetrieb ist während des Leerlauftests höher als im Zyklustest, der Dieseltrieb zeigt diesbezüglich ein umgekehrtes Bild, obwohl in beiden Fällen die Netto-Revertantenanzahl im Leerlauf höher liegt als über den gesamten Zyklus (Abbildung 27). Dies kann darauf hindeuten, dass die Nitro-PAK einen stärkeren Einfluss auf die Mutagenität haben, als die PAK-Komponenten und bestätigt somit bisherige Ergebnisse beim Betrieb mit Dieseltreibstoff (Kapitel 3).

Alle Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung bei den Wiederholungsmessungen. Lediglich bei Rapsölbetrieb im Leerlauf kam es mit dem Bakterienstamm TA100 mit S9-Mix-Zugabe zu größeren Abweichungen bei den Netto-Revertanten (Tabelle 25). Auch die Ergebnisse bei den Nitro-PAK und den PAK stimmen bei den gleichen Testabläufen (Zyklus / Leerlauf) in ihrer Größenordnung gut überein. Dies deutet auf eine gute Wiederholbarkeit der Untersuchungen hin. Anhand der Ergebnisse mit der Blindprobe (Blank), die genauso wie alle anderen Proben behandelt, jedoch nicht mit Abgas beaufschlagt wurde, konnte festgestellt werden, dass keine methodisch bedingte sekundäre Verunreinigung mit mutagenen Stoffen bei der Partikelprobenahme erfolgt war.

Folgerungen

Das mutagene Potenzial von Abgaspartikeln beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff ist bei den vorliegenden Untersuchungen im rapsölkraftstofftauglichen Traktor sowohl über den gesamten Prüfzyklus (97/68/EG) als auch im Leerlaufbetrieb signifikant niedriger als mit Dieseltreibstoff. Die Partikelproben aus dem Leerlaufbetrieb weisen mit Rapsölkraftstoff ein höheres mutagenes Potenzial auf als über den gesamten Prüfzyklus gemittelt.

Die vorliegenden Ergebnisse werden durch eine aktuelle Untersuchung von KRIST et al. (2007) [6] bestätigt, eine weitere aktuelle Untersuchung von BÜNGER et al. (2007) [1] weist dagegen auf ein zum Teil deutlich höheres mutagenes Potenzial von Rapsölkraftstoff hin. Die Unterschiede liegen womöglich in den jeweiligen Versuchsbedingungen begründet. Eine Aussage zur Mutagenität eines Kraftstoffs sollte nur unter Angabe der exakten Versuchsbedingungen (z. B. Probenahme, Kraftstoffqualität) erfolgen. Somit ist eine verallgemeinernde Aussage zur mutagenen und der davon abgeleiteten kanzerogenen Wirkung von mit Rapsölkraftstoff betriebenen Motoren gemäß des derzeitigen Kenntnisstandes nicht ohne weiteres möglich.

Zukünftig gilt es verstärkt die Beschaffenheit und Zusammensetzung der Partikel zu berücksichtigen, um die stark mutagen wirkenden Komponenten und Eigenschaften zu identifizieren, um

danach kraftstoff- und motorspezifische Maßnahmen zu deren Minderung ergreifen zu können. Dies erfordert umfangreiche weitere Untersuchungen, zumal das Zusammenwirken verschiedener Abgasbestandteile zu einer Verstärkung oder Minderung der mutagenen Aktivität von Einzelkomponenten führt.

Zukünftige Motorkonzepte und Abgasnachbehandlungssysteme sowie die Weiterentwicklung pflanzenöлтаuglicher Motoren in Verbindung mit der Absenkung des Grenzwerts für Stickstoffoxidemissionen bergen ein großes Potenzial zur Reduzierung der mutagenen Wirkung von Abgasemissionen sowohl beim Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff als auch mit Rapsölmotorkraftstoff.

Das Technologie- und Förderzentrum (TFZ) wird auf diesem Gebiet weitergehende Forschungsarbeiten durchführen.

Zusammenfassung

Die Nutzung von Rapsölkraftstoff in pflanzenöлтаuglichen Traktoren kann einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Darüber hinaus bietet die Nutzung von Rapsölkraftstoff weitere Vorteile hinsichtlich des Boden- und Gewässerschutzes, der Erhöhung der Versorgungssicherheit und Steigerung der Wertschöpfung in der Landwirtschaft durch heimische Futtermittel- und Kraftstofferzeugung. Aufgrund der Energiesteuerbefreiung von Rapsölkraftstoff im Bereich der Landwirtschaft bietet sich in vielen Fällen auch die Möglichkeit der Kraftstoffkosteneinsparung im Vergleich zur Nutzung von fossilem Diesellokstoff. Voraussetzung für den zuverlässigen Betrieb eines pflanzenöлтаuglichen Dieselmotors mit Rapsölkraftstoff ist ein hochwertiger Kraftstoff, der die Anforderungen der DIN V 51605 erfüllt. Rapsölkraftstofftaugliche Traktoren, die direkt von der Landmaschinenindustrie angeboten werden, befinden sich derzeit in der Markteinführung, wodurch die Bedeutung von Rapsölkraftstoff noch weiter zunehmen wird.

Aufgrund der verstärkten Nutzung von Rapsölkraftstoff in der Praxis gewinnen derzeit nicht hinreichend geklärte Fragestellungen bezüglich der Emissionen von rapsölkraftstoffbetriebenen Dieselmotoren zunehmend an Bedeutung. Dabei spielt auch die mutagene und kanzerogene Wirkung der Abgasemissionen auf den menschlichen Organismus eine wesentliche Rolle. Einzelne stichpunktartige Forschungsarbeiten zur mutagenen Wirkung von Partikelemissionen aus rapsölkraftstoffbetriebenen Motoren kommen zu gegensätzlichen Ergebnissen. Aufgrund von Medienberichten, wonach beim Einsatz von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Diesellokstoff ein extrem erhöhtes Krebspotenzial bestehe, herrscht in der Öffentlichkeit eine große Verunsicherung hinsichtlich der Gesundheitsgefährdung durch Rapsölkraftstoffemissionen.

Deshalb war es Ziel dieser Untersuchung, einen auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüsteten Traktor hinsichtlich der Mutagenität der Partikelemissionen zu überprüfen. Zur besseren Interpretation der Ergebnisse wurde zusätzlich auch die Zusammensetzung der Partikel hinsichtlich mutagen und kanzerogen relevanter polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie nitrierter PAK (Nitro-PAK) bestimmt.

Untersucht wurden Proben von Partikelemissionen, die an Filterplättchen gemäß des Prüfzyklus nach Richtlinie 2000/25/EG unter definierten Bedingungen abgeschieden wurden. Die Proben setzten sich aus Einzelproben der insgesamt 8 Prüfphasen innerhalb des Motorkennfelds zusammen. Weiterhin wurden auch Proben bei Leerlaufbetrieb gesondert untersucht. Als Versuchsträger diente ein Deutz-Fahr Traktor, der mit einem Ein-Tank-System auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet war. Die Partikelprobenahme erfolgte am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ), Straubing beim Betrieb des Traktors mit normgerechtem Rapsöl- und Diesellokstoff. Die Versuchsbedingungen bei den Partikelprobenahmen wurden mittels einer kontinuierlichen Datenaufzeichnung erfasst.

Die Erbgut verändernde Wirkung (Mutagenität) sowie die Konzentrationen der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) und Nitro-PAK der insgesamt 8 Partikelproben wurden am bifa Umweltinstitut, Augsburg mithilfe des Ames-Tests, bzw. mittels chemischer Analyse bestimmt.

Die mutagenen Wirkungen aller Probenextrakte liegen trotz einer Partikelprobenmenge von jeweils ca. 30 mg auf sehr geringem Niveau und teilweise an der unteren Nachweisgrenze, so dass der beobachtete Anstieg der Revertantenanzahl nicht immer eindeutig dem Extrakt zurechenbar ist.

Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen Rapsöl- und Dieselkraftstoff zeigt, dass das mutagene Potenzial der Partikel beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff über den gesamten Testzyklus etwa 10 bis 60 % und im Leerlaufbetrieb etwa 50 bis 80 % niedriger ist als mit Dieselkraftstoff. Bezogen auf ein einheitliches Abgasvolumen ist die Mutagenität der Partikel beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zum Dieselbetrieb über den gesamten Prüfzyklus um ca. 30 bis 70 % niedriger und im Leerlauf zwischen ca. 20 % höher und 50 % niedriger. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich beim Betrieb eines Serien-Dieselmotors mit Dieselkraftstoff (anstelle des umgerüsteten Motors) abweichende Ergebnisse ergeben können.

Im Unterschied zu den vorliegenden Ergebnissen ermittelten beispielsweise BÜNGER et al. (2007) [1] an einem nicht für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepassten Motor anderer Bauart und anderem Prüfzyklus mit einem nicht näher definierten Rapsölkraftstoff und einem abweichenden Partikelprobenahmeverfahren, eine deutlich höhere Mutagenität von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Die Unterschiede der Ergebnisse liegen möglicherweise in den jeweiligen Versuchsbedingungen begründet, so dass eine Aussage zur Mutagenität eines Kraftstoffs nur unter Angabe der exakten Versuchsbedingungen erfolgen sollte.

Die Ergebnisse der chemischen Partikelanalyse ergaben, dass die Summe der Nitro-PAK der Partikelproben eine deutlich höhere Konzentration bei Dieselbetrieb im Vergleich zum Rapsölbetrieb aufweisen. Insbesondere die stark mutagen wirksamen Komponenten 2-Nitropyren und 3-Nitrofluoranthren sind bei den Proben aus dem Dieselkraftstoffbetrieb in größerer Menge zu finden. Die höheren Revertantenanzahlen im Dieselbetrieb können somit zumindest teilweise auf die erhöhten Konzentrationen an Nitro-PAK zurückgeführt werden.

Der Vergleich der PAK-Summenkonzentrationen hingegen zeigt kein eindeutiges Bild. Die Menge an den Partikeln angelagerter PAK war im Rapsölbetrieb während des Leerlaufs höher als im Zyklus. Der Dieselbetrieb zeigte diesbezüglich ein umgekehrtes Bild, obwohl in beiden Fällen die Netto-Revertantenanzahl im Leerlauf höher lag als über den gesamten Zyklus. Dies kann darauf hindeuten, dass die Nitro-PAK einen stärkeren Einfluss auf die Mutagenität haben, als die PAK-Komponenten und bestätigt somit bisherige Ergebnisse aus der Literatur.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung belegen eine geringere Mutagenität der Partikelemissionen beim Einsatz von normgerechtem Rapsölkraftstoff in pflanzenölauglichen Motoren im Vergleich zum Einsatz von Dieselkraftstoff. Die in der Vergangenheit in Medien getroffenen Aussagen, dass die Emissionen bei der Verwendung von Rapsölkraftstoff generell mehrfach mutagen bzw. krebserregend sind als mit Dieselkraftstoff, konnten eindeutig widerlegt werden.

Quellenverzeichnis

- [1] BÜNGER, J.; KRAHL, J.; MUNACK, A.; RUSCHEL, Y.; SCHRÖDER, O.; EMMERT, B.; WESTPHAL, G.; MÜLLER, M.; HALLIER, E.; BRÜNING, T. (2007): Strong mutagenic effects of diesel engine emissions using vegetable oil as fuel. *Archives Toxicology*, Vol. 81, Nr. 8, S. 599-603
- [2] EUROPÄISCHE UNION (2000): Richtlinie 2000/25/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus Motoren, die für den Antrieb von land- und forstwirtschaftlichen Zugmaschinen bestimmt sind, und zur Änderung der Richtlinie 74/150/EWG. ABl. Nr. L 173 vom 12.07.2000, zuletzt geändert durch Richtlinie 2005/13/EG (ABl. Nr. L 55 v. 01.03.2005) der Kommission
- [3] EUROPÄISCHE UNION (1997): Richtlinie 97/68/EG des europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. ABl. Nr. L 59 vom 27.02.1998, zuletzt geändert durch Richtlinie 2004/26/EG (ABl. Nr. L 225 vom 25.06.2004) des Europäischen Parlaments u. des Rates
- [4] KIELHORN, J.; WAHNSCHAFFE, U.; MANGELSDORF, I. (2003): Selected Nitro- and Nitro-oxy-polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Health Criteria* 229, WHO, Geneva
- [5] KRAHL, J.; MUNACK, A.; SCHRÖDER, O.; BÜNGER, J. (2003): Influence of biodiesel and different designed diesel fuels on the exhaust gas emissions and health effects. *Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper*, 2003-01-3199, S. 1-9
- [6] KRIST, H.; FISCHER, H.; HOPPENHEIDT, K. (2007): Prüfung der Mutagenität von Inhaltsstoffen partikulärer Abgasbestandteile im Ames-Test. Bericht für bioltec evol-v-ram GmbH. Augsburg: bifa Umweltinstitut, 19 Seiten
- [7] LENGE, R. (2006): Mehr Durst als im Prospekt. In: *top agrar*, Nr. 7, S. 68-71
- [8] MAHON, G. A. T.; MIDDLETON, B.; ROBINSON, W.D.; GREEN, M. H. L.; MITCHELL, I. DE G.; TWEATS, D. J. (1989): Analysis of data from microbial colony assays. In: KIRKLAND, D. J. (Hrsg.): *Statistical evaluation of mutagenicity test data*. Cambridge University Press: Cambridge, S. 26-65
- [9] MARON, D. M.; AMES, B. N. (1983): Revised methods for the Salmonella mutagenicity test. *Mutation Research*, Jg. 113, Nr. 3-4, S. 173-215
- [10] MOLLENHAUER, K. (2002): *Handbuch Dieselmotoren*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1069 Seiten
- [11] MORTELMANS, K.; ZEIGER, E. (2000): The Ames Salmonella/microsome mutagenicity assay. *Mutation Research*, 455, S. 29-60
- [12] MÜCKE, W.; HUBER, W.; HUNSTEIN, R.; NICKEL, T.; KOCH, M.; WEINDL, J.; BRAUN, A. (2002): Mutagenität und Nitro-PAK-Gehalt von Feinstaub – Untersuchungen an einem verkehrsbelasteten Standort. Endbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt. Altendorf bei Bamberg: M. & D. Gräbner, ISBN 3-932108-13-2

- [13] NYLUND, N.-O.; ERKKILÄ, K.; LAPPI, M.; IKONEN, M. (2004): Transit Bus Emission Study: Comparison of Emissions from Diesel and Natural Gas Buses. VTT RESEARCH REPORT PRO3/P5150/04
- [14] STALDER, K.; GERHARD, V.; KRAHL, J. (1994): Zur kanzerogenen Wirkung von Rußen aus Dieselmotoren im Betrieb mit Rapsöl, RME und Dieselkraftstoff. In: C.A.R.M.E.N. e. V. (Hrsg.): Emissionen von Pflanzenöl-Kraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, Rimpar: C.A.R.M.E.N. e.V., S. 30-35
- [15] WACHTER, W. (2007): Die Umweltrelevanz des Dieselmotors. Dozentenvorlesung im Rahmen der Lehrveranstaltung „Ausgewählte Kapitel der Verbrennungskraftmaschine“ Technische Universität Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 35 Seiten; Available at: <http://fvkma.tu-graz.ac.at/>. Accessed at 14th October 2007
- [16] WEILNHAMMER, U. (2007): Abgase und Pflanzenkraftstoffe – neueste Untersuchungen und Lösungen zum Thema „Mutagenität“. In: NOVA-INSTITUT GMBH (Hrsg.): Erster Internationaler Kongress zu Pflanzenöl-Kraftstoffen. Tagungsband zum Ersten Internationalen Kongress zu Pflanzenöl-Kraftstoffen, Messe Erfurt, 6.-7. September 2007. Hürth: nova-Verlag, S. 205-225, ISBN 13987-3-9805840-8-1

Anhang

Anhang 1: Mittelwerte und Standardabweichungen je Prüfphase der Messwerte während der Emissionsmessung der Versuchsvariante RkZy-1

| Kürzel | Einheit | Prüfphase 1 | | Prüfphase 2 | | Prüfphase 3 | | Prüfphase 4 | | Prüfphase 5 | | Prüfphase 6 | | Prüfphase 7 | | Prüfphase 8 | |
|-------------------|---------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. |
| T _{LU1} | °C | 37,6 | 0,7 | 40,0 | 0,0 | 40,0 | 0,0 | 40,0 | 0,0 | 40,3 | 0,5 | 43,0 | 0,0 | 42,0 | 0,0 | 40,3 | 0,5 |
| T _{LU2} | °C | 46,9 | 0,3 | 46,1 | 0,2 | 44,5 | 0,2 | 41,1 | 0,3 | 46,4 | 0,7 | 46,7 | 0,3 | 44,6 | 0,3 | 36,3 | 0,3 |
| t | s | 900 | | 900 | | 901 | | 601 | | 600 | | 600 | | 600 | | 901 | |
| Bh | | 1073 | | 1073 | | 1074 | | 1075 | | 1076 | | 1076 | | 1077 | | 1078 | |
| DH1 | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | |
| DH2 | | ein | | ein | | ein | | ein | | ein | | ein | | ein | | ein | |
| T _{LA1} | °C | 30,6 | 0,2 | 31,1 | 0,3 | 31,2 | 0,4 | 30,0 | 0,1 | 31,1 | 0,3 | 31,7 | 0,1 | 32,0 | 0,1 | 30,8 | 0,2 |
| T _{LL} | °C | 59,1 | 0,5 | 50,9 | 0,6 | 46,4 | 0,5 | 40,5 | 0,3 | 47,1 | 0,7 | 44,3 | 0,8 | 41,3 | 0,3 | 33,5 | 0,2 |
| p _{LL} | mbar | 182 | 1 | 157 | 1 | 137 | 1 | 110 | 0 | 152 | 1 | 133 | 1 | 118 | 0 | 96 | 0 |
| T _{KT1} | °C | 47,6 | 1,4 | 47,1 | 1,2 | 45,8 | 1,3 | 44,5 | 0,5 | 47,5 | 1,0 | 47,8 | 0,8 | 46,7 | 0,5 | 42,9 | 0,4 |
| T _{KT2} | °C | 43,6 | 2,0 | 44,1 | 1,5 | 42,4 | 1,8 | 42,4 | 0,9 | 45,3 | 0,9 | 45,8 | 0,8 | 45,3 | 0,6 | 42,2 | 0,3 |
| T _{KE} | °C | 79,5 | 0,5 | 74,6 | 0,5 | 71,5 | 0,5 | 67,2 | 0,4 | 71,3 | 0,8 | 69,7 | 0,5 | 66,8 | 0,4 | 63,3 | 0,5 |
| T _{KR} | °C | 75,5 | 0,5 | 71,4 | 0,5 | 68,4 | 0,5 | 65,0 | 0,0 | 68,0 | 0,9 | 66,3 | 0,5 | 63,5 | 0,5 | 62,0 | 0,0 |
| B | l/h | 35,0 | 0,1 | 28,4 | 0,2 | 23,6 | 0,1 | 13,5 | 0,1 | 23,5 | 0,0 | 18,8 | 0,2 | 14,2 | 0,1 | 2,5 | 0,1 |
| T _{Oel} | °C | 93,0 | 0,4 | 87,2 | 0,3 | 84,2 | 0,2 | 79,9 | 0,2 | 89,4 | 0,6 | 86,9 | 0,4 | 82,6 | 0,1 | 75,3 | 0,1 |
| T _W | °C | 98,9 | 0,4 | 92,9 | 0,4 | 90,5 | 0,5 | 87,0 | 0,0 | 97,2 | 0,8 | 92,8 | 0,4 | 89,8 | 0,4 | 84,0 | 0,0 |
| n | rpm | 2098 | 2 | 2080 | 2 | 2082 | 2 | 2087 | 1 | 1404 | 1 | 1400 | 2 | 1402 | 1 | 844 | 3 |
| P _{TR} | % | 100 | 0 | 80 | 1 | 64 | 1 | 31 | 0 | 100 | 0 | 78 | 1 | 56 | 0 | 10 | 1 |
| M _Z | Nm | 467 | 2 | 348 | 3 | 236 | 1 | 44 | 0 | 559 | 1 | 422 | 1 | 281 | 1 | 0 | |
| n _{T2} | rpm | 2099 | 2 | 2079 | 2 | 2083 | 2 | 2087 | 2 | 1404 | 2 | 1402 | 2 | 1402 | 2 | 846 | |
| P _Z | kW | 107,8 | 0,4 | 79,5 | 0,9 | 54,1 | 0,3 | 10,2 | 0,1 | 86,3 | 0,2 | 65,1 | 0,1 | 43,3 | 0,1 | 0,0 | |
| G _{FUEL} | kg/h | 32,66 | | 25,70 | | 19,86 | | 11,35 | | 22,29 | | 17,34 | | 12,72 | | 2,28 | |
| T _{AZ1} | °C | 598,4 | 1,3 | 519,0 | 1,7 | 463,7 | 1,5 | 328,7 | 0,3 | 572,1 | 0,9 | 499,4 | 1,6 | 413,4 | 0,7 | 150,6 | 0,5 |
| T _{AZ2} | °C | 596,4 | 0,9 | 515,8 | 1,2 | 450,6 | 1,4 | 318,0 | 0,6 | 564,3 | 2,5 | 485,7 | 1,6 | 396,1 | 0,8 | 132,4 | 0,3 |
| T _{AZ3} | °C | 582,8 | 0,7 | 517,8 | 1,5 | 465,1 | 2,4 | 325,5 | 0,7 | 558,0 | 1,1 | 495,3 | 1,1 | 413,8 | 0,7 | 134,8 | 0,3 |
| T _{AZ4} | °C | 591,2 | 1,0 | 512,5 | 1,8 | 444,9 | 1,0 | 317,7 | 0,3 | 561,9 | 3,0 | 483,1 | 1,3 | 392,2 | 0,5 | 144,1 | 0,5 |
| T _{AZ5} | °C | 587,3 | 0,9 | 519,9 | 1,5 | 448,6 | 0,9 | 326,1 | 0,5 | 573,8 | 1,5 | 494,4 | 2,1 | 400,8 | 0,6 | 165,6 | 0,2 |
| T _{AZ6} | °C | 544,2 | 1,5 | 478,2 | 1,8 | 414,3 | 2,1 | 294,7 | 0,7 | 520,6 | 2,4 | 447,8 | 1,3 | 364,9 | 0,6 | 149,4 | 0,3 |
| T _{AE} | °C | 445,5 | 0,5 | 392,1 | 0,8 | 344,4 | 0,8 | 244,8 | 1,2 | 420,9 | 2,3 | 369,3 | 0,7 | 301,6 | 0,2 | 103,2 | 0,1 |

Anhang 1: Mittelwerte und Standardabweichungen je Prüfphase der Messwerte während der Emissionsmessung der Versuchsvariante RkZy-1 (Fortsetzung)

| Kürzel | Einheit | Prüfphase 1 | | Prüfphase 2 | | Prüfphase 3 | | Prüfphase 4 | | Prüfphase 5 | | Prüfphase 6 | | Prüfphase 7 | | Prüfphase 8 | |
|------------------|----------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. |
| T _{AA} | °C | 409,7 | 0,5 | 363,8 | 1,3 | 319,3 | 0,3 | 235,4 | 3,3 | 368,7 | 4,2 | 334,6 | 1,7 | 276,8 | 1,3 | 99,8 | 0,7 |
| V _{LV} | m ³ | 0,429 | | 0,431 | | 0,458 | | 0,336 | | 0,267 | | 0,272 | | 0,310 | | 0,273 | |
| T _{LV} | °C | 27,7 | 0,1 | 29,5 | 0,4 | 31,0 | 0,4 | 31,1 | 0,1 | 32,5 | 0,1 | 33,2 | 0,3 | 33,3 | 0,1 | 33,5 | 0,0 |
| p _{LV} | mbar | 55,78 | | 56,17 | | 59,06 | | 67,01 | | 48,73 | | 50,22 | | 59,54 | | 28,15 | |
| T _{LVE} | °C | 24,1 | 0,1 | 24,9 | 0,4 | 25,6 | 0,4 | 25,4 | 0,1 | 26,2 | 0,2 | 26,3 | 0,2 | 26,3 | 0,1 | 26,8 | 0,2 |
| T _{MV} | °C | 50,2 | 1,4 | 49,8 | 1,1 | 50,3 | 1,1 | 48,3 | 2,5 | 50,0 | 1,1 | 50,2 | 1,2 | 50,1 | 0,8 | 50,2 | 1,2 |
| T _{MF1} | °C | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T _{MF2} | °C | 42,8 | 0,6 | 44,4 | 0,5 | 43,4 | 0,8 | 43,0 | 1,0 | 43,9 | 1,8 | 45,8 | 1,5 | 45,3 | 1,1 | 44,3 | 0,5 |
| V _{MA} | m ³ | 0,551 | | 0,551 | | 0,581 | | 0,417 | | 0,346 | | 0,349 | | 0,383 | | 0,499 | |
| T _{MA} | °C | 27,8 | 0,2 | 29,9 | 0,3 | 31,0 | 0,4 | 31,1 | 0,0 | 32,1 | 0,1 | 33,0 | 0,2 | 33,1 | 0,1 | 33,0 | 0,0 |
| p _{MA} | mbar | -322,4 | | -340,0 | | -327,5 | | -319,4 | | -341,3 | | -339,4 | | -328,2 | | -344,7 | |

Anhang 2: Mittelwerte und Standardabweichungen je Prüfphase der Messwerte während der Emissionsmessung der Versuchsvariante RkZy-2

| Kürzel | Einheit | Prüfphase 1 | | Prüfphase 2 | | Prüfphase 3 | | Prüfphase 4 | | Prüfphase 5 | | Prüfphase 6 | | Prüfphase 7 | | Prüfphase 8 | |
|-------------------|---------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. |
| T _{LU1} | °C | 39,6 | 0,5 | 40,3 | 0,5 | 40,0 | 0,0 | 39,3 | 0,5 | 41,7 | 0,5 | 43,0 | 0,0 | 42,0 | 0,0 | 39,1 | 0,4 |
| T _{LU2} | °C | 47,6 | 0,4 | 45,9 | 0,2 | 44,8 | 0,2 | 40,9 | 0,2 | 47,3 | 0,7 | 46,0 | 0,3 | 44,1 | 0,3 | 36,8 | 0,5 |
| t | s | 901 | | 901 | | 900 | | 601 | | 599 | | 600 | | 600 | | 900 | |
| Bh | | 1073 | | 1074 | | 1075 | | 1075 | | 1076 | | 1076 | | 1077 | | 1078 | |
| DH1 | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | |
| DH2 | | ein | | ein | | ein | | ein | | ein | | ein | | ein | | ein | |
| T _{LA1} | °C | 31,6 | 0,4 | 31,0 | 0,3 | 31,6 | 0,2 | 30,1 | 0,2 | 31,5 | 0,2 | 31,7 | 0,1 | 32,0 | 0,2 | 30,1 | 0,1 |
| T _{LL} | °C | 57,7 | 1,1 | 51,9 | 0,7 | 47,3 | 0,7 | 39,9 | 0,4 | 47,9 | 0,9 | 43,7 | 0,7 | 41,3 | 0,4 | 33,9 | 0,4 |
| p _{LL} | mbar | 180 | 1 | 158 | 1 | 138 | 0 | 110 | 0 | 152 | 0 | 134 | 1 | 118 | 0 | 96 | 0 |
| T _{KT1} | °C | 50,8 | 0,7 | 50,1 | 0,8 | 49,0 | 0,5 | 46,2 | 0,4 | 50,3 | 0,8 | 49,3 | 0,5 | 48,3 | 0,5 | 42,0 | 0,0 |
| T _{KT2} | °C | 48,1 | 0,5 | 48,2 | 0,8 | 47,2 | 0,6 | 44,9 | 0,3 | 48,7 | 0,6 | 47,9 | 0,4 | 46,9 | 0,3 | 41,4 | 0,1 |
| T _{KE} | °C | 80,1 | 0,4 | 75,9 | 0,4 | 72,9 | 0,4 | 67,3 | 0,5 | 73,5 | 0,8 | 70,0 | 0,0 | 67,0 | 0,0 | 62,9 | 0,4 |
| T _{KR} | °C | 76,8 | 0,5 | 72,8 | 0,5 | 69,9 | 0,4 | 65,2 | 0,4 | 69,8 | 0,8 | 67,0 | 0,0 | 64,0 | 0,0 | 61,0 | 0,0 |
| B | l/h | 34,7 | 0,2 | 28,5 | 0,1 | 23,9 | 0,1 | 13,5 | 0,1 | 23,5 | 0,0 | 18,9 | 0,2 | 14,3 | 0,1 | 2,5 | 0,1 |
| T _{Oel} | °C | 92,3 | 0,3 | 87,6 | 0,2 | 84,7 | 0,1 | 79,4 | 0,0 | 91,4 | 0,1 | 85,9 | 0,1 | 82,5 | 0,1 | 75,3 | 0,1 |
| T _W | °C | 98,5 | 0,5 | 93,6 | 0,5 | 91,1 | 0,4 | 87,0 | 0,0 | 99,0 | 0,0 | 92,7 | 0,5 | 90,0 | 0,0 | 84,0 | 0,0 |
| n | rpm | 2101 | 1 | 2077 | 2 | 2081 | 2 | 2087 | 2 | 1404 | 2 | 1400 | 1 | 1401 | 1 | 843 | 3 |
| P _{TR} | % | 99 | 1 | 80 | 0 | 65 | 0 | 31 | 0 | 100 | 0 | 79 | 1 | 57 | 1 | 10 | 1 |
| M _Z | Nm | 460 | 5 | 351 | 1 | 242 | 1 | 44 | 0 | 564 | 1 | 423 | 1 | 283 | 1 | 0 | |
| n _{T2} | rpm | 2101 | 3 | 2077 | 2 | 2081 | 2 | 2086 | 2 | 1405 | 2 | 1400 | 0 | 1402 | 2 | 846 | |
| P _Z | kW | 106,4 | 1,0 | 80,2 | 0,2 | 55,3 | 0,3 | 10,1 | 0,1 | 87,2 | 0,2 | 65,2 | 0,1 | 43,7 | 0,2 | 0,0 | |
| G _{FUEL} | kg/h | 32,68 | | 25,61 | | 20,36 | | 11,38 | | 22,30 | | 17,28 | | 12,69 | | 2,32 | |
| T _{AZ1} | °C | 595,3 | 1,6 | 519,6 | 0,9 | 468,8 | 2,2 | 327,8 | 0,5 | 574,2 | 0,7 | 496,8 | 1,2 | 412,9 | 0,7 | 152,0 | 0,4 |
| T _{AZ2} | °C | 592,4 | 1,4 | 517,0 | 1,4 | 453,6 | 1,8 | 316,2 | 0,5 | 570,1 | 1,2 | 482,2 | 1,7 | 396,9 | 1,0 | 133,1 | 0,3 |
| T _{AZ3} | °C | 580,0 | 1,0 | 518,5 | 0,9 | 469,9 | 1,4 | 323,0 | 0,6 | 559,2 | 0,8 | 495,2 | 1,5 | 414,5 | 1,0 | 135,8 | 0,4 |
| T _{AZ4} | °C | 587,8 | 1,2 | 514,8 | 0,9 | 448,0 | 1,3 | 317,1 | 0,3 | 570,8 | 0,9 | 479,1 | 1,0 | 393,4 | 0,9 | 144,1 | 0,4 |
| T _{AZ5} | °C | 584,5 | 1,0 | 522,4 | 1,0 | 450,7 | 0,9 | 324,9 | 0,4 | 578,7 | 0,7 | 490,4 | 1,0 | 402,5 | 0,8 | 165,9 | 0,3 |
| T _{AZ6} | °C | 540,6 | 1,3 | 481,0 | 0,9 | 420,2 | 1,7 | 294,0 | 0,5 | 525,5 | 1,2 | 445,4 | 0,7 | 367,6 | 0,5 | 149,2 | 0,3 |
| T _{AE} | °C | 442,7 | 0,6 | 393,7 | 0,4 | 347,4 | 0,6 | 242,4 | 0,1 | 426,9 | 0,8 | 367,3 | 0,6 | 301,7 | 0,4 | 103,6 | 0,1 |

Anhang 2: Mittelwerte und Standardabweichungen je Prüfphase der Messwerte während der Emissionsmessung der Versuchsvariante RkZy-2 (Fortsetzung)

| Kürzel | Einheit | Prüfphase 1 | | Prüfphase 2 | | Prüfphase 3 | | Prüfphase 4 | | Prüfphase 5 | | Prüfphase 6 | | Prüfphase 7 | | Prüfphase 8 | |
|------------------|----------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. |
| T _{AA} | °C | 408,5 | 0,5 | 363,5 | 0,2 | 320,9 | 0,4 | 228,2 | 0,6 | 378,5 | 1,3 | 330,7 | 0,3 | 274,2 | 0,3 | 98,1 | 0,2 |
| V _{LV} | m ³ | 0,430 | | 0,481 | | 0,467 | | 0,333 | | 0,279 | | 0,299 | | 0,323 | | 0,332 | |
| T _{LV} | °C | 29,0 | 0,5 | 29,7 | 0,1 | 31,6 | 0,2 | 31,0 | 0,1 | 32,4 | 0,2 | 33,1 | 0,1 | 33,0 | 0,1 | 32,7 | 0,4 |
| p _{LV} | mbar | 55,78 | | 64,63 | | 60,84 | | 65,56 | | 52,27 | | 56,96 | | 63,34 | | 36,83 | |
| T _{LVE} | °C | 24,8 | 0,2 | 25,0 | 0,1 | 25,9 | 0,2 | 25,4 | 0,1 | 26,1 | 0,2 | 26,3 | 0,1 | 26,0 | 0,1 | 26,3 | 0,3 |
| T _{MV} | °C | 50,5 | 1,4 | 49,9 | 1,0 | 50,5 | 0,7 | 49,9 | 1,5 | 49,9 | 1,5 | 50,2 | 0,9 | 48,9 | 1,0 | 50,0 | 0,5 |
| T _{MF1} | °C | 42,3 | 1,4 | 44,1 | 0,4 | 43,1 | 0,8 | 43,3 | 0,7 | 44,7 | 0,8 | 44,7 | 1,0 | 42,9 | 1,5 | 45,9 | 0,4 |
| T _{MF2} | °C | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V _{MA} | m ³ | 0,549 | | 0,592 | | 0,591 | | 0,431 | | 0,348 | | 0,371 | | 0,389 | | 0,560 | |
| T _{MA} | °C | 29,1 | 0,4 | 30,0 | 0,1 | 31,5 | 0,1 | 30,9 | 0,1 | 32,2 | 0,2 | 33,0 | 0,1 | 32,7 | 0,1 | 32,3 | 0,3 |
| p _{MA} | mbar | -321,3 | | -330,5 | | -325,9 | | -315,3 | | -340,7 | | -332,4 | | -326,7 | | -331,3 | |

Anhang 3: Mittelwerte und Standardabweichungen je Prüfphase der Messwerte während der Emissionsmessung der Versuchsvariante DkZy-1

| Kürzel | Einheit | Prüfphase 1 | | Prüfphase 2 | | Prüfphase 3 | | Prüfphase 4 | | Prüfphase 5 | | Prüfphase 6 | | Prüfphase 7 | | Prüfphase 8 | |
|-------------------|---------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. |
| T _{LU1} | °C | 39,1 | 0,6 | 43,6 | 0,5 | 43,0 | 0,0 | 42,0 | 0,0 | 41,0 | 0,0 | 37,7 | 1,0 | 36,7 | 0,5 | 32,6 | 0,5 |
| T _{LU2} | °C | 49,4 | 0,6 | 48,1 | 0,6 | 45,8 | 0,4 | 41,8 | 0,2 | 45,6 | 0,6 | 44,0 | 0,6 | 41,6 | 0,4 | 34,6 | 0,2 |
| t | s | 901 | | 901 | | 900 | | 600 | | 601 | | 600 | | 600 | | 900 | |
| Bh | | 1064 | | 1064 | | 1065 | | 1066 | | 1067 | | 1067 | | 1068 | | 1069 | |
| DH1 | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | |
| DH2 | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | |
| T _{LA1} | °C | 34,1 | 0,5 | 33,5 | 0,2 | 32,3 | 0,2 | 30,9 | 0,1 | 31,2 | 0,3 | 31,1 | 0,1 | 31,1 | 0,2 | 29,8 | 0,2 |
| T _{LL} | °C | 62,2 | 1,0 | 53,4 | 0,7 | 48,3 | 0,7 | 41,0 | 0,5 | 47,7 | 0,6 | 43,5 | 0,3 | 39,2 | 0,4 | 33,7 | 0,4 |
| p _{LL} | mbar | 182 | 0 | 157 | 1 | 138 | 0 | 110 | 0 | 150 | 0 | 130 | 1 | 116 | 0 | 96 | 0 |
| T _{KT1} | °C | 51,9 | 0,4 | 50,0 | 1,3 | 49,6 | 0,5 | 48,0 | 0,0 | 51,8 | 0,4 | 48,7 | 1,0 | 48,5 | 0,5 | 45,0 | 0,0 |
| T _{KT2} | °C | 51,5 | 1,1 | 49,0 | 1,2 | 49,0 | 0,5 | 47,7 | 0,1 | 51,2 | 0,4 | 48,0 | 0,5 | 47,9 | 0,5 | 44,3 | 0,1 |
| T _{KE} | °C | 73,6 | 0,9 | 68,1 | 0,8 | 65,9 | 0,4 | 61,8 | 0,4 | 69,2 | 0,8 | 64,8 | 0,8 | 62,8 | 0,8 | 56,3 | 0,5 |
| T _{KR} | °C | 68,0 | 1,1 | 63,8 | 1,0 | 62,6 | 0,5 | 59,0 | 0,0 | 63,8 | 0,8 | 59,7 | 0,5 | 58,7 | 0,5 | 54,0 | 0,0 |
| B | l/h | 34,9 | 0,1 | 28,0 | 0,3 | 22,5 | 0,1 | 13,0 | 0,0 | 23,4 | 0,0 | 18,2 | 0,1 | 13,5 | 0,1 | 4,6 | 0,1 |
| T _{Oel} | °C | 95,3 | 0,5 | 88,7 | 0,5 | 84,8 | 0,1 | 79,7 | 0,1 | 89,3 | 0,5 | 85,2 | 0,1 | 80,7 | 0,3 | 74,2 | 0,1 |
| T _W | °C | 100,4 | 0,5 | 93,6 | 0,5 | 91,5 | 0,5 | 87,0 | 0,0 | 97,0 | 0,6 | 92,3 | 0,5 | 88,3 | 0,5 | 83,0 | 0,0 |
| n | rpm | 2099 | 3 | 2080 | 1 | 2089 | 1 | 2083 | 1 | 1396 | 1 | 1404 | 1 | 1404 | 1 | 832 | 7 |
| P _{TR} | % | 100 | 1 | 78 | 1 | 60 | 1 | 30 | 0 | 100 | 0 | 75 | 1 | 53 | 1 | 31 | 1 |
| M _Z | Nm | 445 | 2 | 335 | 2 | 227 | 1 | 41 | 0 | 529 | 1 | 382 | 2 | 252 | 3 | 0 | |
| N _{I2} | rpm | 2100 | 2 | 2079 | 2 | 2088 | 0 | 2082 | 2 | 1396 | 0 | 1404 | 1 | 1407 | 3 | 800 | |
| P _Z | kW | 102,1 | 0,4 | 76,2 | 0,4 | 51,9 | 0,2 | 9,4 | 0,1 | 80,9 | 0,2 | 58,7 | 0,3 | 38,7 | 0,4 | 0,0 | |
| G _{FUEL} | kg/h | 28,45 | | 22,14 | | 17,21 | | 9,63 | | 18,57 | | 14,07 | | 10,41 | | 1,94 | |
| T _{AZ1} | °C | 600,4 | 1,6 | 519,0 | 2,1 | 453,8 | 1,2 | 314,0 | 0,7 | 566,6 | 1,2 | 470,3 | 1,1 | 389,1 | 1,6 | 153,0 | 0,5 |
| T _{AZ2} | °C | 607,8 | 1,6 | 522,7 | 1,8 | 457,3 | 0,8 | 316,1 | 0,6 | 560,3 | 1,6 | 465,7 | 1,0 | 374,6 | 1,6 | 131,3 | 0,6 |
| T _{AZ3} | °C | 596,4 | 1,4 | 523,6 | 2,3 | 459,9 | 0,8 | 320,1 | 0,5 | 558,2 | 1,0 | 471,0 | 1,4 | 388,8 | 1,4 | 134,1 | 0,5 |
| T _{AZ4} | °C | 602,2 | 1,6 | 521,8 | 2,4 | 458,1 | 0,6 | 320,8 | 0,4 | 558,6 | 1,4 | 470,8 | 0,8 | 384,1 | 1,4 | 139,8 | 0,3 |
| T _{AZ5} | °C | 599,1 | 1,4 | 523,6 | 2,1 | 452,3 | 0,6 | 326,6 | 0,5 | 568,3 | 1,5 | 479,8 | 0,8 | 389,7 | 1,8 | 166,9 | 0,4 |
| T _{AZ6} | °C | 565,6 | 1,2 | 481,2 | 1,7 | 415,9 | 0,8 | 299,3 | 1,0 | 499,2 | 1,9 | 422,5 | 0,6 | 344,6 | 1,6 | 150,3 | 0,8 |
| T _{AE} | °C | 455,9 | 0,7 | 399,9 | 1,5 | 351,6 | 0,3 | 244,3 | 0,4 | 423,0 | 1,9 | 356,7 | 1,8 | 293,2 | 1,3 | 103,4 | 0,2 |

Anhang 3: Mittelwerte und Standardabweichungen je Prüfphase der Messwerte während der Emissionsmessung der Versuchsvariante DkZy-1 (Fortsetzung)

| Kürzel | Einheit | Prüfphase 1 | | Prüfphase 2 | | Prüfphase 3 | | Prüfphase 4 | | Prüfphase 5 | | Prüfphase 6 | | Prüfphase 7 | | Prüfphase 8 | |
|------------------|----------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. |
| T _{AA} | °C | 418,4 | 0,6 | 369,1 | 0,9 | 323,3 | 0,3 | 229,5 | 1,3 | 365,5 | 3,3 | 317,0 | 1,2 | 267,7 | 2,2 | 99,2 | 0,8 |
| V _{LV} | m ³ | 0,219 | | 0,247 | | 0,244 | | 0,239 | | 0,182 | | 0,218 | | 0,208 | | 0,243 | |
| T _{LV} | °C | 32,1 | 0,1 | 32,5 | 0,5 | 33,7 | 0,2 | 33,8 | 0,1 | 33,4 | 0,3 | 34,2 | 0,1 | 32,8 | 0,1 | 31,6 | 0,1 |
| p _{LV} | mbar | 25,99 | | 28,72 | | 27,23 | | 42,88 | | 30,92 | | 38,29 | | 35,47 | | 25,01 | |
| T _{LVE} | °C | 27,6 | 0,5 | 26,5 | 0,6 | 27,0 | 0,4 | 26,3 | 0,2 | 26,3 | 0,6 | 25,4 | 0,1 | 24,8 | 0,3 | 25,7 | 0,2 |
| T _{MV} | °C | 49,1 | 2,1 | 49,9 | 1,4 | 51,0 | 1,8 | 49,8 | 1,0 | 49,2 | 0,8 | 49,4 | 1,2 | 49,5 | 1,2 | 49,1 | 0,7 |
| T _{MF1} | °C | 44,8 | 1,0 | 44,3 | 0,7 | 41,7 | 1,8 | | | | | | | | | | |
| T _{MF2} | °C | | | | | | | 43,4 | 0,4 | 43,3 | 0,5 | 45,9 | 0,6 | 44,3 | 0,4 | 43,9 | 0,5 |
| V _{MA} | m ³ | 0,359 | | 0,376 | | 0,374 | | 0,338 | | 0,256 | | 0,286 | | 0,285 | | 0,462 | |
| T _{MA} | °C | 31,3 | 0,2 | 32,0 | 0,3 | 33,0 | 0,1 | 32,8 | 0,1 | 32,4 | 0,1 | 33,8 | 0,1 | 33,1 | 0,2 | 31,3 | 0,1 |
| p _{MA} | mbar | -317,0 | | -320,9 | | -331,1 | | -317,7 | | -340,8 | | -332,0 | | -333,2 | | -326,8 | |

Anhang 4: Mittelwerte und Standardabweichungen je Prüfphase der Messwerte während der Emissionsmessung der Versuchsvariante DkZy-2

| Kürzel | Einheit | Prüfphase 1 | | Prüfphase 2 | | Prüfphase 3 | | Prüfphase 4 | | Prüfphase 5 | | Prüfphase 6 | | Prüfphase 7 | | Prüfphase 8 | |
|-------------------|---------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. |
| T _{LU1} | °C | 41,3 | 0,7 | 43,5 | 0,5 | 42,8 | 0,5 | 41,7 | 0,5 | 41,2 | 0,8 | 36,8 | 0,4 | 36,0 | 0,0 | 33,0 | 0,0 |
| T _{LU2} | °C | 49,8 | 0,9 | 47,9 | 0,5 | 46,4 | 0,3 | 41,3 | 0,3 | 46,9 | 0,7 | 43,2 | 0,4 | 40,9 | 0,4 | 34,5 | 0,4 |
| t | s | 901 | | 900 | | 900 | | 600 | | 602 | | 602 | | 600 | | 901 | |
| Bh | | 1064 | | 1065 | | 1065 | | 1066 | | 1067 | | 1068 | | 1068 | | 1070 | |
| DH1 | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | |
| DH2 | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | |
| T _{LA1} | °C | 34,6 | 0,4 | 33,4 | 0,3 | 32,4 | 0,2 | 30,7 | 0,2 | 31,8 | 0,2 | 31,1 | 0,2 | 30,9 | 0,1 | 29,6 | 0,1 |
| T _{LL} | °C | 61,3 | 0,9 | 53,8 | 0,7 | 49,0 | 0,6 | 40,7 | 0,7 | 48,3 | 0,5 | 42,5 | 0,7 | 39,4 | 0,2 | 33,7 | 0,2 |
| p _{LL} | mbar | 182 | 0 | 158 | 1 | 140 | 0 | 110 | 0 | 150 | 1 | 132 | 0 | 117 | 1 | 96 | 0 |
| T _{KT1} | °C | 52,0 | 0,0 | 52,0 | 0,0 | 51,5 | 0,5 | 48,0 | 0,0 | 52,0 | 0,0 | 50,0 | 0,0 | 48,8 | 0,4 | 45,0 | 0,0 |
| T _{KT2} | °C | 54,1 | 0,4 | 51,6 | 0,4 | 50,7 | 0,3 | 47,9 | 0,1 | 52,5 | 0,2 | 49,2 | 0,2 | 48,0 | 0,1 | 44,3 | 0,1 |
| T _{KE} | °C | 75,5 | 0,5 | 69,8 | 0,5 | 67,4 | 0,5 | 62,0 | 0,0 | 70,7 | 0,5 | 65,8 | 0,4 | 63,0 | 0,0 | 57,0 | 0,0 |
| T _{KR} | °C | 70,0 | 0,5 | 65,8 | 0,5 | 63,9 | 0,4 | 59,0 | 0,0 | 65,3 | 0,5 | 60,7 | 0,5 | 59,0 | 0,0 | 54,0 | 0,0 |
| B | l/h | 34,7 | 0,1 | 28,3 | 0,1 | 22,7 | 0,1 | 13,1 | 0,1 | 23,5 | 0,1 | 18,4 | 0,1 | 13,7 | 0,1 | 4,5 | 0,1 |
| T _{Oel} | °C | 95,5 | 0,3 | 88,2 | 0,1 | 85,3 | 0,1 | 79,5 | 0,1 | 90,8 | 0,5 | 84,6 | 0,5 | 81,1 | 0,1 | 74,1 | 0,0 |
| T _W | °C | 100,4 | 0,5 | 93,8 | 0,5 | 91,9 | 0,4 | 87,0 | 0,0 | 98,0 | 0,0 | 92,2 | 0,4 | 89,0 | 0,0 | 83,0 | 0,0 |
| n | rpm | 2102 | 2 | 2079 | 1 | 2088 | 2 | 2083 | 1 | 1400 | 5 | 1404 | 1 | 1407 | 2 | 838 | 10 |
| P _{TR} | % | 99 | 0 | 79 | 0 | 61 | 0 | 30 | 0 | 100 | 0 | 76 | 1 | 54 | 1 | 30 | 2 |
| M _Z | Nm | 443 | 1 | 337 | 1 | 232 | 1 | 41 | 0 | 530 | 1 | 387 | 1 | 256 | 5 | 0 | |
| n _{T2} | rpm | 2101 | 2 | 2078 | 2 | 2087 | 2 | 2084 | 1 | 1399 | 5 | 1404 | 1 | 1408 | 3 | 826 | |
| P _Z | kW | 101,8 | 0,3 | 76,7 | 0,3 | 52,9 | 0,3 | 9,3 | 0,1 | 81,1 | 0,5 | 59,5 | 0,2 | 39,4 | 0,7 | 0,0 | |
| G _{FUEL} | kg/h | 28,25 | | 22,20 | | 18,22 | | 9,60 | | 18,90 | | 14,50 | | 10,50 | | 2,08 | |
| T _{AZ1} | °C | 598,9 | 1,3 | 521,1 | 1,2 | 456,7 | 0,9 | 313,1 | 0,9 | 569,0 | 0,9 | 473,1 | 1,0 | 391,9 | 1,1 | 153,4 | 0,6 |
| T _{AZ2} | °C | 605,3 | 1,3 | 525,0 | 1,1 | 460,3 | 0,6 | 314,7 | 0,5 | 565,3 | 0,9 | 467,6 | 1,0 | 378,4 | 1,2 | 131,5 | 0,4 |
| T _{AZ3} | °C | 594,3 | 1,1 | 526,5 | 1,1 | 461,7 | 0,7 | 318,9 | 0,7 | 559,4 | 1,2 | 474,2 | 0,7 | 392,5 | 1,1 | 134,6 | 0,4 |
| T _{AZ4} | °C | 599,3 | 1,2 | 524,9 | 1,1 | 461,0 | 0,6 | 319,9 | 0,5 | 563,7 | 1,1 | 473,2 | 0,8 | 388,8 | 1,2 | 140,7 | 0,6 |
| T _{AZ5} | °C | 596,9 | 1,0 | 526,0 | 0,9 | 455,6 | 0,8 | 325,7 | 0,5 | 573,3 | 1,2 | 481,5 | 1,3 | 395,7 | 1,2 | 167,3 | 0,4 |
| T _{AZ6} | °C | 563,0 | 1,1 | 482,0 | 0,8 | 419,5 | 0,8 | 298,8 | 0,9 | 503,9 | 1,4 | 426,1 | 1,0 | 353,2 | 0,8 | 150,2 | 0,8 |
| T _{AE} | °C | 454,7 | 0,6 | 402,4 | 0,6 | 354,1 | 0,4 | 243,5 | 0,2 | 427,1 | 0,4 | 360,5 | 0,2 | 295,7 | 0,6 | 103,3 | 0,1 |

Anhang 4: Mittelwerte und Standardabweichungen je Prüfphase der Messwerte während der Emissionsmessung der Versuchsvariante DkZy-2 (Fortsetzung)

| Kürzel | Einheit | Prüfphase 1 | | Prüfphase 2 | | Prüfphase 3 | | Prüfphase 4 | | Prüfphase 5 | | Prüfphase 6 | | Prüfphase 7 | | Prüfphase 8 | |
|------------------|----------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. |
| T _{AA} | °C | 417,7 | 0,6 | 369,2 | 0,3 | 324,1 | 0,3 | 226,4 | 0,5 | 373,5 | 1,1 | 319,9 | 0,3 | 264,9 | 0,3 | 97,4 | 0,3 |
| V _{LV} | m ³ | 0,285 | | 0,290 | | 0,357 | | 0,263 | | 0,221 | | 0,232 | | 0,206 | | 0,306 | |
| T _{LV} | °C | 31,9 | 0,2 | 32,8 | 0,3 | 33,6 | 0,1 | 33,6 | 0,2 | 34,3 | 0,2 | 34,0 | 0,2 | 33,2 | 0,1 | 31,5 | 0,0 |
| p _{LV} | mbar | 35,03 | | 35,06 | | 44,28 | | 48,83 | | 39,54 | | 41,24 | | 35,25 | | 33,28 | |
| T _{LVE} | °C | 26,4 | 0,2 | 26,4 | 0,5 | 26,7 | 0,2 | 25,9 | 0,2 | 26,9 | 0,2 | 25,5 | 0,3 | 26,1 | 0,2 | 25,9 | 0,1 |
| T _{MV} | °C | 49,3 | 1,5 | 49,3 | 1,5 | 49,3 | 1,4 | 49,3 | 0,7 | 49,1 | 1,4 | 49,8 | 1,3 | 49,8 | 1,2 | 48,5 | 0,9 |
| T _{MF1} | °C | | | | | | | 45,1 | 0,5 | 43,7 | 0,8 | 44,7 | 0,3 | | | 44,8 | 0,6 |
| T _{MF2} | °C | 43,7 | 0,8 | 43,6 | 0,5 | 43,7 | 0,4 | | | | | | | 43,3 | 0,7 | | |
| V _{MA} | m ³ | 0,402 | | 0,400 | | 0,453 | | 0,349 | | 0,282 | | 0,298 | | 0,286 | | 0,477 | |
| T _{MA} | °C | 31,4 | 0,1 | 32,3 | 0,2 | 32,7 | 0,1 | 32,6 | 0,2 | 33,1 | 0,1 | 33,8 | 0,1 | 33,0 | 0,0 | 31,2 | 0,0 |
| p _{MA} | mbar | -315,0 | | -316,0 | | -329,0 | | -313,3 | | -332,6 | | -328,7 | | -332,1 | | -323,0 | |

Anhang 5: Mittelwerte und Standardabweichungen je Prüfphase der Messwerte während der Emissionsmessung der Versuchsvarianten RkP8-1, RkP8-2, DkP8-1

| Kürzel | Einheit | DK P8-1/1 | | DK P8-1/2 | | DK P8-1/3 | | DK P8-1/4 | | RK P8-1/1 | | RK P8-2/1 | | RK P8-1/2 | | RK P8-2/2 | |
|-------------------|---------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. |
| T _{LU1} | °C | 33,0 | 0,0 | 32,4 | 0,5 | 32,6 | 0,5 | 32,6 | 0,5 | 38,0 | 0,0 | 38,0 | 0,0 | 37,1 | 0,4 | 36,4 | 0,5 |
| T _{LU2} | °C | 34,1 | 0,2 | 33,8 | 0,2 | 34,1 | 0,2 | 34,3 | 0,2 | 35,1 | 0,9 | 33,2 | 0,3 | 33,5 | 0,4 | 33,2 | 0,3 |
| t | s | 900 | | 900 | | 901 | | 901 | | 900 | | 900 | | 901 | | 901 | |
| Bh | | 1070 | | 1070 | | 1071 | | 1071 | | 1079 | | 1079 | | 1079 | | 1080 | |
| DH1 | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | | aus | |
| DH2 | | aus | | aus | | aus | | aus | | ein | | ein | | ein | | ein | |
| T _{LA1} | °C | 29,4 | 0,1 | 29,2 | 0,1 | 29,3 | 0,1 | 29,1 | 0,1 | 29,2 | 0,2 | 28,5 | 0,3 | 28,3 | 0,1 | 28,1 | 0,1 |
| T _{LL} | °C | 33,6 | 0,1 | 33,4 | 0,2 | 34,2 | 0,2 | 34,5 | 0,1 | 32,8 | 0,8 | 32,8 | 0,2 | 32,7 | 0,1 | 32,5 | 0,1 |
| p _{LL} | mbar | 96 | 0 | 96 | 0 | 96 | 0 | 96 | 0 | 96 | 0 | 96 | 0 | 96 | 0 | 96 | 0 |
| T _{KT1} | °C | 45,0 | 0,0 | 45,0 | 0,0 | 45,0 | 0,0 | 45,0 | 0,0 | 41,9 | 0,4 | 41,0 | 0,0 | 41,0 | 0,0 | 41,0 | 0,0 |
| T _{KT2} | °C | 44,1 | 0,1 | 43,9 | 0,1 | 44,2 | 0,2 | 44,7 | 0,1 | 41,0 | 0,2 | 40,1 | 0,2 | 39,8 | 0,0 | 39,8 | 0,1 |
| T _{KE} | °C | 56,3 | 0,5 | 56,1 | 0,4 | 56,1 | 0,4 | 56,1 | 0,4 | 62,3 | 0,5 | 62,0 | 0,0 | 62,0 | 0,0 | 62,0 | 0,0 |
| T _{KR} | °C | 54,0 | 0,0 | 54,0 | 0,0 | 54,0 | 0,0 | 54,0 | 0,0 | 60,3 | 0,5 | 60,0 | 0,0 | 59,6 | 0,5 | 59,1 | 0,4 |
| B | l/h | 4,6 | 0,1 | 4,6 | 0,1 | 4,6 | 0,1 | 4,6 | 0,1 | 2,5 | 0,0 | 2,5 | 0,0 | 2,5 | 0,0 | 2,5 | 0,1 |
| T _{Oel} | °C | 74,0 | 0,1 | 74,0 | 0,1 | 74,0 | 0,1 | 74,0 | 0,1 | 75,0 | 0,3 | 74,9 | 0,1 | 75,1 | 0,1 | 75,0 | 0,0 |
| T _W | °C | 83,0 | 0,0 | 83,0 | 0,0 | 83,0 | 0,0 | 83,0 | 0,0 | 83,9 | 0,4 | 84,0 | 0,0 | 84,0 | 0,0 | 84,0 | 0,0 |
| n | rpm | 832 | 12 | 835 | 13 | 831 | 8 | 831 | 8 | 844 | 3 | 845 | 3 | 843 | 2 | 845 | 2 |
| P _{TR} | % | 31 | 2 | 31 | 3 | 31 | 2 | 31 | 2 | 10 | 0 | 10 | 1 | 10 | 0 | 10 | 0 |
| M _Z | Nm | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| n _{T2} | rpm | 825 | | 830 | | 826 | | 824 | | 833 | | 835 | | 830 | | 830 | |
| P _Z | kW | 0,0 | | 0,0 | | 0,0 | | 0,0 | | 0,0 | | 0,0 | | 0,0 | | 0,0 | |
| G _{FUEL} | kg/h | 1,94 | | 1,78 | | 1,72 | | 1,86 | | 2,38 | | 2,38 | | 2,36 | | 2,32 | |
| T _{AZ1} | °C | 152,8 | 1,0 | 152,6 | 0,8 | 153,9 | 0,7 | 154,0 | 0,6 | 152,3 | 0,3 | 152,9 | 0,3 | 153,6 | 0,6 | 153,7 | 0,3 |
| T _{AZ2} | °C | 131,4 | 0,4 | 131,4 | 0,4 | 132,3 | 0,4 | 132,4 | 0,4 | 133,3 | 0,4 | 134,1 | 0,5 | 134,7 | 0,5 | 135,2 | 0,4 |
| T _{AZ3} | °C | 134,4 | 0,4 | 134,8 | 0,4 | 134,7 | 0,5 | 133,6 | 0,3 | 135,9 | 0,3 | 136,6 | 0,2 | 137,2 | 0,5 | 137,5 | 0,2 |
| T _{AZ4} | °C | 140,8 | 0,3 | 140,6 | 0,3 | 141,6 | 0,6 | 142,6 | 0,3 | 144,2 | 0,3 | 145,1 | 0,3 | 145,8 | 0,5 | 145,9 | 0,4 |
| T _{AZ5} | °C | 167,9 | 0,6 | 168,2 | 0,3 | 168,6 | 0,3 | 169,4 | 0,2 | 166,0 | 0,3 | 166,6 | 0,2 | 166,9 | 0,5 | 167,0 | 0,2 |
| T _{AZ6} | °C | 151,4 | 0,8 | 150,3 | 0,8 | 150,5 | 0,8 | 151,4 | 0,8 | 149,5 | 0,3 | 150,1 | 0,3 | 150,7 | 0,4 | 151,1 | 0,3 |
| T _{AE} | °C | 103,4 | 0,1 | 103,4 | 0,1 | 104,3 | 0,3 | 104,4 | 0,1 | 103,4 | 0,1 | 103,8 | 0,1 | 104,0 | 0,1 | 104,1 | 0,2 |

Anhang 5: Mittelwerte und Standardabweichungen je Prüfphase der Messwerte während der Emissionsmessung der Versuchsvarianten RkP8-1, RkP8-2, DkP8-1 (Fortsetzung)

| Kürzel | Einheit | DK P8-1/1 | | DK P8-1/2 | | DK P8-1/3 | | DK P8-1/4 | | RK P8-1/1 | | RK P8-2/1 | | RK P8-1/2 | | RK P8-2/2 | |
|------------------|----------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. | Mittelwert | Standardabw. |
| T _{AA} | °C | 96,3 | 0,2 | 95,7 | 0,1 | 96,0 | 0,2 | 96,0 | 0,1 | 97,2 | 0,3 | 96,8 | 0,1 | 96,6 | 0,1 | 96,4 | 0,1 |
| V _{LV} | m ³ | 0,262 | | 0,314 | | 0,288 | | 0,265 | | 0,261 | | 0,249 | | 0,218 | | 0,196 | |
| T _{LV} | °C | 31,3 | 0,0 | 31,1 | 0,1 | 31,3 | 0,2 | 31,8 | 0,1 | 31,4 | 0,2 | 30,9 | 0,2 | 30,2 | 0,2 | 29,8 | 0,0 |
| p _{LV} | mbar | 27,74 | | 34,87 | | 31,71 | | 28,60 | | 27,01 | | 25,39 | | 21,03 | | 17,88 | |
| T _{LVE} | °C | 22,6 | 0,6 | 21,3 | 0,2 | 21,5 | 0,4 | 22,2 | 0,2 | 25,9 | 0,1 | 25,7 | 0,2 | 25,7 | 0,2 | 25,5 | 0,4 |
| T _{MV} | °C | 49,9 | 0,4 | 49,3 | 0,6 | 49,5 | 0,9 | 50,5 | 0,8 | 49,8 | 1,1 | 49,3 | 1,2 | 49,2 | 1,6 | 49,1 | 1,7 |
| T _{MF1} | °C | | | 43,7 | 1,6 | | | 45,0 | 0,9 | | | 43,4 | 0,8 | | | 41,9 | 0,6 |
| T _{MF2} | °C | 45,3 | 0,8 | | | 44,8 | 0,5 | | | 44,7 | 0,5 | | | 43,5 | 1,2 | | |
| V _{MA} | m ³ | 0,505 | | 0,557 | | 0,548 | | 0,538 | | 0,465 | | 0,451 | | 0,410 | | 0,409 | |
| T _{MA} | °C | 31,0 | 0,0 | 30,9 | 0,1 | 31,0 | 0,2 | 31,6 | 0,1 | 31,2 | 0,2 | 30,7 | 0,3 | 30,1 | 0,2 | 29,7 | 0,1 |
| p _{MA} | mbar | -384,7 | | -405,9 | | -407,8 | | -409,5 | | -352,7 | | -355,6 | | -364,7 | | -366,0 | |

