EMISSIONEN ORGANISCH-CHEMISCHER VERBINDUNGEN AUS ZIVILEN FLUGZEUGTRIEBWERKEN

von

Dipl.-Ing. Walter Eickhoff

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT

Dezernat 6.2; Luftreinhaltung/Emissionen

Ludwig-Mond-Str.33, 34121 Kassel

Oktober 1998

Berichtsdatum: 1. Oktober 1998

ISSN 0933-2391

ISBN 3-89026-277-5

Umweltplanung , Arbeits- und Umweltschutz,.Heft 252, 1998

Herausgeber: Hessische Landesanstalt für Umwelt, Wiesbaden

Fotos: W: Eickhoff, Dr. U. Huckfeldt

Adresse: 65203 Wiesbaden Rheingaustraße 186

Telefon 0611-6939-0

Telefax 0611-6939-555

Telex 4186278 hlfu

Für den Druck wurde 100% Recycling-Papier verwendet.

1 Vorwort

Ausgehend von einer durch das Hessische Umweltministerium initierten Konzeptstudie zur Umweltsituation des Rhein-Main-Flughafens Frankfurt/M wurde im Jahre 1994 unter anderem angeregt, das bis dahin weitgehend unbekannte Stoffspektrum organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von zivilen Flugzeugtriebwerken aufzuklären. Bei der Neuentwicklung von zivilen Flugzeugtriebwerken steht im Zusammenhang mit Fragen zur globalen Klimasituation für die Hersteller von Triebwerken die Reduktion klimarelevanter Abgasbestandteile wie insbesondere Stickoxide, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid oder der Wasserdampfgehalt im Vordergrund. Zu diesen Fragen gibt es neben einer Fülle von Antworten auch eine Fülle von Daten. Die Emissionssituation im Hinblick auf organische Stoffe ließ sich zwar am Gesamtgehalt flüchtiger organischer Stoffe (VOC) beurteilen, nicht aber in Bezug auf diskrete Einzelstoffe.

Ausgehend von dieser Situation waren zur Aufklärung der Emissionen organisch-chemischer Verbindungen aus zivilen Flugzeugtriebwerken zunächst spezielle Probenahmestrategien an einer Triebwerkstandlaufeinrichtung zu entwickeln. Ebenso mußten neben speziellen Anreicherungstechniken für die Beprobung einschlägige Analysenverfahren entwickelt und erprobt werden.

In der Zeit von Juli 1996 bis Juli 1997 wurden insgesamt 40 Triebwerke zweier unterschiedlicher Triebwerkstypen *diskontinuierlich* durch individuelle Beprobung auf organische Einzelstoffe untersucht. Die Beprobungen an der Triebwerkstandlaufeinrichtung wurden durch Beprobungen während der Hinterherfahrt im Abgasstrahl von Flugzeugen während des Taxibetriebes ergänzt. Neben den diskontinuierlichen Untersuchungen wurden diese 40 Triebwerke auch mit Hilfe kontinuierlich registrierender Meßtechnik auf die Stoffe NOx, CO_2, CO, O_2 und SO_2. untersucht.

Zusätzlich wurden weitere 109 Triebwerke automatisiert ausschließlich kontinuierlich registrierend auf die Stoffe NOx, CO_2, CO, O_2 und SO_2 untersucht, wobei hierbei die erhaltenen Meßdaten mittels Datenfernübertragung an die Hessische Landesanstalt für Umwelt in Kassel übertragen und ausgewertet wurden.

Aus einer Auswahl von zunächst 356 organischen Verbindungen konnten 68 Verbindungen sicher identifiziert werden. Daneben wurden weitere 35 Verbindungen als diskrete Einzelstoffe bestimmt, so daß im Abgas ziviler Flugzeugtriebwerke insgesamt 103 organisch-chemische Verbindungen qualitativ identifiziert werden konnten. Bezogen auf den Massenanteil an organischen Stoffen im Abgas von Flugzeugtriebwerken konnten damit mehr als 90% der Masse organisch-chemischer Verbindungen aufgeklärt werden. Bei den ermittelten Verbindungen handelt es sich im wesentlichen um Alkane, Alkene, Aldehyde, Ketone, alicyclische Verbindungen, sowie Mono- und Diaromaten. Die Emission organisch-chemischer Einzelverbindungen aus zivilen Flugzeugtriebwerken kann damit als weitgehend aufgeklärt angesehen werden. Somit ist die ursprüngliche Fragestellung, die zu diesem Projekt Anlaß gab, als beantwortet anzusehen.

Die ermittelten organisch-chemischen Stoffe wurden untereinander -auf den Stoff Undecan bezogen- ins Verhältnis gesetzt und durch sog. Verhältniskurven dargestellt. Hierbei konnte festgestellt werden, daß sich die so erhaltenen Verhältniskurven über weite Kurvenabschnitte im Verlauf sehr ähnlich sind. Dies läßt den Schluß zu, daß die Spektren organisch-chemischer Stoffe im Abgas von Flugzeugtriebwerken charakteristisch sind.

Mit Hilfe der vorliegenden Arbeit ist es möglich unter Einbeziehung von Flugbewegungszahlen massenstrombezogene Emissionsdaten einzelner organisch-chemischer Stoffe abzuschätzen, vergleichbare Emissionsdaten bei den unterschiedlichen Triebwerkstypen vorausgesetzt.

In die Untersuchungen ebenso mit einbezogen wurde eine qualitative Beurteilung der Abgase von einigen Dieselmotoren. Hierbei sollte herausgefunden werden, ob sich das Emissionsspektrum bei vergleichbarer Beprobung und Analyse der Abgase dieser Aggregate von denen der Flugzeugtriebwerke unterscheidet.

Mit der vorliegenden Arbeit konnte ein deutlicher Beitrag zur Aufklärung des Spektrums organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von zivilen Flugzeugtriebwerken geleistet werden. Eine allein dem Abgas von Flugzeugtriebwerken zuzuordnende chemische Verbindung oder Verbindungsgruppe zur Unterscheidung von kraftfahrzeugsbedingten Abgasen konnte im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht ermittelt werden.

(Prof. Dr. Werner Ott)

Präsident der Hessischen Landesanstalt für Umwelt

2 Inhaltsverzeichnis Seite

1 VORWORT ..... 1—3

2 INHALTSVERZEICHNIS ..... 2—3

3 ABBILDUNGSVERZEICHNIS ..... 3—6

4 DANKSAGUNGEN ..... 4—8

5 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS ..... 5—9

6 GLOSSAR ..... 6—10

KAPITEL 1 PROBLEMATIK DER EMISSIONMESSUNG UND AUFGABENSTELLUNG ..... 7—11

7 EINLEITUNG ..... 7—11

8 PROBLEMATIK DER EMISSIONSMESSUNG ..... 8—12

8.1 PROBLEMATIK DER ABGASBEPROBUNG IN EINER TRIEBWERKSSTANDLAUFEINRICHTUNG (PRÜFSTAND) ..... 8—13
8.1.1 ANFORDERUNGEN AN DIE PROBENAHME ..... 8—14

9 AUFGABENSTELLUNG ..... 9—15

KAPITEL 2 UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND UND QUALITATIVE UNTERSUCHUNG ..... 10—17

10 UNTERSUCHTE TRIEBWERKE ..... 10—17

10.1 TRIEBWERKSTANDLAUFEINRICHTUNG ..... 10—17
10.2 TRIEBWERKE ..... 10—20
10.2.1 Triebwerke CF6-50 E2 / C2 ..... 10—20
10.2.2 Triebwerke CFM-INTERNATIONAL CFM 56 - 3 B1/B2/C ..... 10—25
10.3 TEST-PROCEDURES ..... 10—32
10.4 FÜR DIE PRÜFPROZEDUR EINGESETZTER KRAFTSTOFF ..... 10—34

11 PROBENAHMEMODALITÄTEN FÜR DIE DISKONTINUIERLICHE MESSUNG ..... 11—36

11.1 EINGESETZTE PROBENAHMESONDEN ..... 11—38
11.2 MISCHAPPARATUR ..... 11—39
11.3 SORPTIONSEINRICHTUNGEN ..... 11—41
11.4 PROBENAHMEPUMPEN UND PROBENGASMENGENMESSUNG ..... 11—45
11.5 ADAPTION DES MEßTECHNISCHEN EQUIPMENTS AM TRIEBWERKSPRÜFSTAND ..... 11—47

12 ANALYTISCHE METHODEN ..... 12—49

12.1 VERFAHRENSENTWICKLUNG ..... 12—49
12.1.1 Sorption an ausgewählten Sorbentien ..... 12—49
12.1.1.1 XAD-2 ..... 12—49
12.1.1.2 Tenax TA ..... 12—49
12.1.1.3 Carbosieve SIII ..... 12—50
12.1.2 Elution mit verschiedenen Lösemitteln ..... 12—50
12.1.3 Fraktionierung der Eluate ..... 12—52
12.1.3.1 Untersuchungsgegenstand ..... 12—52
12.1.3.2 Chemikalien ..... 12—52
12.1.3.3 Geräte ..... 12—52
12.1.3.4 Vorgehensweise ..... 12—53
12.1.3.5 Analysenbedingungen ..... 12—53
12.1.4 GC/MS-Untersuchungen zur qualitativen Identifikation, Massenspektrogramme, Bedingungen, Gerät ..... 12—54
12.1.5 Thermische Desorption, Bedingungen, Gerät ..... 12—55
12.1.5.1 Probenvorbereitung: ..... 12—55

12.1.5.2 TDS-Bedingungen:....12—56
12.1.5.2.1 Gerätebezeichnung: ....12—56
12.1.5.3 Temperaturprogramm: ....12—56
12.1.5.4 KAS-Bedingungen: ....12—56
12.1.5.4.1 Gerätebezeichnung: ....12—56
12.1.5.5 Temperaturprogramm: ....12—56
12.1.6 GC-Untersuchungen, Chromatogramme, Bedingungen, Geräte ....12—56
12.1.6.1 Anwendungsbereich ....12—56
12.1.6.2 Kurzbeschreibung des Verfahrens ....12—56
12.1.6.3 Sorptionseinrichtung zur Probenahme....12—57
12.1.6.4 Geräte zur Analyse ....12—57
12.1.6.5 Chemikalien und Lösungen, Kalibrierlösungen....12—57
12.1.6.6 Lösungen....12—57
12.1.6.7 Herstellung der Chlorbenzollösung (ISTD)....12—57
12.1.6.8 Eichpunkte aus Stammlösung (Kalibrierlösung)....12—58
12.1.6.9 Betriebsmittel zum Betrieb des GC ....12—58
12.1.6.10 Probenaufbereitung....12—58
12.1.6.11 Analytische Bestimmung für GC HP 5890 Serie II plus:....12—58
12.1.6.11.1 Trennsäule:....12—58
12.1.6.11.2 Gasflüsse: ....12—58
12.1.6.12 Geräteparameter:....12—59
12.1.6.12.1 Einspritzblock....12—59
12.1.6.12.2 Ofen....12—59
12.1.6.12.3 Detektor ....12—59
12.1.6.13 Auswertung der Chromatogramme ....12—59
12.1.6.13.1 Integrationsparameter....12—59
12.1.6.14 Qualitative und quantitative Zuordnung der Meßsignale....12—59
12.1.6.15 Berechnen des Ergebnisses....12—59
12.1.6.15.1 Qualitative Auswertung....12—59
12.1.6.15.2 Quantitative Auswertung....12—60
12.1.6.15.2.1 Externer Standard....12—60
12.1.6.15.2.2 Interner Standard....12—60
12.1.7 Festphasenextraktion zur Untersuchung von Kerosin....12—61
12.1.7.1 Prinzip der Festphasenextraktion....12—62
12.1.7.2 Beschreibung des Flugzeugkraftstoffs Kerosin....12—62
12.1.7.3 Arbeitsanweisung ....12—62
12.1.7.3.1 Geräte, Chemikalien und Lösemittel....12—62
12.1.7.3.1.1 Geräte....12—62
12.1.7.3.1.1.1 Geräte für die Probenvorbereitung: ....12—62
12.1.7.3.1.1.2 Geräte für die Festphasenextraktion: ....12—63
12.1.7.3.1.2 Chemikalien und Adsorbentien....12—63
12.1.7.3.1.3 Lösemittel....12—63
12.1.7.4 Probenaufarbeitung....12—63
12.1.7.4.1 Probenvorbereitung ....12—63
12.1.7.4.2 Festphasenextraktion....12—64
12.1.7.4.2.1 Eigenschaften der ausgewählten Festphasen....12—64
12.1.7.4.3 Durchführung der Festphasenextraktion....12—64
12.1.7.4.3.1 Konditionierung der Festphasen-Säule: ....12—64
12.1.7.4.3.1.1 PROBENAUFGABE:....12—65
12.1.7.4.3.1.2 Elution:....12—65
12.1.7.4.4 Wiederverwendung der Festphase....12—66
12.1.7.4.5 Analyse am Gaschromatograph (GC/FID) ....12—68
12.1.7.5 Qualitätsüberprüfung der Festphasenextraktion ....12—68
12.1.7.5.1 Elutionskurven....12—68
12.1.7.6 Wiederfindung in den Standardgemischen....12—70
12.1.7.7 Ergebnisse der Kerosinanalytik....12—71
12.1.7.7.1 Bestimmung einer Kerosinprobe von JET A1 ....12—71
12.1.7.7.1.1 Kerosinprobe....12—71
12.1.7.7.1.2 Identifizierung der Kerosinfraktionen am GC/MS....12—71

12.1.7.7.1.3 Blindwert der Festphasenextraktion ....12—73
12.1.7.7.2 Quantifizierung der Kerosinprobe....12—74
12.1.7.8 Exemplarische Ergebnisse der Kerosin-Analytik zur Überprüfung des Verfahrens ....12—75
12.1.7.8.1 Ergebnisse der Kerosinprobe JET A1 (16.05.97)....12—75
12.1.7.8.2 Vergleich mit Literaturwerten von [Schlatter et al.] ....12—76
12.1.7.8.3 ANHANG - Chromatogramme....12—78

13 KONTINUIERLICHE MESSWERTERFASSUNG ....13—81

13.1 DIFFERENZDRUCKMESSUNG IM RAHMEN DER ZULUFT- UND ABGASGESCHWINDIGKEITSERMITTLUNG ....13—81
13.2 TEMPERATURMESSUNG IN DER AUßENLUFT UND IM ABGAS VON TRIEBWERKEN ....13—83
13.3 LUFTDRUCK UND FEUCHTEGEHALT DER AUßENLUFT, FEUCHTEGEHALT DES ABGASES VON TRIEBWERKEN ....13—83
13.4 MESSUNG VON NO_x....13—84
13.5 MESSUNG VON SO_2....13—84
13.6 MESSUNG VON CO ....13—85
13.7 MESSUNG VON CO_2 ....13—86
13.8 MESSUNG VON O_2....13—86
13.9 VOC-MESSUNG IN DER AUßENLUFT UND IM ABGAS VON TRIEBWERKEN....13—87
13.10 EINSATZ ZERTIFIZIERTER PRÜFGASE....13—87
13.11 MEßGASAUFBEREITUNG....13—88
13.12 DATENFERNÜBERTRAGUNG KONTINUIERLICH ERMITTELTER MESSWERTE....13—88

14 ERMITTLUNG DISKRETER STOFFGRUPPEN ....14—92

15 FREMDVERGABEN....15—93

16 EINSATZ EINES KONTINUIERLICH ARBEITENDEN OPTISCHEN MEßVERFAHRENS....16—94

17 HINTERHERFAHRTEN BEIM TAXIBETRIEB ....17—97

18 ERGEBNISSE DER QUALITATIVEN UNTERSUCHUNGEN....18—102

18.1 Aufklärungsquote bezogen auf VOC ....18—124
18.2 Diskussion ....18—126

KAPITEL 3 QUANTITATIVE UNTERSUCHUNGEN....19—128

19 QUANTITATIVE UNTERSUCHUNG VON TRIEBWERKSABGASEN ....19—128

19.1 KONTINUIERLICH ERMITTELTE ABGASKOMPONENTEN....19—128
19.2 DISKONTINUIERLICH ERMITTELTE ORGANISCH-CHEMISCHE STOFFE....19—132
19.2.1 Triebwerke CF6-50 E2/C2 und CFM56-3 ....19—132
19.2.2 Massenstrombetrachtung....19—138
19.3 DISKRET ERMITTELTE ABGASKOMPONENTEN ....19—139

20 ANALYSE DES EINGESETZTEN KEROSINS ....20—152

21 EMISSIONEN ORGANISCHER VERBINDUNGEN AUS DIESELMOTOREN....21—154

22 DISKUSSION DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE....22—161

3 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

NUMMER ------- .....SEITE

ABBILDUNG 1: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES PRÜFSTANDES .....10—19
ABBILDUNG 2: TRIEBWERKSTANDLAUFEINRICHTUNG FRA P IV DER LUFTHANSA TECHNIK AG FRANKFURT .....10—19
ABBILDUNG 3: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TRIEBWERKS GE - CF6 - 50 .....10—21
ABBILDUNG 4: TEMPERATUR UND DRUCKVERLAUF IN EINEM TRIEBWERK VOM TYP CF6 - 50 .....10—22
ABBILDUNG 5: STATIONEN INNERHALB EINES TRIEBWERKS VOM TYP CF6 - 50 .....10—23
ABBILDUNG 6: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TRIEBWERKS CFM 56 - 3 .....10—26
ABBILDUNG 7: STATIONEN INNERHALB DES TRIEBWERKS CFM 56 -3 .....10—28
ABBILDUNG 8: TEST-PROCEDURE FOR CF6-50 .....10—33
ABBILDUNG 9: TEST PROCEDURE FOR CFM56-3 (POST SB 72-437) .....10—33
ABBILDUNG 10: TEST PROCEDURE FOR CFM 56-3 (PRE SB 72-437) .....10—34
ABBILDUNG 11: VARIANTE 2A) ZUM FESTEINBAU EINER PROBEN-ENTNAHMEVORRICHTUNG .....11—37
ABBILDUNG 12: VARIANTE 2B) ZUM FESTEINBAU EINER PROBEN-ENTNAHMEVORRICHTUNG .....11—37
ABBILDUNG 13: VARIANTE 2C) ZUM FESTEINBAU EINER PROBE-NAHMEVORRICHTUNG; REALISIERTE VARIANTE .....11—39
ABBILDUNG 14: MISCHAPPARATUR ZUM HOMOGENEN MISCHEN VON PROBEN-TEILGASSTRÖMEN (LABORAUFBAU) .....11—40
ABBILDUNG 15: TEMPERATURVERLAUF IN DER MISCHAPPARATUR WÄHREND EINES KOMPLETTEN PRÜFLAUFES .....11—41
ABBILDUNG 16: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER TIEFTEMPERATUR-SORPTIONSVORRICHTUNG GEMÄß VDI 2457 BL. 2 .....11—42
ABBILDUNG 17: KONVENTIONELLE BEPROBUNGSEINRICHTUNG MIT GASUHR ALS GASMENGENMESSER .....11—46
ABBILDUNG 18: BEPROBUNGSEINRICHTUNG, VOLLAUTOMATISCH MIT THERMISCHEM MASSENDURCHFLUßMESSER .....11—46
ABBILDUNG 19: EXTERNES MESSHAUS UND MESSWAGEN DER HLFU .....11—47
ABBILDUNG 20: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES MESSAUFBAUS .....11—48
ABBILDUNG 21: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG EINES MASSENSPEKTROGRAMMES EINER ABGASPROBE .....12—55
ABBILDUNG 22: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG EINES GASCHROMATOGRAMMES EINER ABGASPROBE .....12—61
ABBILDUNG 23: AUFBAU DER FESTPHASENEXTRAKTION MIT VAKUUMKAMMER UND VAKUUMPUMPE .....12—65
ABBILDUNG 24: AUFBAU DER FESTPHASENEXTRAKTION MIT VAKUUMKAMMER UND VAKUUMPUMPE .....12—67
ABBILDUNG 25: KAMMER-AUFSATZ FÜR DIE EINLEITUNG VON STICKSTOFF .....12—67
ABBILDUNG 26: ELUTIONSKURVEN VON GESÄTTIGTEN ALIPHATEN (C11-C14) .....12—69
ABBILDUNG 27: ELUTIONSKURVEN VON ALKYLBENZOLEN .....12—69
ABBILDUNG 28: ELUTIONSKURVEN VON CYCLISCHEN ALIPHATEN UND DIAROMATEN .....12—70
ABBILDUNG 29: GC/MS-CHROMATOGRAMM DES BLINDWERTS DER FESTPHASENEXTRAKTION (FB4) .....12—78
ABBILDUNG 30: GC/MS-CHROMATOGRAMM DER KEROSINFRAKTION 1 (F15) MIT ANGABE DER RETENTIONSZEITEN .....12—78
ABBILDUNG 31: GC/MS-CHROMATOGRAMM DER KEROSINFRAKTION 2 (F14) MIT ANGABE DER RETENTIONSZEITEN .....12—79
ABBILDUNG 32: GC/MS-CHROMATOGRAMM DER KEROSINFRAKTION 1 (F15) OHNE ANGABE DER RETENTIONSZEITEN .....12—79
ABBILDUNG 33: GC/MS-CHROMATOGRAMM DER KEROSINFRAKTION 2 (F14) OHNE ANGABE DER RETENTIONSZEITEN .....12—80
ABBILDUNG 34: VISUALISIERTE UND MITTELS DFÜ ÜBERTRAGENE MESSDATEN .....13—91
ABBILDUNG 35: FUNKTIONSSCHEMA OPSIS-MESSEINRICHTUNG .....16—95

ABBILDUNG 36: MESSTECHNISCHE ERFASSUNG VON NO MIT EINER OPTISCHEN MESSEINRICHTUNG ..... 16—96
ABBILDUNG 37: MESSTECHNISCHE ERFASSUNG VON BENZOL, TOLUOL, P-XYLOL MIT EINER OPTISCHEN MESSEINRICHTUNG ..... 16—96
ABBILDUNG 38: LTO-ZYKLUS (LANDIG AN TAKE OFF CYCLE) ..... 17—97
ABBILDUNG 39: HINTERHERFAHRT ZUR BEPROBUNG VON FLUGZEUGTRIEBWERKEN (SICHT AUS HINTERHERFAHRENDEM FOLLOW-ME-FAHRZEUG) ..... 17—98
ABBILDUNG 40: MASSENSPEKTROGRAMM EINER DURCH „HINTERHERFAHRT“ GEWONNENEN ABGASPROBE ..... 17—100
ABBILDUNG 41: MASSENSPEKTROGRAMM EINER ABGASPROBE AUS TRIEBWERKTYP CF6-50E/C ..... 18—113
ABBILDUNG 42: MASSENSPEKTROGRAMM EINER ABGASPROBE AUS TRIEBWERKTYP CFM56-3 ..... 18—114
ABBILDUNG 43: KONZENTRATIONSBEREICHSKURVE CF6-50 C2/E2 ..... 18—116
ABBILDUNG 44: KONZENTRATIONSBEREICHSKURVE CF6-50 C2/E2 ..... 18—116
ABBILDUNG 45: KONZENTRATIONSBEREICHSKURVE CF6-50 C2/E2 ..... 18—117
ABBILDUNG 46: KONZENTRATIONSBEREICHSKURVE CF6-50 C2/E2 ..... 18—117
ABBILDUNG 47: VERHÄLTNISKURVE CF6-50 C2/E2 ..... 18—118
ABBILDUNG 48: VERHÄLTNISKURVE CF6-50 C2/E2 ..... 18—118
ABBILDUNG 49: VERHÄLTNISKURVE CF6-50 C2/E2 ..... 18—119
ABBILDUNG 50: KONZENTRATIONSBEREICHSKURVE CFM56-3B1 ..... 18—120
ABBILDUNG 51: KONZENTRATIONSBEREICHSKURVE CFM56-3B1 ..... 18—120
ABBILDUNG 52: VERHÄLTNISKURVE CFM56-3B1 ..... 18—121
ABBILDUNG 53: VERHÄLTNISKURVE CFM56-3B1 ..... 18—121
ABBILDUNG 54: KONZENTRATIONSBEREICHSKURVE CFM56-3C1 ..... 18—122
ABBILDUNG 55: VERHÄLTNISKURVE CFM56-3C1 ..... 18—122
ABBILDUNG 56: KONZENTRATIONSBEREICHE CARBOSIEVE/TENAX HINTERHERFAHRT ..... 18—123
ABBILDUNG 57: VERHÄLTNISBEREICHE CARBOSIEVE/TENAX HINTERHERFAHRT ..... 18—123
ABBILDUNG 58: KONTINUIERLICH ERMITTELTE ABGASBESTANDTEILE BEIM TRIEBWERKSTYP CF6-50, VERGLEICH MIT ICAO-DATEN ..... 19—130
ABBILDUNG 59: KONTINUIERLICH ERMITTELTE ABGASBESTANDTEILE BEIM TRIEBWERKSTYP CFM 56, VERGLEICH MIT ICAO-DATEN ..... 19—131
ABBILDUNG 60: KONTINUIERLICH ERMITTELTE ABGASBESTANDTEILE BEIM TRIEBWERKSTYP CFM56, VERGLEICH MIT ICAO-DATEN ..... 19—131
ABBILDUNG 61: KONTINUIERLICH ERMITTELTE ABGASBESTANDTEILE BEIM TRIEBWERKSTYP CFM56, VERGLEICH MIT ICAO-DATEN ..... 19—132
ABBILDUNG 62: LASTABHÄNGIGE EMISSIONEN VERSCHIEDENER LUFTVERUN-REINIGENDE STOFFE IM ABGAS VON FLUGZEUGTRIEBWERKEN ..... 19—133
ABBILDUNG 63: MASSENKONZENTRATION VON ALDEHYDEN UND KETONEN, GEMESSEN IM ABGASSTRAHL DURCH HINTERHERFAHRT ..... 19—150
ABBILDUNG 64: MASSENKONZENTRATION VON ALDEHYDEN UND KETONEN IM ABGAS EINES TRIEBWERKES VON TYP CF6-50 ..... 19—150
ABBILDUNG 65: MASSENKONZENTRATION VON ALDEHYDEN UND KETONEN IM ABGAS EINES TRIEBWERKES VON TYP CFM56-3 ..... 19—151
ABBILDUNG 66: MASSENKONZENTRATION VON PCDD/F IM ABGAS EINES TRIEBWERKES VON TYP CF6-50 ..... 19—151
ABBILDUNG 67: MASSENKONZENTRATION VON PAH IM ABGAS EINES TRIEBWERKES VON TYP CF6-50 ..... 19—152
ABBILDUNG 68: KONZENTRATIONSBEREICHSKURVE ABGAS DIESELMOTOR ..... 21—156
ABBILDUNG 69: VERHÄLTNISKURVE ABGAS DIESELMOTOR ..... 21—156
ABBILDUNG 70: KONZENTRATIONSBEREICHSKURVE EINES DIESELMOTORS ..... 21—159
ABBILDUNG 71: VERHÄLTNISKURVE EINES DIESELMOTORS ..... 21—159

4 DANKSAGUNGEN

Der Autor bedankt sich bei der Firma LUFTHANSA TECHNIK AG für die Zuverfügungstellung des Triebwerkprüfstandes und die freundliche, kollegiale Unterstützung durch das gesamte dortige Personal und hier besonders bei den Herren Mörig und Wagner sowie bei allen beteiligten Mitarbeitern des Dezernates Luftreinhaltung / Emissionen der HESSISCHEN LANDESANSTALT FÜR UMWELT, die an dem Projekt mit großen Engagement und Einsatz mitgewirkt haben. Hier sind besonders zu nennen die Herren Reiner Besel und Gert Ströhler, die für alle probenahmetechnischen Arbeiten sowie für die Betreuung und ständige Funktionsfähigkeit des Vor-Ort-Equipments verantwortlich waren, Frau Kerstin Maack, Frau Jaqueline Boudaoud und Frau Christine Turski-Tobor, die wesentlich für den chemisch-analytischen Teil der Emissionsproben zuständig waren sowie Herrn Matthias Karl, Universität Bayreuth, der im Zusammenhang mit diesem Projekt ein Verfahren zur Kerosinanalytik implementierte.

Für die geduldvolle Vorbereitung zur Drucklegung der Arbeit bedankt sich der Autor zudem insbesondere bei den Herren Gert Ströhler und Walter Blum.

5 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

APU	Auxillery Power Unit
Abs	Absolut
Absch	Abschnitt
Bl	Blatt
CEN	Europäisches Komitee für Normung
DOS-ChemStation	GC-Steuer- und Auswerterechner auf DOS-Basis
Detektortemp	Detektortemperatur (z.B. am Gaschromatographie)
EGT-Limit	höchste zulässige Abgastemperatur
GC-Runtime	Dauer eines GC-Laufes
GMBl	Gemeinsames Mnisterialblatt
Gesamt-C	Gesamtkohlenstoffgehalt
Gew	Gewicht
GfA	Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik
HLfU	Hessische Landesanstalt für Umwelt
ICAO	International Civil Aviation Organisation
Inj.-temperatur	Injektortemperatur (z.B. am Gaschromatographen)
KAS-Bedingungen	Arbeitsbedingungen des Kaltaufgabesystems
Kat.-Nr	Katalog-Nr.
LH-Ffm	Lufthansa, Frankfurt/M
LTO	Landing-Take off
LWL	Lichtwellenleiter
Massenkonz	Massenkonzentration
Mhz	Megahertz
NDIR	Nicht-disperses-Infrarot
Pa	Pascal
Probenr	Probenummer
SN-Nr	Serien-Nummer
Spec	Spezifikation
Stabw	Standardabweichung
Stck	Stück
TDS	Thermodesorption
KAS	Kaltaufgabesystem
UN-No	Unit-Number
VOC	flüchtiger gesamtorganischer Kohlenstoff
Wt	Gewicht
Z.B.	zum Beispiel
fhPa	Hekto-Pascal
id.	Innendurchmesser
inc	
kN	Kilo-Newton
kPa	Kilo-Pascal
kp	Kilo-Pond
kp*h	Kilo-Pond mal Stunde
lbf	Pound
lbf*h	Pound mal Stunde
lbs	Pound
mA	Milli-Ampere
n.b.	nicht bestimmbar
o.e	oben erwähnt
psi	Pound per Squareinch
spez	speziell
v.g.	vor genannte/r
vol%	Volumen-Prozent
wt%	Gewichts-Prozent
z.Ztpkt	zum Zeitpunkt

6 GLOSSAR

Die Erläuterung der wichtigsten im Text verwendeten Begriffe wird in den jeweiligen Textstellen gegeben. Weitere Erläuterungen befinden sich auf der beigefügten CD-ROM.

Kapitel 1
Problematik der Emissionmessung und Aufgabenstellung

7 EINLEITUNG

Die Emissionen luftfremder Stoffe aus zivilen Flugzeugtriebwerken sind hinsichtlich der Emissionskomponenten Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO/NO_2), Gesamtkohlenstoff (VOC) und Staub hinreichend untersucht. Für nahezu alle derzeit im Einsatz befindlichen Triebwerktypen der zivilen Luftfahrt sind zu diesen Komponenten Daten erhältlich. Eine Sammlung dieser Daten befindet sich unter anderen z.B. in der "ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank" [1]. Dabei ist bei der Entwicklung neuer Triebwerksgenerationen insbesondere die NO_x-Emission eine wesentliche Führungsgröße.

Unabhängig davon beschäftigt sich aber insbesondere im Nahbereich ziviler Flughäfen die Bevölkerung mit der Frage der Emissionen möglicher toxischer Abgasinhaltsstoffe aus den Triebwerken vorwiegend startender und landender Flugzeuge[2]. Aus der Vielzahl der vorhandenen Daten ließ sich in der Vergangenheit gerade diese Frage, die sich vorwiegend an die Behörden richtet, in aller Regel jedoch nicht beantworten, so daß in nicht wenigen Fällen der Versuch möglicher Antworten wesentlich von Spekulationen beeinflußt war.

Um nun gerade in diesem Themenbereich einen Beitrag zur Aufklärung dieser Fragestellungen zu erbringen, wurde hierzu im Rahmen einer Konzeptstudie [3] des Hessischen Umweltministeriums zur Untersuchung der Umweltsituation im Nahbereich des Rhein-Main Flughafens Frankfurt bereits im Jahre 1994 angeregt, Emissionsmessungen an zivilen Flugzeugtriebwerken, ggf. in sog. Triebwerksstandlaufeinrichtungen, möglichst bei unterschiedlichen Lastzuständen durchzuführen.

Einschlägige Recherchen hinsichtlich der Frage nach ähnlichen Programmen und Untersuchungen oder bereits vorhandenem Datenmaterial waren wenig ergiebig. Gleichwohl hat sich eine bestimmte Anzahl von Autoren mit dieser Fragestellung auseinandergesetzt. Im wesentlichen behandeln diese Publikationen aber vorrangig die Frage der Emissionen der Summe flüchtiger organischer Verbindungen (VOC Volatile Organic Compounds) oder aber die Emission bestimmter Komponentengruppen wie z.B. Aldehyde etc.. Auf die hier bekannten Publikationen wird an entsprechender Stelle im Text hingewiesen.

Die Hersteller von zivilen Flugzeugtriebwerken gaben zu einschlägig gezielten Anfragen selbst keine befriedigende Antwort.

Zu Beginn der Arbeiten wurde somit der Eindruck erweckt, auf diesem Sektor Neuland zu betreten. Eine Veröffentlichung von C.W. Spicer et al.[4] war zu diesem Zeitpunkt der einzige brauchbare Hinweis. Allerdings handelte es sich hierbei um Emissionsuntersuchungen an militärischen Triebwerken, bei denen einerseits z.T. andere Treibstoffvarianten eingesetzt werden und bei denen andererseits im Vergleich zu zivilen Triebwerkstypen ein anderer Aufbau sowie eine andere Betriebsweise der Triebwerke vorherrscht.

In 1996 kam hier ein weiterer Hinweis durch eine Arbeit von Ch. Schlatter et al. von der ETH Zürich[5] über die Untersuchung der Emissionen eines Triebwerkes des Types PW 4060 des Herstellers Pratt & Whitney hinzu.

8 PROBLEMATIK DER EMISSIONSMESSUNG

Die Durchführung von Emissionsmessungen zur Überwachung gesetzlich festgelegter Emissionsgrenzwerte oder zur Überprüfung der Betriebsweise von Anlagen oder emissionsmindernden Einrichtungen wie Filtern, Wäschern etc. sind für die meisten Anwendungsfälle in einer Vielzahl technischer Regeln (VDI-Richtlinien, DIN- oder EN-Normen etc.) national und international reglementiert. Bei den meßtechnisch zu erfassenden Anlagen handelt es sich zudem überwiegend um stationär betriebene Einrichtungen.[6]

Die im Zusammenhang mit dieser Arbeit zu betrachtenden "Anlagen" werden einerseits nicht stationär und andererseits gleichzeitig unter Bedingungen betrieben, die sicherlich nicht als vergleichbar mit den Anlagen zu sehen sind, an denen üblicherweise Emissionsmessungen durchgeführt werden.

Die Schwierigkeit der Messung besteht in erster Linie darin, insbesondere hinsichtlich der Beprobung, möglichst die Kriterien einer repräsentativen Probenahme, wie sie in den Technischen Regelwerken für "normale" Anlagen gefordert werden, auf Flugzeugtriebwerke zu übertragen.

Oberster Grundsatz ist hierbei, die Proben während des Betriebs von Flugzeugtriebwerken so zu entnehmen, daß sie für die jeweils betrachtete Betriebsweise als repräsentativ angesehen werden können.

In die Überlegungen, repräsentative Abgasproben zu erhalten, wurden grundsätzlich drei Möglichkeiten einbezogen und zwar

1. Messungen an Flugzeugtriebwerken, die in Triebwerksstandlaufeinrichtungen (Prüfständen) betrieben werden,
2. Messungen an Flugzeugtriebwerken, durch Beprobung während der Hinterherfahrt im Abgasstrahl beim Taxibetrieb unter realen Bedingungen im Vorfeldbreich und
3. Messungen an Flugzeugtriebwerken, durch Hinterherflug im Abgasstrahl in Reiseflughöhe.

Unter Würdigung der zu Verfügung stehenden Mittel und Möglichkeiten wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit sowohl die erste als auch die zweite Alternative näher untersucht. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß keine der drei Alternativen für sich allein ein völlig reales Bild der Emissionen luftfremder Stoffe aus Flugzeugtriebwerken ergeben kann. Hierin wird grundsätzlich eine Einschränkung des Aussagewertes für alle später anzugebenden Meßwerte gesehen.

Bei der ersten Alternative (Prüfstandmessungen) werden die Triebwerke unter standardisierten Betriebsbedingungen, meist nach Herstellervorgaben auf Einhaltung vorgegebener Spezifikationen überprüft (z.B. LTO-Zyklus[7]). Insbesondere dann, wenn dieser Prüfzyklus modifiziert wird, weicht das zeitliche Emissionsverhalten von den realen Gegebenheiten, z.B. während Starts und Landungen ab.

Die zweite Alternative stellt einerseits sicherlich den Bezug zu realen Verhältnissen deutlich besser her, läßt jedoch andererseits nur die Betrachtung eines speziellen Lastzustandes des Triebwerks zu (Taxibetrieb mit geringer Triebwerksleistung -ca. 7% Schub- allerdings mit dem höchsten Anteil organisch-chemischer Verbindungen im Abgas). Darüberhinaus ist bei der Auswertung einschlägiger Abgasproben zu beachten, daß der im Vorfeldbereich eines Verkehrsflughafens wie z.B. Rhein-Main in Frankfurt angesaugte Bypass-Strom der untersuchten Triebwerke bereits eine nicht näher quantifizierte Grundbelastung an u.a. organischen Stoffen enthält, die nicht dem betrachteten Triebwerk zuzuordnen sind.

Die dritte Alternative läßt sich weitgehend mit der zweiten Alternative vergleichen, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, daß es sich hierbei zwar auch nur um die Betrachtung eines speziellen Lastzustandes (z.B. Max. Cont.) handelt, andererseits ist jedoch die bei der zweiten Alternative störende Grundbelastung des Bypass-Stromes an organischen Stoffen nicht gegeben. Für die vorliegenden Untersuchungen schied diese Alternative neben ökonomischen Überlegungen deshalb aus, weil der vorherrschende Lastzustand der Triebwerke während des Reisefluges einerseits die geringste Emission organisch-chemischer Verbindungen erwarten läßt und andererseits die Verbrennungsvorgänge in der Triebwerksbrennkammer in einer Höhe von etwa 33.000 ft (ca. 10.000m) nicht unmittelbar mit den Verhältnissen am Boden vergleichbar sind.

Im Zusammenhang mit der Realisierung der ersten Probenahmealternative waren an dem zur Verfügung stehenden Triebwerksprüfstand eine Reihe von Problemen zu lösen.

8.1 Problematik der Abgasbeprobung in einer Triebwerksstandlaufeinrichtung (Prüfstand)

Für die Abgasbeprobung von Flugzeugtriebwerken in Triebwerksstandlaufeinrichtungen wurden vorwiegend zwei alternative Möglichkeiten gesehen und zwar

1. die Beprobung unmittelbar am Triebwerksende und
2. die Beprobung im Abgaskanal des Prüfstandes in einer Entfernung von *n* Metern hinter dem Triebwerksende

Vorteile der ersten Alternative sind insbesondere eine weniger starke Verdünnung der Abgase durch Bypass-Luft und damit eine möglicherweise höhere analytische Nachweisempfindlichkeit organisch-chemischer Einzelverbindungen. Dagegen steht bei den vorherrschenden Abgastemperaturen unmittelbar am Triebwerksende eine nicht auszuschließende Reaktivität organisch-chemischer Verbindungen und/oder Radikale, ggf. katalytisch beeinflußt durch die Materialien der Beprobungseinrichtungen. Hierbei handelt es sich zwar um die Vermutung solcher Phänomene, aber deren eindeutiger Ausschluß hätte die Untersuchungen unverhältnismäßig erweitert ohne den Aussagewert der Ergebnisse wesentlich zu beeinflussen. Ein weiterer Vorteil dieser Alternative ist das Handling einer relativ kompakt zu haltenden Probenahmesonde.

Vorteile der zweiten Alternative sind die weitgehende Abkühlung der Triebwerksabgase und damit ein “Einfrieren” möglicher weiterer Reaktionen der organisch-chemischen Verbindungen, vorwiegend durch die Zumischung von Bypass-Luft. Nachteilig wirkt sich dies zwangsläufig auf die anschließende analytische Bearbeitung aus. Ebenso nachteilig wirken sich die Strömungsverhältnisse im Abgaskanal eines Prüfstandes auf die Beprobungseinrichtungen aus. Hohe auftretende Abgasgeschwindigkeiten bis zu ca. 180 m/s (ca. 650 km/h) machen eine besondere Auslegung der Entnahmesonden in statischer Hinsicht notwendig. Nachteilig ist ebenso, bedingt durch die Kanaldimensionierung, die Größe der bei einem Kanaldurchmesser von ca. 4,5 m erforderlichen Entnahmesonden.

Bei dem für die Beprobung zur Verfügung stehenden Triebwerksprüfstand kam als wesentlicher Nachteil hinzu, daß dieser bei einigen Triebwerkstypen leistungsbezogen am Limit betrieben wird. Dies hat zur Folge, daß alle in den Abgaskanal eingebrachten Einbauten (wie z.B. Probenahmeeinrichtungen) Nachteile für den Prüfbetrieb erwarten ließen. Dies wurde aus verständlichen Gründen vom Betreiber des Prüfstandes abgelehnt (nicht ausschließbare Beschädigung der zu prüfenden Triebwerke, bis hin zum Totalschaden), so daß diese, für den Einbau von Probenahmeeinrichtungen sehr wesentliche Randbedingung, bei der Konstruktion einschlägiger Einrichtungen zwingend mit berücksichtigt werden mußten.

8.1.1 ANFORDERUNGEN AN DIE PROBENAHME

Die grundlegenden Anforderungen für eine weitgehend repräsentative Probenahme partikel- und gasförmiger Abgasbestandteile aus strömenden Gasen ergeben sich aus einschlägigen nationalen und internationalen Vorschriften wie z.B. der Richtlinienreihe VDI 2066 [8], der ISO-Norm 9096 [9], der VDI Richtlinie 2448 [10] und dem Richtlinien-Entwurf VDI 4200 [11,12].

Danach wird gefordert, Abgasteilstromproben querschnittsintegrierend (Netzmessung) und für partikelförmige Abgaskomponenten isokinetisch bzw. für gasförmige Abgaskomponenten geschwindigkeits- oder massenproportional[13] dem Abgasgesamtstrom zu entnehmen.

Allein die normgerechte Realisierung der Durchführung einer Netzmessung über einen Abgasquerschnitt von ca. 16 m^2 , wie er bei dem beprobten Triebwerksprüfstand zur Verfügung stand, würde gemäß der Richtlinie VDI 2066 Bl. 1 eine Anzahl von 64 (bzw. mind. jedoch 20) Entnahmepunkten mit sich bringen. Bauartbedingt ist es an dem betreffenden Prüfstand allerdings nicht möglich, während des eigentlichen Prüflaufes die Entnahmesonden zu versetzen, so daß nur ein Festeinbau der Sonden auf den jeweiligen Entnahmepunkten möglich ist.

Bedingt durch die in Abschnitt 11.1 erwähnten Umstände waren entsprechende Probeentnahmesonden-Festeinbauten nur an der Stirnseite, die dem zu prüfenden Triebwerk gegenüberliegt, möglich. *Diese Lösung stellt ganz eindeutig einen Kompromiß dar, der jedoch in Kauf genommen werden mußte*.

Die Anordnung der Entnahmepunkte erfolgte auf zwei Halbachsen des Kanaldurchmessers jeweils auf den Schwerelinien flächengleicher Kreisringe[14].

Bei der Beprobung sind darüberhinaus Anforderungen zu beachten, die sich zum Teil aus bestimmten Rechtsvorschriften wie z.B. der TA Luft[15] oder weiteren Vorschriften des Technischen Regelwerkes ergeben.

Diese Forderungen beziehen sich insbesondere auf die Probenahmedauer und die Minimierung von Einflüssen auf das Probenahmegut nach Entnahme der Abgaproben aus dem Meßquerschnitt bis zur Anreicherung der jeweiligen chemischen Stoffe an geeigneten Sorbentien.

9 AUFGABENSTELLUNG

Die Aufgabenstellung wurde zunächst im Zusammenhang mit der bereits in Abschnitt 7 erwähnten Konzeptstudie relativ global umrissen.

Hiernach galt es, das beim Betrieb von Flugzeugtriebwerken emittierte Spektrum organisch-chemischer Verbindungen aufzuklären. Darüberhinaus sollte untersucht werden, ob sich möglicherweise charakteristische Fingerprints der Emissionen organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von Flugzeugtriebwerken nachweisen lassen.

Zum Zeitpunkt der ersten groben Fixierung dieses Projektes war man sich insbesondere über die in Abschnitt 8 erläuterten probenahmetechnischen Probleme nicht umfassend im klaren, so daß die Aufgabenstellung zunächst um die Entwicklung eines praktikablen und vor allem weitgehend repräsentativen Probenahmeverfahrens erweitert werden mußte.

Ebenso war anfangs noch nicht geklärt, nach welchen chemischen oder chemisch-physikalischen Verfahren die erhaltenen Proben zu untersuchen waren.

Als besonders schwierig stellte sich nach Annahme des Projektes die Abstimmung der jeweiligen Prüfläufe mit der tatsächlichen Beprobung heraus. Es mußte ein logistisches Konzept erarbeitet werden, welches weitgehend die prüfbetriebsbedingten Dispositionen berücksichtigte, wobei nicht die Beprobung die eigentliche Führungsgröße darstellte, sondern der reale Prüflauf. Damit erklärt sich letztendlich auch die Dauer des Projektes, die nahezu ausschließlich von dieser Problematik geprägt war.

In einer präzisierteren Aufgabenstellung kam hinzu, möglichst unterschiedliche Lastzustände der Triebwerke auf ihr Emissionsverhalten bezüglich organisch-chemischer Verbindungen zu untersuchen.

Somit läßt sich in der Reihenfolge der jeweiligen Bearbeitungsschritte, die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit, wie folgt zusammenfassen:

1. Konstruktion und Bau einer den Anforderungen entsprechenden geeigneten Probenahmeapparatur
2. Optimierung des Probenahmeverfahrens
3. Untersuchung unterschiedlicher Sorbentien für die Anreicherung der beim Betrieb von Flugzeugtriebwerken emittierten organisch-chemischen Verbindungen
4. Entwicklung, Optimierung und Einsatz der chemisch bzw. chemisch-pysikalischen Analysenmethoden
5. Aufbau der Logistik zwischen Labor und Probenahmeort
6. Beprobung einer möglichst ausreichenden Anzahl von Triebwerken (stationär und mobil) und anschließende qualitative und quantitative Analyse der Abgasproben bezüglich der Zusammensetzung des Spektrums organisch-chemischer Verbindungen.
7. Versuch der Ermittlung signifikanter Relationen zwischen den organisch-chemischen Komponenten des Abgases (Aufspüren signifikanter Fingerprints)
8. Quantitative Ermittlung diskreter Stoffgruppen mit Hilfe genormter Analysenverfahren
9. Erprobung und Einsatz kontinuierlich registrierender Meßtechnik
10. Erprobung, Optimierung und Einsatz der Datenfernübertragung zur Übertragung von Meßdaten aus Prüfläufen, die nicht diskontinuierlich beprobt werden konnten.

Da im Nahbereich aller zivilen Verkehrsflughäfen neben einer flugverkehrsbedingten Luftbelastung eine nicht zu unterschätzende Luftbelastung durch Kraftfahrzeuge des An- und Abreiseverkehrs, durch den Zulieferverkehr, durch Vorfeldfahrzeuge etc.[16] zu verzeichnen ist, erscheint es ebenso von Bedeutung, den Versuch zu unternehmen, möglichst charakteristische Emissionskomponenten für diesen Anteil der Gesamtbelastung meßtechnisch zu ermitteln.

Hier soll nach Abschluß der Untersuchungen an Flugzeugtriebwerken auch die Emission organisch-chemischer Verbindungen aus Dieselmotoren untersucht werden. In diese erweiterte Aufgabenstellung sollen ebenso praktische Beprobungen unter Einsatz der bei der Beprobung von Flugzeugtriebwerken und der einschlägigen Analysenverfahren der jeweiligen Abgasproben zum Einsatz gekommenen Verfahren Anwendung finden, um eine direkte Vergleichbarkeit der Komponentenspektren zu gewährleisten.

Neben den grundlegenden Erkenntnissen hinsichtlich der Emissionen organisch-chemischer Verbindungen aus Flugzeugtriebwerken, die sich aus der Aufgabenstellung ableiten lassen, sollte darüberhinaus der Versuch unternommen werden, spezifische Leitgrößen für die Immissionsermittlung im Einwirkungsbereich ziviler Flughäfen zu benennen. Sollten spezifische Leitgrößen nicht ermittelbar sein, soll andererseits versucht werden, anhand spezifischer Verhältnisse der Emissionskomponenten untereinander ein „triebwerkspezifisches Emissionsspektrum“ organisch-chemischer Verbindungen zu charakterisieren.

Kapitel 2
Untersuchungsgegenstand und qualitative Untersuchung

10 UNTERSUCHTE TRIEBWERKE

10.1 Triebwerkstandlaufeinrichtung

Das moderne High-Bypass Triebwerk stellt ein kompliziertes Zusammenspiel von mechanischen, elektrischen, pneumatischen und hydraulischen Systemen auf der einen Seite und aerodynamischen und thermodynamischen Prozessen auf der anderen Seite dar. Um ein Triebwerk auf Betriebssicherheit und Funktion prüfen zu können, müssen eine Anzahl von Meßdaten ermittelt werden. Diese werden dann mit vorgegebenen Herstellerdaten verglichen und protokolliert.

Wie in Kapitel 1 Abschnitt 8 erwähnt wurde, wird als eine Möglichkeit repräsentative Abgasproben zu erhalten, in Erwägung gezogen, Abgasproben aus Flugzeugtriebwerken während diskreter Prüfläufe in sog. Triebwerkstandlaufeinrichtungen (Prüfständen) zu erhalten.

Für die Probenahme wurde zu diesem Zweck der Prüfstand FRA P IV der Deutschen Lufthansa Technik AG in Frankfurt/Main gewählt.[17]

Dieser Prüfstand für Strahltriebwerke wurde 1974 in Betrieb genommen. 1982 wurde eine Anlage zur elektronischen Meßdatenerfassung und -verarbeitung nachgerüstet. 1985 wurde eine Modernisierung des Abgaskanals erforderlich. Der Abgaskanal hat einen Querschnitt von 10 x 9,5 m^2 und zeichnet sich durch eine stark armierte Stahlbetonkonstruktion mit steifen Rahmenecken aus. Der gesamte Baukörper des Kanals wirkt als Fundamentmasse, so daß auf ein Blockfundament verzichtet werden konnte. Die Dimensionierung und Armierung ergeben sich aus den Anforderungen der Steifigkeit einerseits und dem thermischen Gefälle in den Wandungen des Kanals andererseits. Der Prüfkanal umfaßt folgende Zonen:

- Ein Ansaugturm (waagerecht ansaugend) mit Ansaugschalldämpfern, Prüfkanal mit Einfahrt zur Rüsthalle, unterhalb der Decke angeordnet das Schubmeßgerüst, ausgelegt für 100.000 lbf Schub und Meßanschlüssen. Darunter, bodeneben versenkbar, eine hydraulische Stempelhebebühne als Arbeitsbühne
- An den Prüfkanal schließt sich über eine Dehnfuge der Abgaskanal mit Abgasturm und Schalldämpfer an.
- Der Abgaskanal ist eine stark armierte Stahlbetonkonstruktion mit schwingungssteifem Vollrahmenquerschnitt und beherbergt das Abgasrohr
- Neben dem Prüfkanal befindet sich, baulich getrennt und isoliert, ein Anbau, der in zwei Geschosse unterteilt ist. Dieser Anbau besteht im Obergeschoß aus einem Beobachtungs- und Meßraum, einem Büro und einem Sozialraum. Im Untergeschoß befinden sich die Räume für die Hilfsanlagen, Abstellraum, Feuerlösch- und Kraftstoffraum.

Der Prüfstand ist nach dem Konzept errichtet, den gesamten Betrieb und seinen Ablauf unter einem Dach zu vereinen.

Die abgasseitige Dämpfungsstrecke der Luftschallabstrahlung ist im Gegensatz zur Einlaßdämpfungsstrecke akustisch mehrgliedrig. Die Abgase des Triebwerkes gelangen durch ein Augmenter Tube in den eigentlichen Abgaskanal. Der 25,79 m lange horizontale Abgaskanal

besteht aus einem Abgasrohr mit einem Durchmesser von 3,5 m, einem Rieselrohr mit einem Durchmesser von 4,5 m und dem oben erwähnten Abgasturm.

Neben dem eigentlichen Prüfkanal befindet sich in unmittelbar angrenzender Nachbarschaft die Rüsthalle, die zum Aufrüsten der Triebwerke benutzt wird.

Zum Starten der Triebwerke dient die Anlaßdruckluftanlage. Sie besteht aus einem 30 m^3 großen aufrechtstehendem Drucklufttank, einem Kompressor, einem Lufttrockner, mehreren Geräten und Armaturen, Rohrleitungen und Steuerung. Sie ist so ausgelegt, daß ein Triebwerk auch mehrmals nacheinander gestartet werden kann. Der Luftspeicher wird von einem Kompressor versorgt.

Beim Starten des Triebwerkes vom Kontrollraum aus geben die Magnetventile den Weg für die Druckluft frei. Über eine Rohrleitung, welche am Ende mit einem flexiblen Rohrstück am Luftstarter des Triebwerkes angeschlossen ist, gelangt die Druckluft mit einem Druck von ca. 3,4 bar zum Starter. Beim Ausfall des Kompressors kann die Anlage mit einem APU-Wagen, wie er normalerweise zum Anlassen der Triebwerke auf dem Vorfeld verwendet wird, mit Startluft versorgt werden.

Um den Schub eines Triebwerkes als wesentliche Leistungsgröße während eines Prüflaufes messen zu können, ist im Prüfstand an der Decke des Prüfkanals ein Schubmeßgerüst mit Elevator montiert.

Das Triebwerk, mit dem an der Aufhängung des Triebwerks befestigten Adapter, wird unter das Schubmeßgerüst gefahren. Über Hydraulikzylinder, Ketten und Stahlseile wird der Elevator abgelassen und mit vier hydraulischen Arretierungsbolzen fest mit dem Adapter verbunden. Der Elevator wird dann zusammen mit dem Triebwerk hochgezogen und mit Hilfe von drei hydraulischen Arretierungsbolzen im Schubmeßgerüst arretiert.

Das eigentliche Schubmeßgerüst besteht aus einem ortsfesten Grundrahmen mit zentralem Schubwiderlager, einem Schwingrahmen und den aus Blattfedern ausgeführten Verbindungselementen. Der Grundrahmen trägt die Schubmeßdose und den zur Erzeugung der Kalibrierkraft benötigten Hydraulikzylinder. Die elektronische Vergleichsmeßdose ist mit dem Schubwiderlager fest verschraubt.

Zu jedem modernen Strahltriebwerksprüfstand gehört ein eigenes Kraftstoffversorgungssystem, um einen kontinuierlichen Betrieb bei einem gleichzeitig beträchtlichen Verbrauch von Kerosin zu gewährleisten. Für einen “normalen” Prüflauf eines Großtriebwerks werden zwischen 5000 und 7000 Liter Kerosin verbraucht.

Das Kerosin wird in zwei 40.000 l-Tanks gelagert. Das Kraftstoffversorgungssystem ist so ausgelegt, daß eine Durchflußänderung von minimal 5 l/Min auf maximal 290 l/Min innerhalb von drei Sekunden möglich ist.

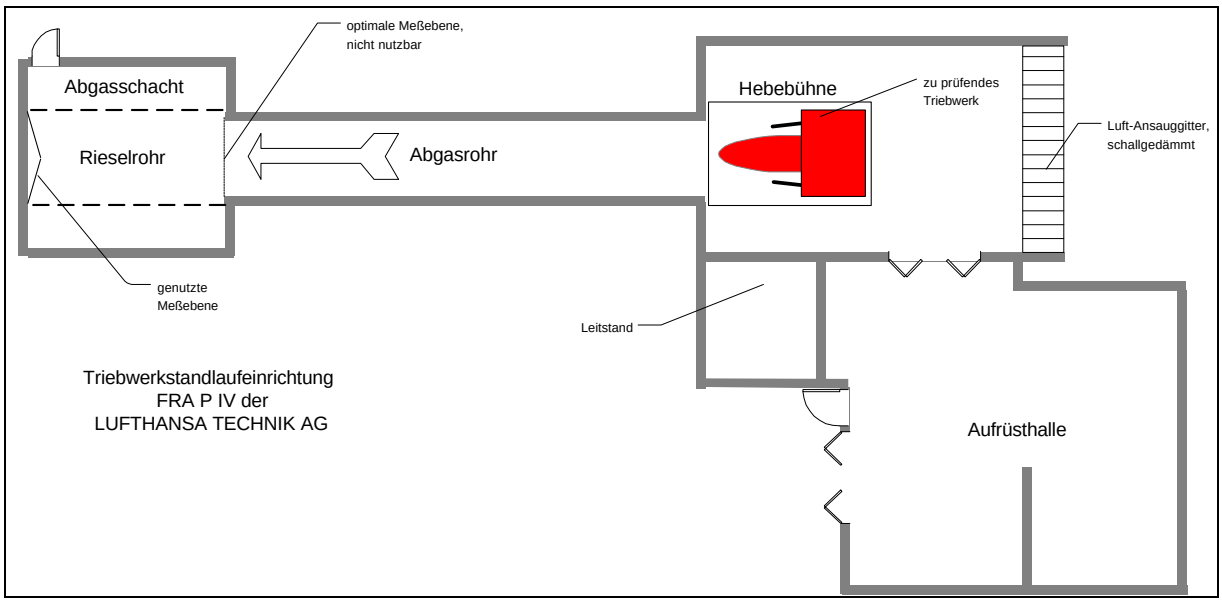


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Prüfstandes

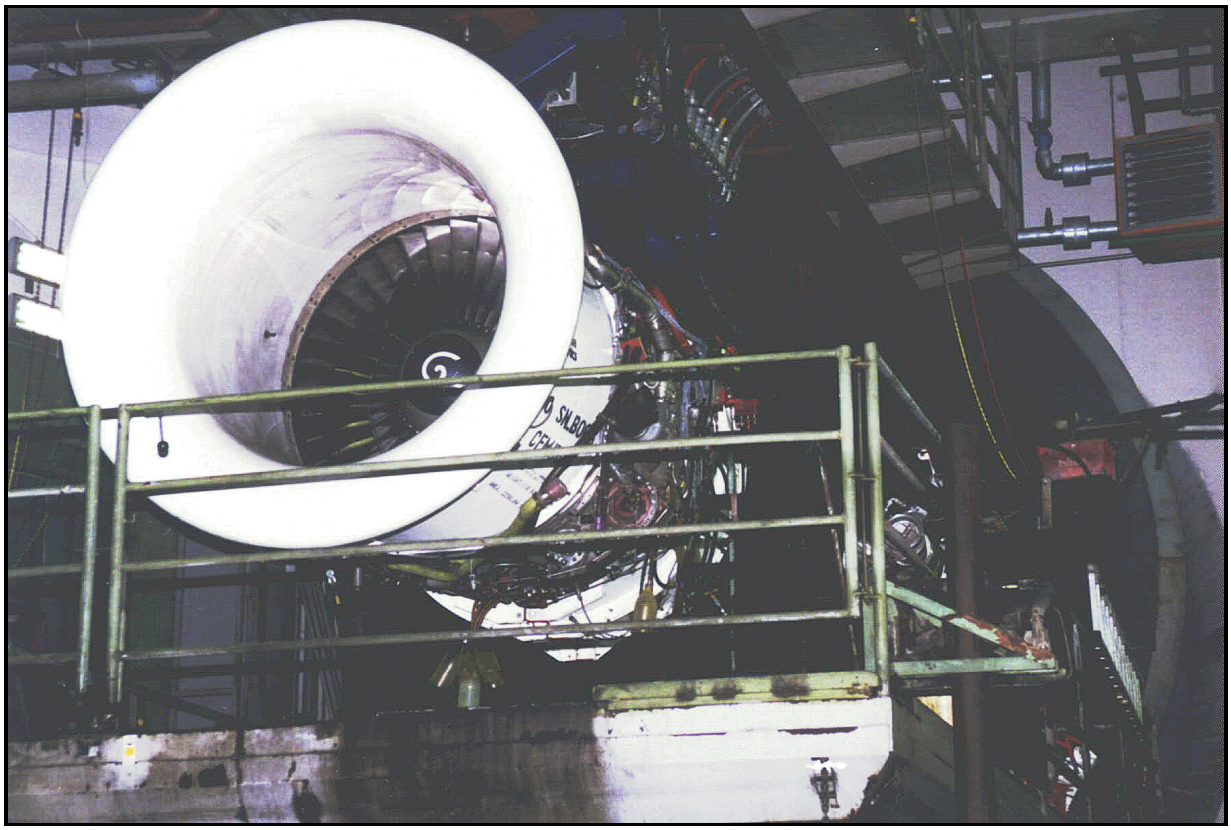


Abbildung 2: Triebwerkstandlaufeinrichtung FRA P IV der Lufthansa TechnikAG Frankfurt

10.2 Triebwerke

In der Triebwerkstandlaufeinrichtung FRA P IV der Lufthansa Technik AG in Frankfurt lassen sich derzeit folgende Triebwerke prüfen:

JT8D-1	Pratt & Whitney	B727 / B737 / DC 9
JT8D-1A	Pratt & Whitney	
JT8D-7A	Pratt & Whitney	
JT8D-7B	Pratt & Whitney	
JT8D-9A	Pratt & Whitney	
JT8D-15	Pratt & Whitney	
JT8D-17	Pratt & Whitney	
JT8D-17A	Pratt & Whitney	
JT8D-17R	Pratt & Whitney	
CF6-50E2	**General Electric *)**	A300 / A310 / DC 10 / B747 / B767
CF6-50C2	**General Electric *)**	
CF6-80A3	General Electric	
CFM 56-3B1	**CFM International *)**	B 737-300 / 400 / 500
CFM 56-3B2	**CFM International *)**	
CFM 56-3C	**CFM International *)**	
GTCP85-129	**Garrett *)**	APU B727 / B737 APU DC 10 / A 300
TSCP 700	Garrett	

*) Triebwerke, die zum Zeitpunkt der meßtechnischen Ermittlungen der HLfU geprüft wurden

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden die Triebwerke

CF6-50E2	General Electric
CF6-50C2	General Electric
CFM 56-3B1	CFM International
CFM 56-3B2	CFM International
CFM 56-3C1	CFM International

hinsichtlich der Emissionen organischer chemischer Verbindungen untersucht.

10.2.1 TriebwerkE CF6-50 E2 / C2

Bei diesem Triebwerk handelt es sich um ein 2-Wellen-Front-Fan-Triebwerk mit hohem Bypass-Verhältnis. Dieses Triebwerk wird vorwiegend an folgenden Verkehrsflugzeugen eingesetzt: MacDonnell-Douglas DC 10-30 und Boeing B747-230B[18]. Die Tabelle 1 gibt wesentliche technische Daten des Triebwerks wieder.

Tabelle 1: Take-off Power Settings

PARAMETER	
Total Thrust	51.000 lbs (230,4 kN)
Fuel Flow	9.300 kp/h
TSFC	0,393 kp/kp*h
RPM N1 Fan Speed	3433 (100%)
RPM N2 Core Speed	9827 (100%)
Air Flow	685 kg/sec
Fan Air Flow	558 kg/sec
Prim Air Flow	127 kg/sec
Bypass Ratio	4,4 : 1
Compression-Ratio	29,4 : 1
EGT ($T_{t5,4}$)	887 °C (max 950°C -2Min)
Turbine Inlet Temp. $T_{t3,9}$	1400°C

In der nachfolgenden Abbildung 3 wird der schematische Aufbau eines Triebwerkes des Typs CF6 -50 E/C 2 wiedergegeben.

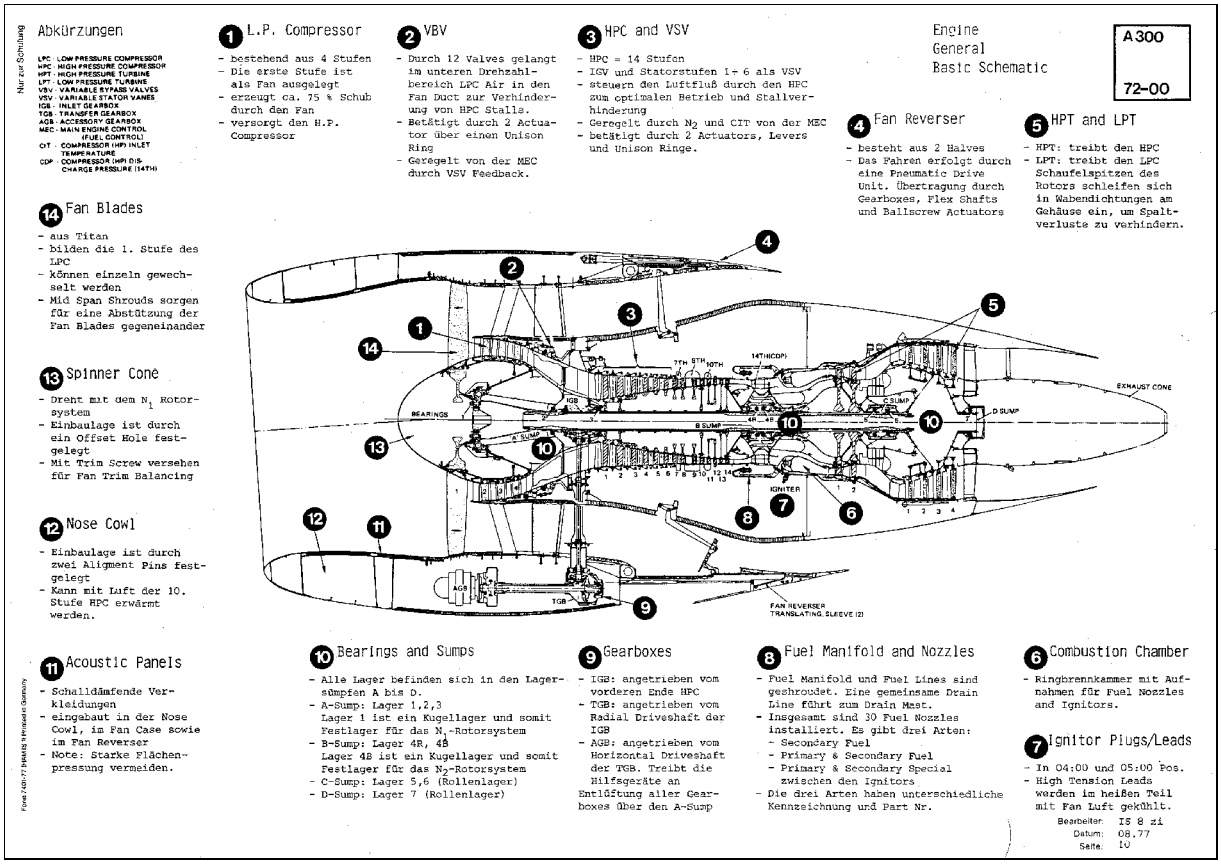


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Triebwerks GE - CF6 - 50

Vereinfacht wird die Funktion des Triebwerkes wie folgt beschrieben:

Verdichtete Luft mit einer Temperatur von > 500°C strömt in die Ringbrennkammer. Hier wird der Brennstoff über 30 Einspritzdüsen (Fuel Nozzles) eingespritzt, zerstäubt und das so entstandene Brennstoff/Luft-Gemisch kontinuierlich verbrannt. Die Temperatur der Verbrennungsgase erreicht in der Brennkammer 1400°C. Im hinteren Teil der Brennkammer wird ein weiterer Teil der verdichteten Luft zugeführt und somit die Temperatur lastabhängig geregelt. Die Abgastemperatur beträgt ca. 950°C bei Vollast (Take off), ca. 875 °C im Lastzustand "Max. Continous" und 375° im Leerlauf (Idle). Das heiße Gas durchströmt expandierend die Turbine. Dabei wird dem Gasstrom mechanische Energie zum Antrieb des Hochdruckverdichters, der Hochdruckturbine (N2) sowie dem Fan, des Niederdruckverdichters und der Niederdruckturbine (N1) entnommen. Mit Hilfe des Fan wird die das Triebwerk anströmende Kaltluft zum größten Teil durch einen sich verengenden, um das Verdichtergehäuse angeordneten ringförmigen Mantel geleitet. Hierbei wird die Luft verdichtet und beschleunigt, wobei der Hauptanteil des Schubes erzeugt wird. Dieser kalte Luftstrom liefert den weitaus größeren Anteil am Gesamtschub. Der Gesamtschub wird durch die Beschleunigung des inneren und äußeren Gasstromes erzeugt (Verhältnis 1:4,4 bei CF6 -50).

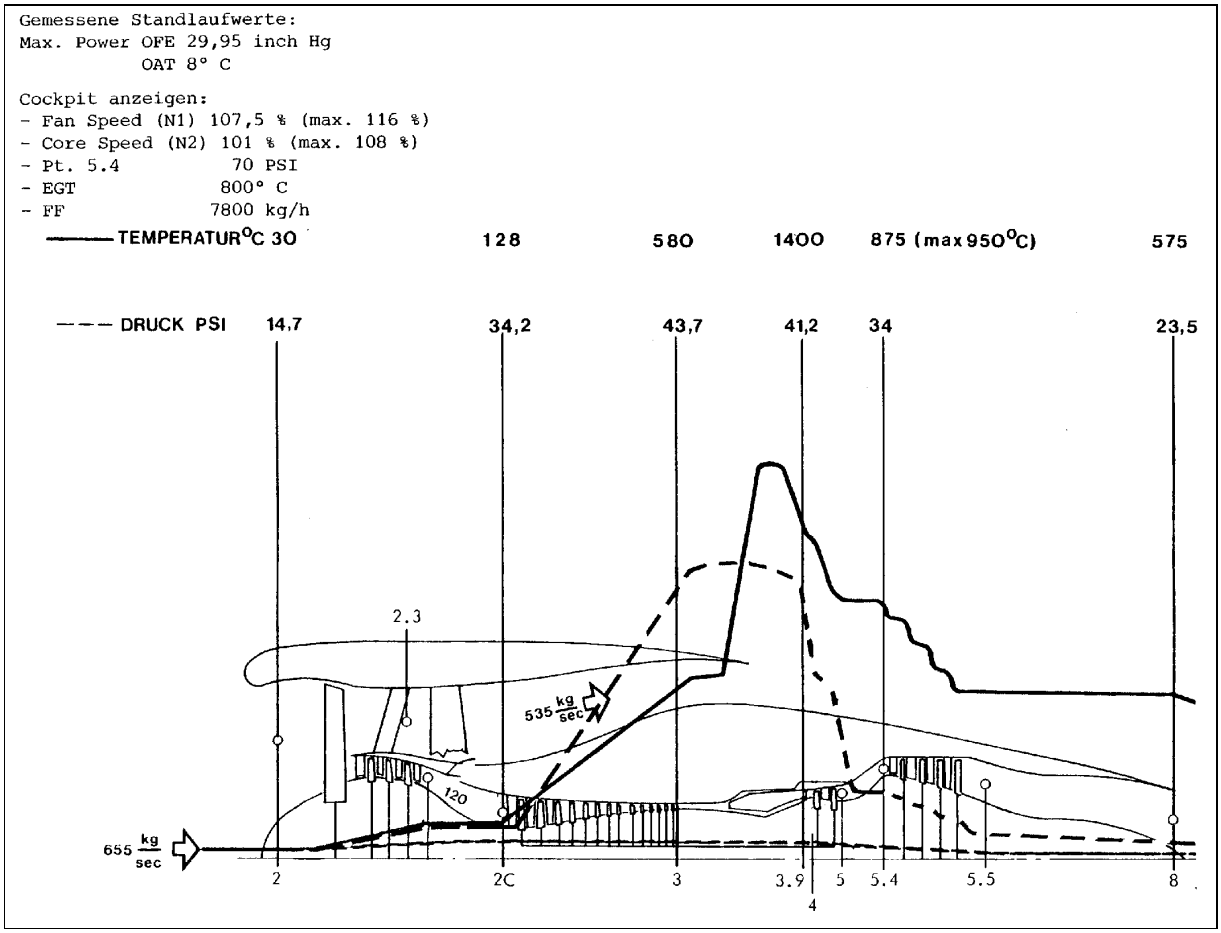
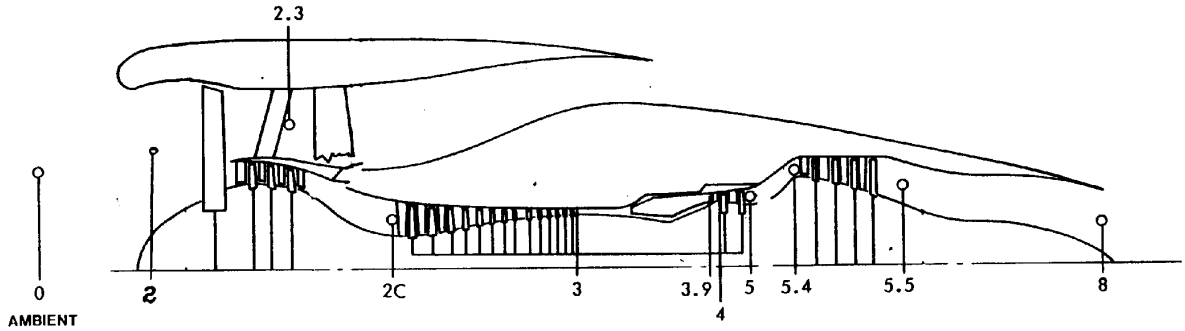


Abbildung 4: Temperatur und Druckverlauf in einem Triebwerk vom Typ CF6 - 50



Station	Bereich	Abnahmen
0	Umgebung	
2	Eintritt in den N_1-Verdichter	
2.3	Austritt FAN	
2.C	Eintritt in den N_2-Verdichter (Core)	CIT (Compr. Inlet Temp.)
3	Austritt aus dem N_2-Verdichter	CDP (Compr. Discharge Press)
3.9	Eintritt in die N_2-Turbine (Nozzle Guide Vanes)	
4	Eintritt in die 1. Rotorturbinen-stufe	
5	Austritt aus der N_2-Turbine	
5.4	Eintritt in die N_1-Turbine	EGT (Exhaust Gas Temp), $P_{t5.4}$
5.5	Austritt aus der N_1-Turbine	
8.	Austritt aus der Schubdüse	

Abbildung 5: Stationen innerhalb eines Triebwerks vom Typ CF6 - 50

Tabelle 2: In der ICAO-Datenbank werden folgende Emissionsdaten für diesen Triebwerkstyp angegeben:

Unique ID Number:	CF6-50E2	By-Pass Ratio:	4,3
Engine Identification:	1GE009	Pressure Ratio:	29,8
Engine Typ:	TF	Rated Output (kN):	230,4
DATA TYPE		Pre-Regulation	
DATA SOURCE		Newly Manufactured Engine	
EMISSIONS DATA		Corrected for Ambient Effects	

Mode *)	Power Setting ($\%F_{00}$)	Time min	Fuel Flow kg/s	HC g/kg	CO g/kg	NO_x g/kg	Smoke Number
Take-off	100	0,7	2,487	0,6	0,5	36,3	4,1
Climb out	85	2,2	1,975	0,7	0,5	29,7	2,7
Approach	30	4,0	0,660	1,0	4,3	9,5	2,7
Idle	7	26,0	0,215	21,8	61,8	3,6	4,5
Number	of Tests			6	6	6	6
Number	of Engines			6	6	6	6
D_p/F_{00}	(Average)	(g/kN) or	SN (Max)	33,5	93,7	61,8	4,5
D_p/F_{00}	(g/kN) or	SN	(Sigma)	3,8	4,6	0,5	1,5
D_p/F_{00}	(g/kN) or	SN	Range	-	-	-	-

*) Die angegebenen Modi sind nicht genormt, sie können im Vergleich mit anderen Tests in Prüfständen unterschiedliche Power-Settings zur Folge haben.

ACCESSORY LOADS

Power Extraction:	0 (kW)	AT:	- Power Settings (s)
Stage Bleed:	0 % Core Flow	AT:	- Power Setting

ATMOSPHERIC CONDITIONS

Pressure	kPa	98.3 - 100.4
Temperature	°C	-3 to 23
Abs Humidity	kg/kg	.0027 - .0103

FUEL

Spec	N/C	Arom (%)
Jet A	1.92	17.1

Manufacturer:	GE Aircraft Engines
Test Organization:	Production Engine Test
Test Location:	Production Test Cells M34 & M35
Test Dates:	**From 12.Oct. 79 to 05.Dec. 79**
Remarks:	Ref Report no FAA-EE-80-27 (GE-Report R80AEG420)

10.2.2 Triebwerke CFM-INTERNATIONAL CFM 56 - 3 B1/B2/C1

Bei dem CFM 56-3 - Triebwerk handelt es sich um ein High Bypass-Front Fan Triebwerk mit einem Bypass-Ratio von 5:1. Dieses Triebwerk wird vorwiegend an Flugzeugen des Typs Boeing **737** eingesetzt.

Applications	CFM56-3B1	CFM56-3B2	CFM56-3C1
Boeing Typ }	737-330/322	737-330/322	737-322
	737-530	737-400	737-430
			737-522

Es besitzt zwei Rotorsysteme. Das N1 -oder Niederdrucksystem besteht aus

- einem 1-stufigen Fan mit Mid-Span-Shroud
- einem 3-stufigen Niederdruckverdichter (Booster)
- einer 4-stufigen Niederdruckturbine (LPT) sowie
- einer verbindenden Welle

Das N2- oder Hochdrucksystem besteht aus:

- einem 9-stufigen Hochdruckverdichter und
- einer 1-stufigen Hochdruckturbine (HPT)

Das Verbrennungssystem ist als Ringbrennkammer (Annular Combustor) ausgeführt. Das Triebwerk besitzt einen Fan-Schubumkehrer, der in die Triebwerksverkleidung integriert ist.

Der Hilfsgeräteträger (Accessory Gearbox) ist aufgrund der geringen Bodenfreiheit einerseits und dem großen Fan-Durchmesser andererseits, seitlich am vorderen Fan-Gehäuse angebracht.

Tabelle 3: Technische Daten des Triebwerks CFM56-3 (Mittelwerte)

PARAMETER	
• Thrust [19] Take off (Sea Level Static) Max. 5 Min., Flat Rated Ambient Temperature Max. Continous (Sea Level Static), Flat Rated Ambient Temperature	20.100 lb = 89,41 kN ,30 °C 18.900 lb = 84,07 kN ;25 °C
Airflow (Take off)	297 kg/sec
Bypass-Ratio	5 : 1
Compressor Pressure Ratio (overall, take off, SLS)	22,6 :1
Fan Pressure Ratio (take off, SLS)	1,59 : 1
Fan Thrust / Core Thrust (bei take off)	ca. 80 : 20
T_{41} ~ TIT (take off - hot day)	1265 °C
T49,5 = EGT Red Line Max. Continous Eng. Start	930 °C 895 °C 725 °C
N1 - Design Speed 100% N1 - Max. 102 %	5175 min^{-1} 5280 min^{-1}

PARAMETER	
N2 - Design Speed 100% N2 - Max. 105%	14460 min^{-1} 15183 min^{-1}
TSFC (Standard, Static) • Take off • Max. Cont. • 60 %	 0,385 lbs/lbf*h 0,38 lbs/lbf*h 0,37 lbs/lbf*h
TSFC (Mach 0,72, Altitude 36.000 ft, Std. Day)	0,62 lbs/lbf*h

Beim CFM 56-3B1 handelt es sich um eine sog. Flat-Rated-Engine.

Bei einem Standard-Außenluftdruck von 1013 hPa kann der maximale Schub von 20100 lbf für den Take-Off zeitlimitiert, bis zu einer Außenlufttemperatur von 30°C, gesetzt werden. Oberhalb dieser Temperatur muß der Maximalschub aufgrund des dann erreichten EGT-Limits reduziert werden. Unterhalb dieser Temperatur wird der Schub konstant gehalten. Beim Max. Continous Thrust ist ein konstant bleibender Schub von 18900 lbs bis zu einer Außentemperatur von 25 °C möglich. Oberhalb 25 °C muß auch hier der Schub wegen Erreichen des Max. Continous EGT-Limits reduziert werden.

In der nachfolgenden Abbildung 6 wird der schematische Aufbau eines Triebwerkes des Typs CFM 56-3 wiedergegeben.

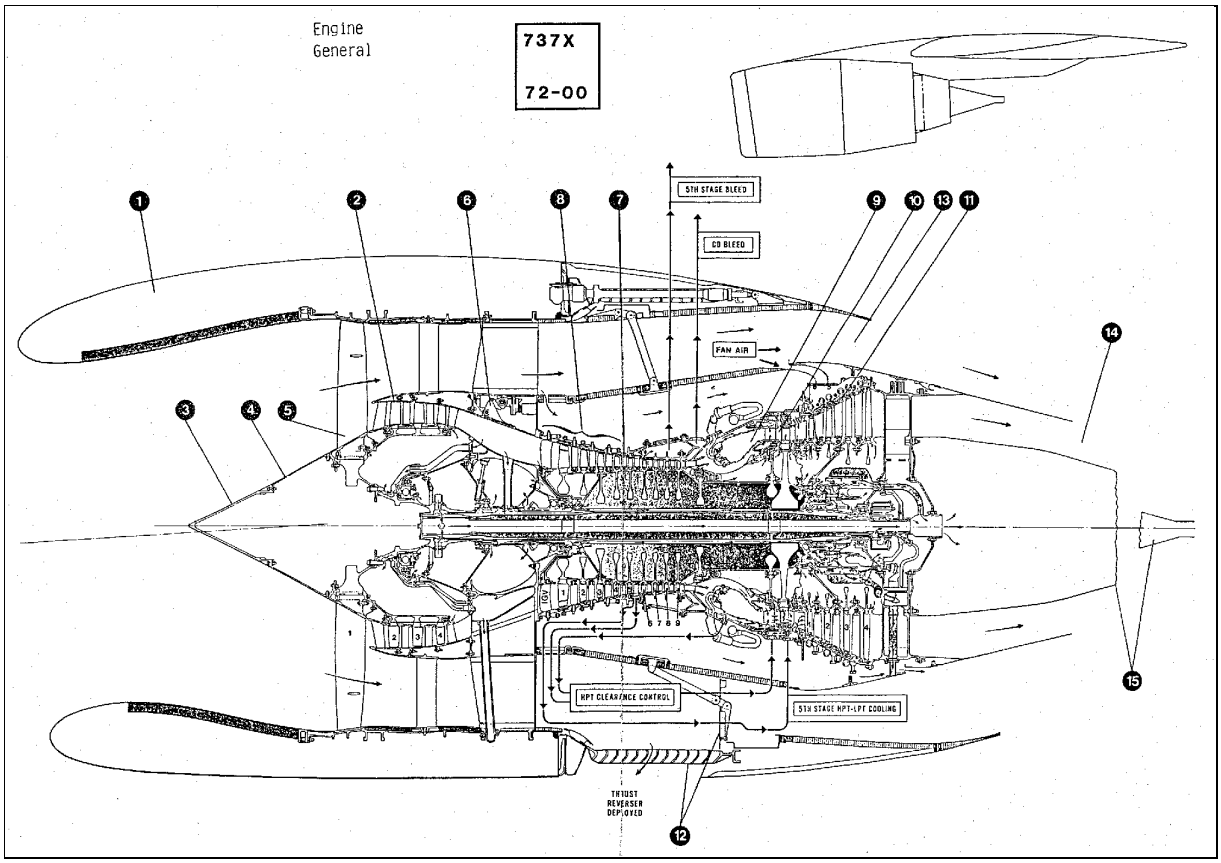


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Triebwerks CFM 56 - 3

❶ Inlet Cowl

Die Inlet Cowl soll die Luft optimal bei verschiedensten Betriebs- und Anströmbedingungen in das Triebwerk leiten.
Aufgrund der geringen Bodenfreiheit an der B 737 hat sie eine abgeflachte Unterseite.

❷ Low Pressure Compressor LPC

Der Niederdruckverdichter (N1) ist ein vierstufiger Axialverdichter. Er besteht aus einer Fan-Stufe und drei folgenden Booster-Stufen.
Fan-Air dient neben der Hauptschuberzeugung als Kühlluft für die Niederdruckturbine, den CSD-Ölkühler und Precooler fürs Flugzeug-Pneumatiksystem, sowie zur Cowlingbelüftung. Booster Air dient neben der Core Versorgung als Lagerdichtluft.

❸ Spinner Front Cone
❹ Spinner Rear Cone
❺ Fan Blades

Die 38 Fan Blades stützen sich gegeneinander durch einen Mid Span Shroud. Die Blades sind einzeln auswechselbar.

❻ Variable Bleed Valves VBV

12 kontinuierlich verstellbare Abblasventile sorgen in allen Drehzahlbereichen für einen störungsfreien N1-Verdichterbetrieb. Sie lassen eine jeweils notwendige Luftmenge in den Fanluftstrom abblasen.

❼ High Pressure Compressor HPC

Der Hochdruckverdichter ist ein 9-stufiger Axialverdichter mit Inlet Guide Vanes (IGV). IGV und die Statorstufen 1-3 sind verstellbar.

Äußere Luftabnahmen:

5. HPC-Stufe: HPT-Clearance Control
Anti Ice Air für Inlet Cowl.
Versorgung des Pneumatiksystems.

9. HPC-Stufe: HPT-Clearance Control
Versorgung des Pneumatiksystems.

❽ Variable Stator Vanes VSV

Die verstellbaren Leitschaufeln haben die Aufgabe in allen Drehzahlbereichen einen günstigen Anströmwinkel im HPC zu erzeugen. Sie verhindern damit einen Verdichterstall (Strömungsabriß).
Verstellbar sind:
- IGV (Inlet Guide Vanes) und
- VSV Stufe 1-3

❾ Combustion Chamber

Das Verbrennungssystem besteht aus einer Ringbrennkammer mit 20 Fuel Nozzles und zwei Zündkerzen in 4:00 und 8:00 Uhr Position.

❿ High Pressure Turbine HPT

Die Hochdruckturbine (N2) ist eine einstufige Axialturbine. Stator- und Rotorschaufeln sind luftgekühlt. Durch eine kontrollierte Gehäusekühlung wird das Spitzenspiel zwischen Rotorschaufeln und Gehäuse trotz unterschiedlicher Leistungen in einem engen Bereich gehalten.

⓫ Low Pressure Turbine LPT

Die Niederdruckturbine (N1) ist eine vierstufige Axialturbine. Die Statorschaufeln der 1. Stufe sind luftgekühlt. Das Gehäuse wird mit Fan-Luft gekühlt, um das Rotorblatt-Spitzenspiel zu beeinflussen.

⓬ Fan-Thrust-Reverser

Der Fan Schubumkehrer ist in der Triebwerksverkleidung untergebracht und wird hydraulisch betätigt.

⓭ Fan Exhaust Nozzle
⓮ Core Exhaust Nozzle
⓯ Engine Exhaust Cone

Legende 1 zu Abbildung 6

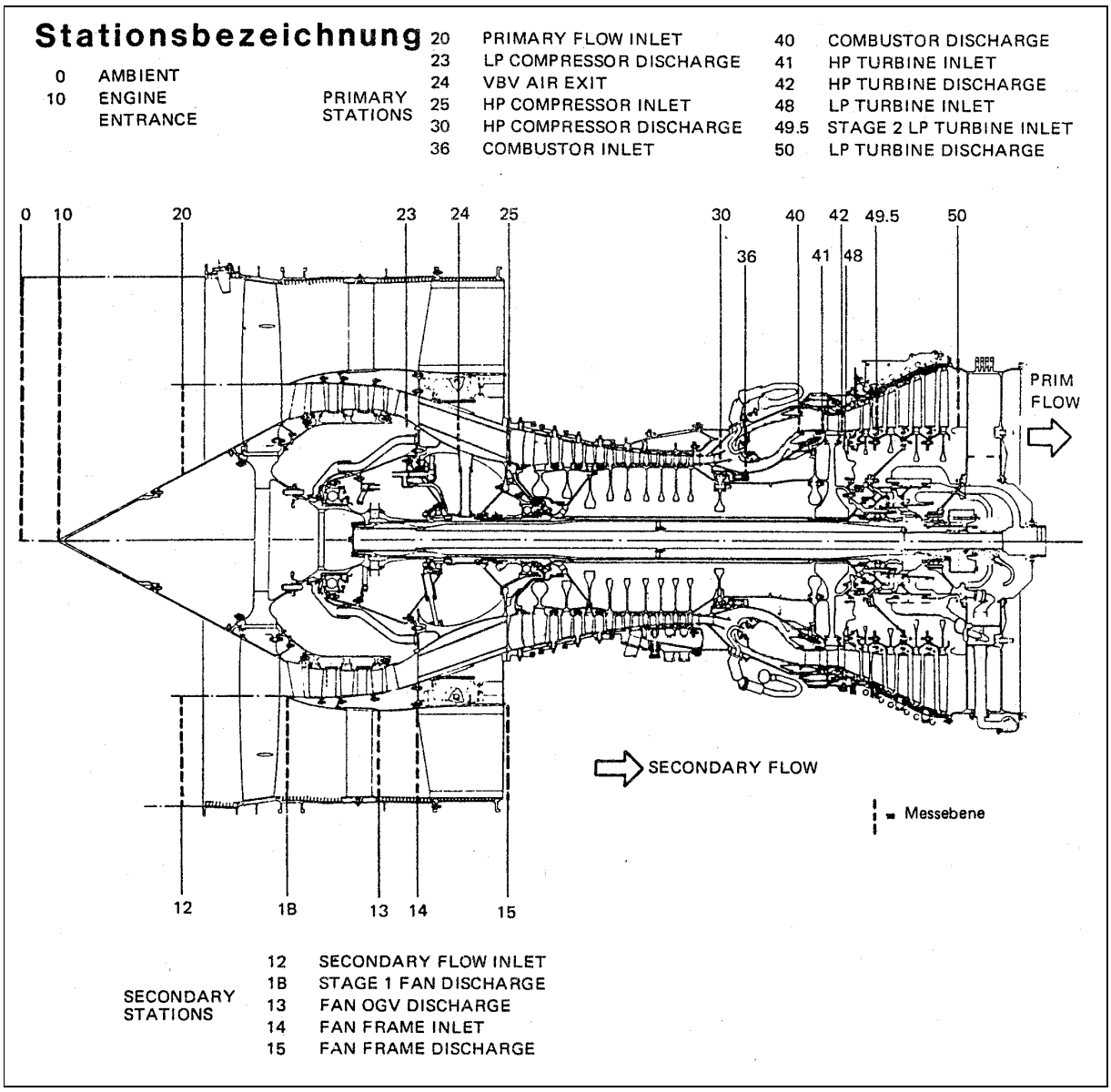


Abbildung 7: Stationen innerhalb des Triebwerks CFM 56 -3

Tabelle 4: In der ICAO-Datenbank werden folgende Emissionsdaten für den Triebwerkstyp CFM56-3-B1 angegeben.

Unique ID Number:	CFM56-3-B1	By-Pass Ratio:	5,1
Engine Identification:	1CM004	Pressure Ratio:	22,4
Engine Typ:	TF	Rated Output (kN):	89,41
DATA TYPE		Revised (see remarks)	
DATA SOURCE		Newly Manufactured Engine	
EMISSIONS DATA		Corrected for Ambient Effects	

Mode *)	Power Setting ($\%F_{00}$)	Time min	Fuel Flow kg/s	HC g/kg	CO g/kg	Nox g/kg	Smoke Number
Take-off	100	0,7	0,946	0,04	0,9	17,7	4,0
Climb out	85	2,2	0,792	0,05	0,95	15,5	2,5
Approach	30	4,0	0,290	0,08	3,8	8,3	2,5
Idle	7	26,0	0,114	2,28	34,4	3,9	2,2
Number	of Tests			3	3	3	3
Number	of Engines			1	1	1	1
D_p/F_{00}	(Average)	(g/kN) or	SN (Max)	4,67	72,9	40,3	4,0
D_p/F_{00}	(g/kN) or	SN	(Sigma)	0,53	5,1	0,8	0,6
D_p/F_{00}	(g/kN) or	SN	Range	4,17-5,22	68,5-78,5	39,4-41,2	3,4-4,5

*) Die angegebenen Modi sind nicht genormt, sie können im Vergleich mit anderen Tests in Prüfständen unterschiedliche Power-Settings zur Folge haben.

ACCESSORY LOADS

Power Extraction:	0 (kW)	AT:	- Power Settings (s)
Stage Bleed:	0 % Core Flow	AT:	- Power Setting

ATMOSPHERIC CONDITIONS

Pressure	kPa	95,98-97,49
Temperature	°C	6 to 13
Abs Humidity	kg/kg	.002 - .009

FUEL

Spec	N/C	Arom (%)
Jet A	1.93	16,0

Manufacturer:	CFMI
Test Organization:	CFM56 Evaluation Engineering
Test Location:	Peebles Site IVD
Test Dates:	**From 11.Nov. 83 to 14.Nov. 83**
Remarks:	1. Ref GE Report R84AEB245 2. Engine SN 692441 3. Revised based on 3/89 production cycle

Tabelle 5: In der ICAO-Datenbank werden folgende Emissionsdaten für den Triebwerkstyp CFM56-3-B2 angegeben.

Unique ID Number:	CFM56-3-B2	By-Pass Ratio:	5,1
Engine Identification:	1CM005	Pressure Ratio:	24,1
Engine Typ:	TF	Rated Output (kN):	98,30
DATA TYPE		Revised (see remarks)	
DATA SOURCE		Newly Manufactured Engine	
EMISSIONS DATA		Corrected for Ambient Effects	

Mode *)	Power Setting ($\%F_{00}$)	Time min	Fuel Flow kg/s	HC g/kg	CO g/kg	No_x g/kg	Smoke Number
Take-off	100	0,7	1,056	0,036	0,9	19,4	6,0
Climb out	85	2,2	0,878	0,047	0,9	16,7	3,0
Approach	30	4,0	0,314	0,073	3,4	8,7	2,5
Idle	7	26,0	0,119	1,75	30,1	4,1	2,2
Number	of Tests			3	3	3	3
Number	of Engines			1	1	1	1
D_p/F_{00}	(Average)	(g/kN) or	SN (Max)	3,44	61,0	42,9	6,0
D_p/F_{00}	(g/kN) or	SN	(Sigma)	0,37	3,8	0,81	0,8
D_p/F_{00}	(g/kN) or	SN	Range	3,01-3,67	57,6-65,1	42,4-43,9	5,4-6,9

*) Die angegebenen Modi sind nicht genormt, sie können im Vergleich mit anderen Tests in Prüfständen unterschiedliche Power-Settings zur Folge haben.

ACCESSORY LOADS

Power Extraction:	0 (kW)	AT:	- Power Settings (s)
Stage Bleed:	0 % Core Flow	AT:	- Power Setting

ATMOSPHERIC CONDITIONS

Pressure	kPa	95,98-97,49
Temperature	°C	6 to 13
Abs Humidity	kg/kg	.002 - .009

FUEL

Spec	N/C	Arom (%)
Jet A	1.93	16,0

Manufacturer:	CFMI
Test Organization:	CFM56 Evaluation Engineering
Test Location:	Peebles Site IVD
Test Dates:	**From 11.Nov. 83 to 14.Nov. 83**
Remarks:	1. Ref GE Report R84AEB245 2. Engine SN 692441 3. Revised based on 3/89 production cycle

Tabelle 6: In der ICAO-Datenbank werden folgende Emissionsdaten für den Triebwerkstyp CFM56-3-C1 angegeben.

Unique ID Number:	CFM56-3-C	By-Pass Ratio:	5,1
Engine Identification:	1CM006	Pressure Ratio:	21,3
Engine Typ:	TF	Rated Output (kN):	82,29
DATA TYPE		Revised (see remarks)	
DATA SOURCE		Newly Manufactured Engine	
EMISSIONS DATA		Corrected for Ambient Effects	

Mode *)	Power Setting ($\%F_{00}$)	Time min	Fuel Flow kg/s	HC g/kg	CO g/kg	No_x g/kg	Smoke Number
Take-off	100	0,7	0,872	0,05	0,9	16,6	3,0
Climb out	85	2,2	0,732	0,05	1,0	14,7	2,4
Approach	30	4,0	0,273	0,08	4,2	8,0	2,5
Idle	7	26,0	0,111	2,86	38,1	3,8	2,1
Number of Tests				3	3	3	3
Number of Engines				1	1	1	1
D_p/F_{00} (Average) (g/kN) or SN (Max)				6,18	85,2	39,0	3,0
D_p/F_{00} (g/kN) or SN (Sigma)				1,05	6,4	0,78	0,4
D_p/F_{00} (g/kN) or SN Range				5,47-7,38	79,7-92,2	38,2-40,0	2,5-3,2

*) Die angegebenen Modi sind nicht genormt, sie können im Vergleich mit anderen Tests in Prüfständen unterschiedliche Power-Settings zur Folge haben.

ACCESSORY LOADS

Power Extraction:	0 (kW)	AT:	- Power Settings (s)
Stage Bleed:	0 % Core Flow	AT:	- Power Setting

ATMOSPHERIC CONDITIONS

Pressure	kPa	95,98-97,49
Temperature	°C	6 to 13
Abs Humidity	kg/kg	.002 - .009

FUEL

Spec	N/C	Arom (%)
Jet A	1.93	16,0

Manufacturer:	CFMI
Test Organization:	CFM56 Evaluation Engineering
Test Location:	Peebles Site IVD
Test Dates:	**From 11.Nov. 83 to 14.Nov. 83**
Remarks:	1. Ref GE Report R84AEB579 2. Engine SN 692441 3. Revised based on 3/89 production cycle

10.3 TEST-PROCEDURES

Nachdem das Triebwerk werkstattseitig gewartet bzw. repariert wurde, werden in einem anschließenden Testlauf vorgegebene Spezifikationen überprüft. Hierbei lassen die Hersteller der Triebwerke die Möglichkeit zu, sich je nach Umfang der durchgeführten Reparatur/Wartung auf bestimmte Testlaufabschnitte zu beschränken.. Diese Test-Procedures sind nicht zwangsläufig mit den Testläufen der ICAO identisch.

Im wesentlichen werden vier Betriebszustände (Modi) des Triebwerkes überprüft, die mit T/O (Take Off), M/C (Maximum Continuous), Idle und Approach- (Flight-) Idle bezeichnet werden. Diese Modi sind nicht genormt, so daß den v.g. Begriffen kein bestimmter stationärer Zustand zugeordnet werden kann. Die verschiedenen Hersteller verknüpfen diese Modi demzufolge auch mit unterschiedlichen Power-Settings.

An dem im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Prüfstand (siehe Abschn. 10.1) wird zum Erreichen eines Betriebszustandes eine im Manual des Herstellers vorgegebene Drehzahl des N1-Systems angefahren. Diese wird hier mit 100% gleichgesetzt (hier kann bereits ein Unterschied zu der mit 100% bezeichneten Leistung im ICAO-Test auftreten). Ebenso wird bei der Leistungsstufe Max. Cont. verfahren. Da das N1-System den größten Einfluß auf die Schuberzeugung hat, wird in diesen Leistungsstufen eine Schubmessung nach dem jeweiligen Anfahren der N1-Drehzahl vorgenommen. Anders gestaltet sich der Test bei den Laststufen Idle und Approach Idle. Da hierbei ein stabiler Leerlauf erzielt werden soll, wird hierbei die für die Verbrennung wichtigere N2-Drehzahl gemäß Manual angefahren. Hierbei soll das Triebwerk möglichst wenig Schub erzeugen. Es gibt für diese Leistungsstufen keine Grenzwerte und eine Übertragung der Meßwerte für Schub und Kraftstoffverbrauch aus der Datenerfassungsanlage des Prüfstandes in die Datenbank erfolgt nur in Ausnahmefällen.

Die Vorgehensweise bei den Tests, die in der ICOA-Datenbank beschrieben sind, weicht z.T. erheblich von den im Manual der Triebwerkshersteller beschriebenen und den im Rahmen dieser Arbeit meßtechnisch erfaßten (und von den Triebwerkherstellern der jeweiligen Airline verbindlich vorgegebenen) Prüfprozeduren ab. Take Off entspricht im ICAO-Test einem Power Setting von 100% Schub (dies entspricht jedoch nicht der vorgeschriebenen N1-Drehzahl). Ähnlich verhält es sich bei den Betriebszuständen Climb Out (85%) Idle (7%) und Approach Idle (30%).

Um eine direkte Vergleichbarkeit von insbesondere Leistungsdaten, Kraftstoffverbrauchsdaten und schließlich den erzeugten Emissionen luftfremder Stoffe herbeiführen zu können, wird eine Normung von Begriffen und Daten für <u>dringend erforderlich gehalten</u>!

Mit der hier vorgelegten Arbeit wird eine einschlägige Normung angeregt.

Der gesamte Verlauf der Testprozeduren ist in den nachfolgenden Grafiken dargestellt. Die Durchführung der jeweiligen Emissionsmessungen erfolgte überwiegend über die Dauer eines kompletten Testzyklus. Anhand einiger Zyklen wurde versucht, schwerpunktmäßig jeweils bestimmte Lastzustände diskret zu beproben, um mögliche Unterschiede im Emissionsverhalten der Triebwerke zu erkennen. In der Ergebnisdarstellung wird hierauf besonders hingewiesen, wenn insbesondere signifikante Emissionsmuster hierin begründet sind.

Die Abbildung 8 zeigt einen typischen Testlauf für die Triebwerke CF6-50 C2 und CF6-50 E2. Während der einzelnen Testphasen werden verschiedene Checks durchgeführt, so z.B. Oil Level Check, Accel Check, Reverse Power, Filter check, Leak check. Werden bei den jeweiligen Prüfroutinen Abweichungen von den Vorgaben festgestellt, so hat dies naturgemäß einen Einfluß auf den weiteren Prüfablauf. Insofern stellen die an dieser Stelle dargestellten Testprozeduren den Idealfall dar. Hieraus läßt sich andererseits ableiten, daß Variationen in

der quantitativen Abgaszusammensetzung bezogen auf die zu ermittelnden organisch-chemischen Verbindungen auch dadurch beeinflußt werden können, daß nicht jeder Testlauf identisch mit dem vorhergehenden oder dem nächsten Testlauf sein wird.

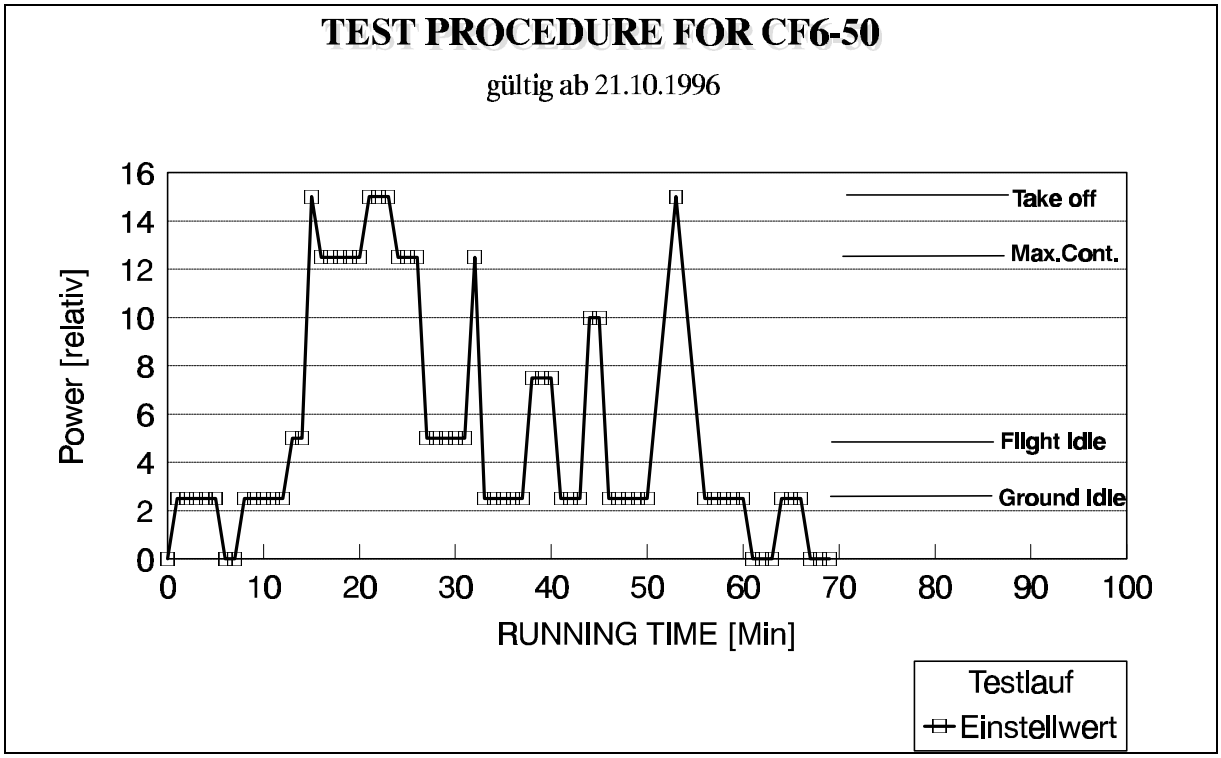


Abbildung 8: Test-Procedure for CF6-50

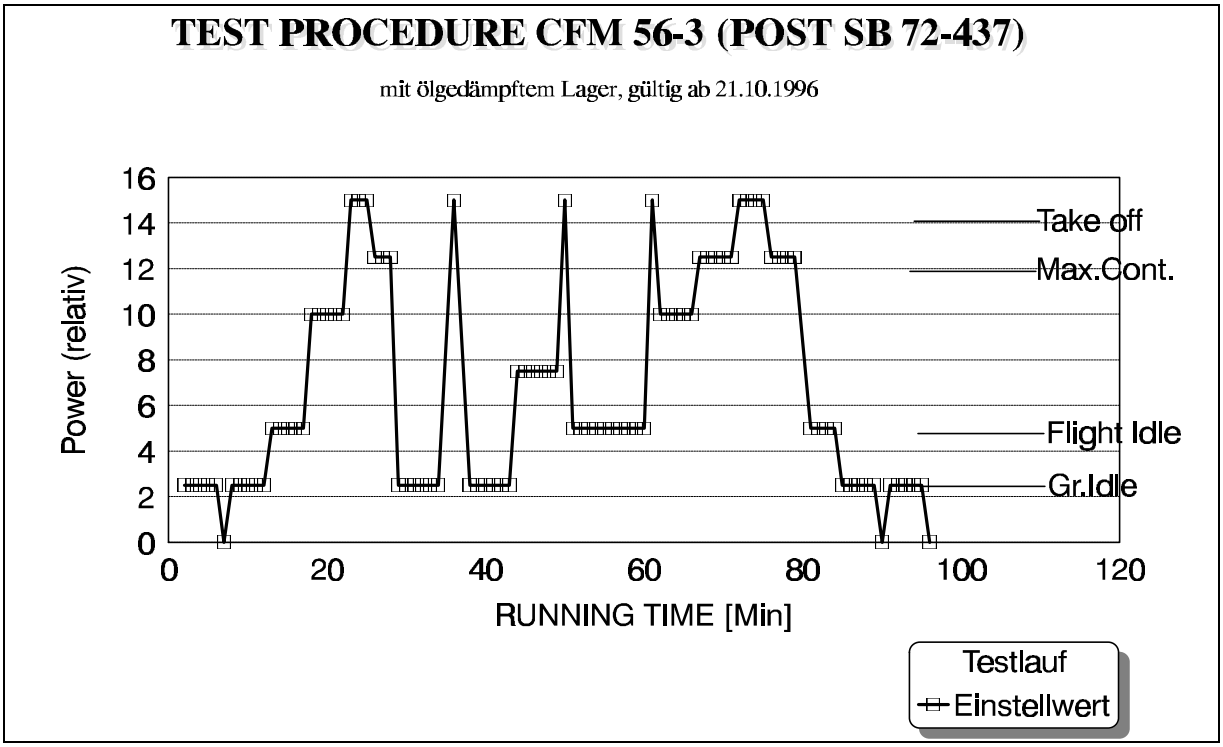


Abbildung 9: Test Procedure for CFM56-3 (Post SB 72-437)

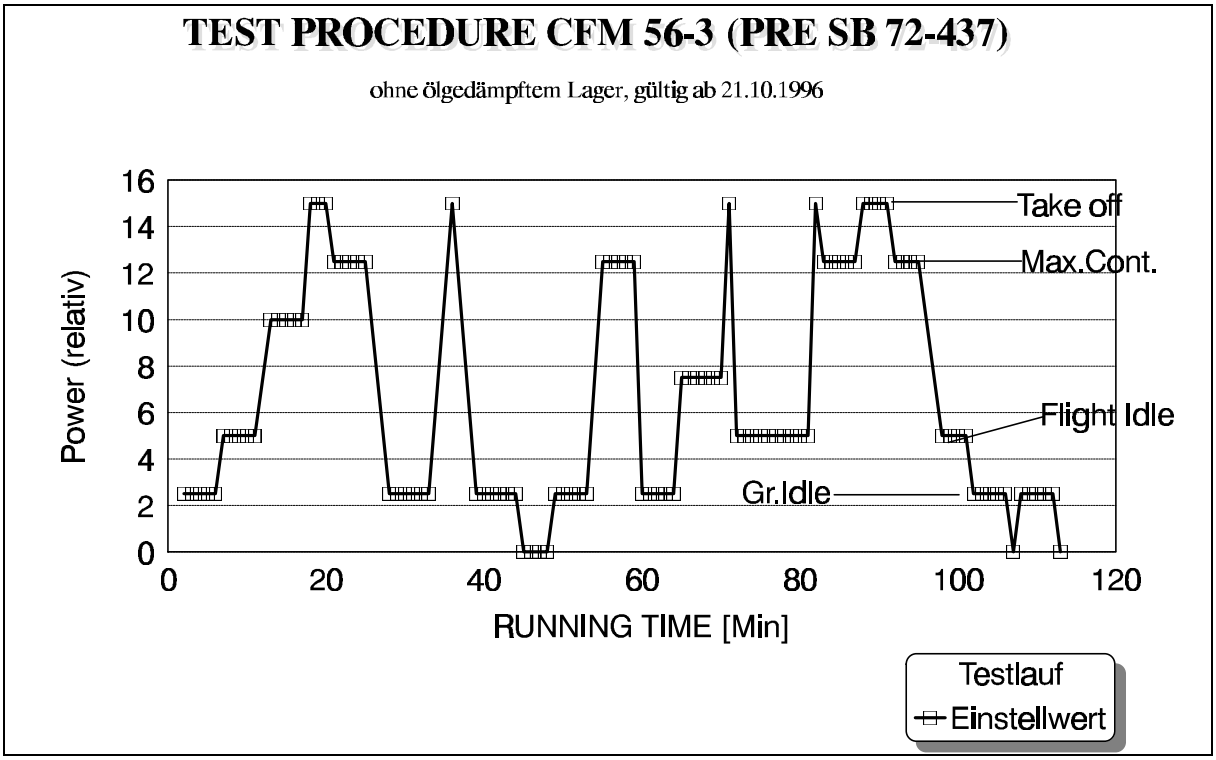


Abbildung 10: Test Procedure for CFM 56-3 (Pre SB 72-437)

10.4 Für die Prüfprozedur eingesetzter Kraftstoff

Spezifikation des bei den Prüfläufen eingesetzten Treibstoffes Jet A-1

Tabelle 7: Commercial Specifications; ASTM and IATA Recommendations

	Issuring Agency: **Specification:** **Latest Revision Date:** **Grade Designation:** **Fuel Type:**	**ASTM** **D1655-88a** **1988** **JetA/A-1** **Kerosene**	**IATA** **Guidance** **Mat.** **14.11.1988** **Kerosene**	**Test Method** **ASTM**
COMPOSITION	Acidity, Total (mgKOH/g)	0,1	0,015	D974,D3242
	Aromatics (vol%)	20	20	D1319
	Olefins (vol%)		5	D1319
	Sulfur,Mercaptan (wt%)	0,003	0,003	D3227
	Sulfur, Total (wt%)	0,3	0,3	D1266,D2785 D2622
VOLATILITY	Distillation Init.BP (°C)		Rpt	
	Temp. 10% Rec (°C)	205	204	D86
	20% Rec (°C)		Rpt	
	50% Rec (°C)	Rpt	Rpt	
	90% Rec (°C)	Rpt	Rpt	
	Final BP	300	300	
	Residue (vol%)	1,5	1,5	
	Loss (vol%)	1,5	1,5	

	Issuring Agency: Specification: Latest Revision Date: Grade Designation: Fuel Type:	ASTM D1655-88a 1988 JetA/A-1 Kerosene	IATA Guidance Mat. 14.11.1988 Kerosene	Test Method ASTM
	Flash Point (°C)	38	38	D56/D3828
	Density 15°C, kg/m^3	775-840	775-840	D1298/D4052
	Vapor Pressure 38°C			
FLUIDITY	Freezing Point (°C)	-40	-47	D2386
	Viscosity @ -20°C(mm^2/s)	8,0	8	D445
COMBUSTION	Net Heat of Comb.(MJ/kg)	42,8	42,8	D4529/D3338
	Luminometer No.	45	45	D1740
	Smoke Point (mm)	25	25	D1322
	Naphthalenes (vol%)	3	3	D1840
CORROSION	Copper Strip 2h @100°C	1	1	D130
	Silver Strip 4h @ 50°C		1	
STABILITY	JFTOT ΔP (mmHg)	25	25	D3241
	Tube Color Code	<3	<3	
CONTAMINANTS	Existent Gum (mg/100ml)	7	7	D381
	Particulates (mg/l)			D2276
	Water Reaction Interface	1b	1b	D1094
	Water Reaction Separaton	2	2	
	WSIM			D2550/D3602
ADDITIVES	Anti-Icing	Agreement		
	Antioxidant	Option	Option	
	Corrosion Inhibitor	Agreement	Agreement	
	Metal Deactivator	Option	Option	
	Static Dissipator	Agreement	Agreement	
OTHER	Conductivity (pS/m)	50-450	50-450	D2624/D4308

Für die meßtechnisch erfaßten Prüfläufe wurde Kerosin der Qualität JET A1, Gefahrenklasse AII mit **einem spezifischen Gewicht von 0,81 kg/l** verwendet.

Die quantitative und qualitative Zusammensetzung des bei den einzelnen Prüfläufen der jeweiligen meßtechnisch erfaßten Triebwerke eingesetzen Kerosins ist in Kapitel 3 Abschnitt 20 wiedergegeben. In Abschnitt 12.1.7 dieses Kapitels wird die Methodik der Kerosinanalytik detailliert beschrieben.

11 PROBENAHMEMODALITÄTEN FÜR DIE DISKONTINUIERLICHE MESSUNG

Wie in Kapitel 1 Abschnitt 8 bereits angedeutet, sind im Zusammenhang mit der Probenahme partikel- und gasförmiger Abgasbestandteile besondere Anforderungen zu erfüllen.

Eine elementare Anforderung stellt zum einen die möglichst querschnittsintegrierende Probenahme (Netzmessung) und zum anderen für partikelförmige Abgasinhaltsstoffe die isokinetische sowie für gasförmige Abgasinhaltsstoffe die geschwindigkeits- bzw. die massenproportionale Probenahme dar.

Wie in Abschnitt 8, Kap.1 näher beschrieben, war der zur Beprobung strömungstechnisch weitgehend als unkritisch für die Prüfläufe anzusehende Meßquerschnitt an der dem zu prüfenden Triebwerk gegenüberliegenden Stirnseite des Prüfstandes angeordnet.

Diese Lösung, die die kompromisshaltigste darstellt, führte über die nähere Untersuchung von vier möglichen Varianten

1. Probenahme am direkten Austritt der Abgase aus dem Triebwerk
2. Probenahme in einer Entfernung von ca. 30 Metern hinter dem Triebwerk nach Zusammenführung des Bypass-Stromes mit den Triebwerksabgasen
   a) Probenahme am Ende des schallgedämmten Prüfstandkanales
   b) Probenahme am Kopf des Betonkamines an der Übertrittsstelle in die Atmosphäre
   c) Probenahme an der dem zu prüfenden Triebwerk gegenüberliegenden Stirnfläche des Prüfstandkanales

Die **Variante 1** schied aufgrund der in Abschnitt 8.1 getroffenen Annahme einer nicht auszuschließenden Reaktivität verschiedener Abgasbestandteile aus.

Entsprechend der **Variante 2 a)** war es zunächst geplant, direkt am Austritt des schallgedämmten Prüfstandkanales und direkt hinter der Diffusorstrecke und Eintritt in das “Rieselrohr” ein Meßachsenkreuz mit insgesamt 16 Entnahmepunkten sowie jeweils 16 Temperatur- und Abgasgeschwindigkeitsmeßstellen zu installieren(siehe Abb. 11). Hierbei wurden alle Abgasprobenrohre, Differenzdruckleitungen und Meßleitungen hinter einem ausreichend dimensionierten Edelstahlwinkel schützend verdeckt (siehe auch Abb. 13). Bei dieser, aus probenahmetechnischer Sicht als optimal anzusehenden Lösung hätte jedoch, bedingt durch die beim Prüfbetrieb auftretenden sehr hohen Abgasmengen und damit verbundenen “Windlasten”, denen ein entsprechendes festinstalliertes Probenahmesystem ausgesetzt ist, eine aus statischer Sicht verstärkte Ausführung zum Einsatz kommen müssen. Ein solches Probenahmesystem hätte den freien Querschnitt des Prüfstandkanales um knapp 2 m^2, d.h. ca. 12 v.H. eingeschnürt. Da wie bereits erwähnt wurde, der Prüfbetrieb bei bestimmten Triebwerken an der Leistungsgrenze des Prüfstandes betrieben wird und der sich durch die vorerwähnten Einbauten aufbauende Rückstau negativ auf die zu prüfenden Triebwerke auswirken konnte (z.B. fehlerhafte Schubmessung), mußte diese Variante, einer an und für sich optimalen, alle probenahmetechnischen Voraussetzungen erfüllenden Probeentnahmeeinrichtung leider verworfen werden.

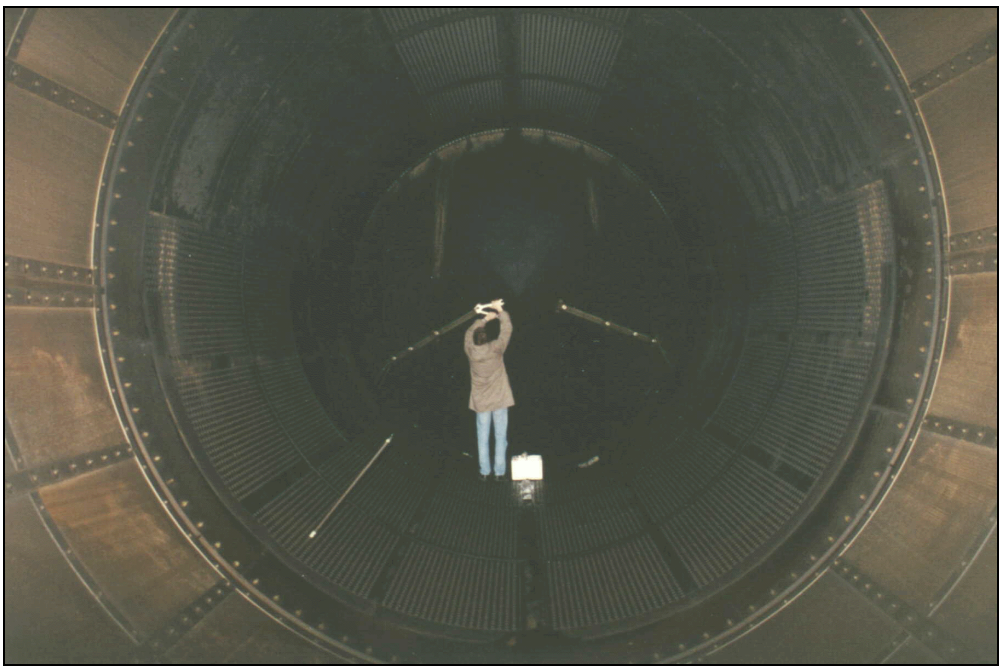


Abbildung 11: Variante 2a) zum Festeinbau einer Probenentnahmevorrichtung

Die **Variante 2 b)** legt zugrunde, die Abgasproben durch Probenahme am Kopf des Betonkamines (siehe Abb.12) an der Übertrittsstelle in die Atmosphäre zu entnehmen.

Abbildung 12: Variante 2b) zum Festeinbau einer Probenentnahmevorrichtung

Die lichte Weite des Betonkanales beträgt ca. 7 m x 6,7 m, die Querschnittsfläche somit ca. 47 m^2. Die Mindestauslegung eines Meßquerschnittes mit Entnahmepunkten gemäß Richtlinie VDI 2066 Bl.1 wäre mit 20 Meßpunkten sicherlich unterdimensioniert, da auf ca. 2,4 m^2 lediglich ein Meßpunkt entfallen würde. Die Belegung des Meßquerschnittes mit mehr als 20 Meßpunkten bzw. Entnahmestellen hätte den Aufwand einer Tragkonstruktion zum Festein-

bau der Entnahmesonden überproportional und damit unverhältnismäßig erhöht. Zudem wäre es erforderlich geworden, den Betonkanal von drei Seiten über eine Höhe von jeweils 10 m für die Laufzeit der gesamten Untersuchungen einzurüsten. Auch dies wäre aus rein ökonomischer Sicht nicht zu vertreten gewesen. Angesichts der selbst an diesem potentiellen Meßquerschnitt auftretenden hohen Abgasgeschwindigkeiten wäre der Einfluß von die Messungen negativ beeinflussenden Querströmungen der umgebenden Atmosphäre nicht von Belang.

Vorwiegend begründet durch den ökonomischen Aufwand, den diese Variante mit sich gebracht hätte, wurde diese Alternative verworfen.

11.1 Eingesetzte Probenahmesonden

Damit blieb mit der **Variante 2c)**, als Probenahme an der dem zu prüfenden Triebwerk gegenüberliegenden Stirnfläche des Prüfstandkanales, eine Alternative, die insbesondere strömungstechnisch hinsichtlich der Probenentnahme einen deutlichen Kompromiß darstellt.

An der der Triebwerksaufhängung gegenüberliegenden Stirnwand des Prüfkanales befindet sich ein Aufprallkegel mit einer Grundfläche von ca. 16 m^2 und einer Kegelhöhe von ca. 1,2 m. Die auf den Kegel mit hoher Geschwindigkeit auftreffenden Abgase der Triebwerke werden nach allen Seiten durch ein Siebtrommelrohr (Rieselrohr) nach außen in einen Betonschacht gedrückt, über den sie in einer Höhe von ca. 10 m in die Atmosphäre gelangen.

Auf der Kegeloberfläche wurden auf zwei Halbachsen insgesamt 8 Meßpunkte (Entnahmestellen) auf den Schwerelinien flächengleicher Kreisringe angebracht. Die Probenahmesondenköpfe sind unter Berücksichtigung des Kegelwinkels parallel zur Richtung der Anströmung ausgerichtet. Die Bauform der Probenahmesondenköpfe entspricht den in der Richtlinie VDI 2066 Bl. 2[20] beschriebenen Filterköpfen. In unmittelbarer Nähe zu jedem Probenahmepunkt wird die Temperatur des Abgases gemessen. Mit dieser Anordnung der Meßpunkte wird die Abgasquerschnittsfläche statistisch mit einem Meßpunkt je ca. 2 m^2 beprobt. Hierin wird ein vertretbares Meßnetz gesehen. Eine ähnliche Verteilung von Meßpunkten bezogen auf die zu betrachtende Meßquerschnittsfläche wird z.B. im Zusammenhang mit der Bundeseinheitlichen Praxis[21] bei der Überwachung von Verbrennungsbedingungen an Anlagen der 17. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz als geeignet angesehen.

Jede Probeentnahmestelle im Meßquerschnitt ist mit einer eigenen Probengasleitung (Durchmesser 10 x 1mm = 8mm freier Durchgang) verbunden. Alle probengasführenden Rohre innerhalb des o.e. Betonschachtes sind aus unlegiertem Titan gefertigt. Die Rohre sind durch ein Edelstahl-U-Profil, welches direkt auf den Aufprallkegel aufgeschweißt wurde oder durch ausreichend dimensionierte Edelstahlschutzrohre vor den hohen Belastungen der Anströmung geschützt. In den U-Profilen bzw. Stahlrohren sind ebenso die Meßleitungen der Temperatur- und Abgasgeschwindigkeitsmeßeinrichtungen verlegt.

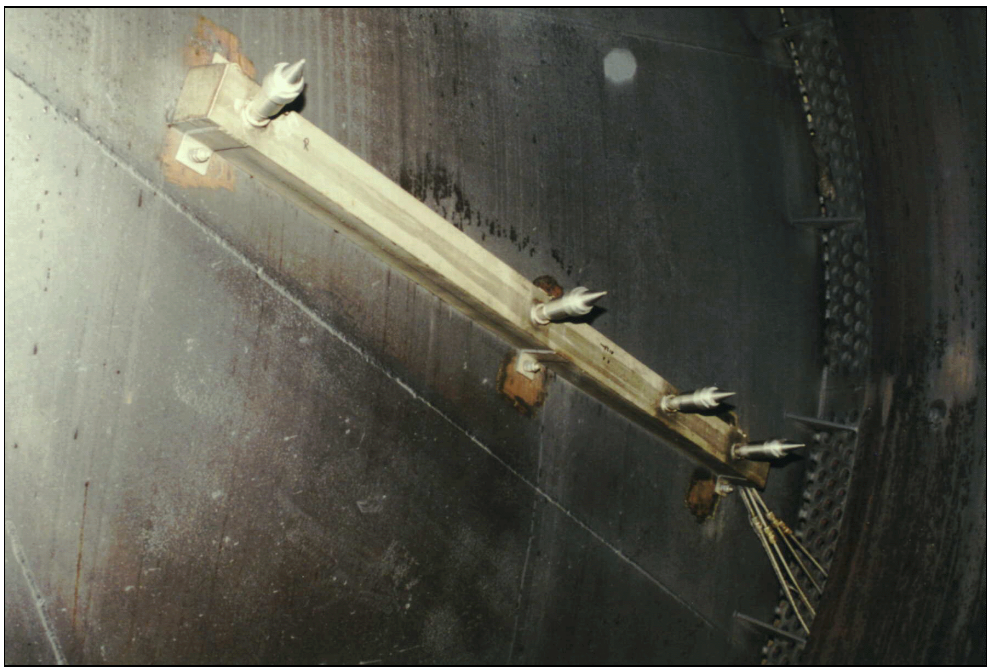


Abbildung 13: Variante 2c) zum Festeinbau einer Probenahmevorrichtung; realisierte Variante

Alle innerhalb des Betonschachtes verlegten Probegasrohre und Meßleitungen werden an einer zentralen Stelle aus dem Betonschacht herausgeführt. Innerhalb des Betonschachtes werden die Probegasrohre nicht beheizt, da alle Rohre innerhalb der Beprobungszeit durch die Abgase soweit aufgeheizt werden, daß Kondensationserscheinungen im Rohrinneren ausgeschlossen werden können.

Die 8 Probegasrohre werden außerhalb des Betonschachtes auf eine Temperatur von ca. 90°C beheizt und so einer eigens für diesen Probenahmezweck konstruierten Mischapparatur zugeführt.

11.2 Mischapparatur

Da während der Beprobung an dem betreffenden Prüfstand ein Versetzen der Probenahmesonden nicht realisiert werden kann, was letztendlich zum Festeinbau der beschriebenen Sondenkonstruktion führte, ist es nicht möglich, die sorptiv anzureichernden organisch-chemischen Verbindungen an jedem der 8 Probenahmepunkte im Meßquerschnitt den jeweils aktuellen Verteilungen entsprechend geschwindigkeits- bzw. massenproportional dem Abgasquerschnitt zu entnehmen.

Die auf <u>einen</u> Meßpunkt bezogene Konzentrationsermittlung eines zu bestimmenden Stoffes ist nicht von einem möglicherweise vorherrschenden Verteilungsgradienten des Stoffes innerhalb des Meßquerschnittes abhängig[22]. Da zudem die exakte Abgasgeschwingigkeitsverteilung über den Meßquerschnitt an dem gewählten Ort nach Variante 2c) nicht mit hinreichender Genauigkeit bestimmbar ist, erscheint es nicht sinnvoll, eine zeitgleich geschwindigkeitsgewichtete Entnahme der Proben an den 8 Probenahmestellen im Meßquerschnitt durchzuführen. Es wird somit als durchaus vertretbar angesehen, die 8 zu entnehmenden Probeneinzelteilvolumen-ströme vor der Anreicherung der organisch-chemischen Abgasinhaltsstoffe in einer speziellen Mischapparatur homogen zu mischen.

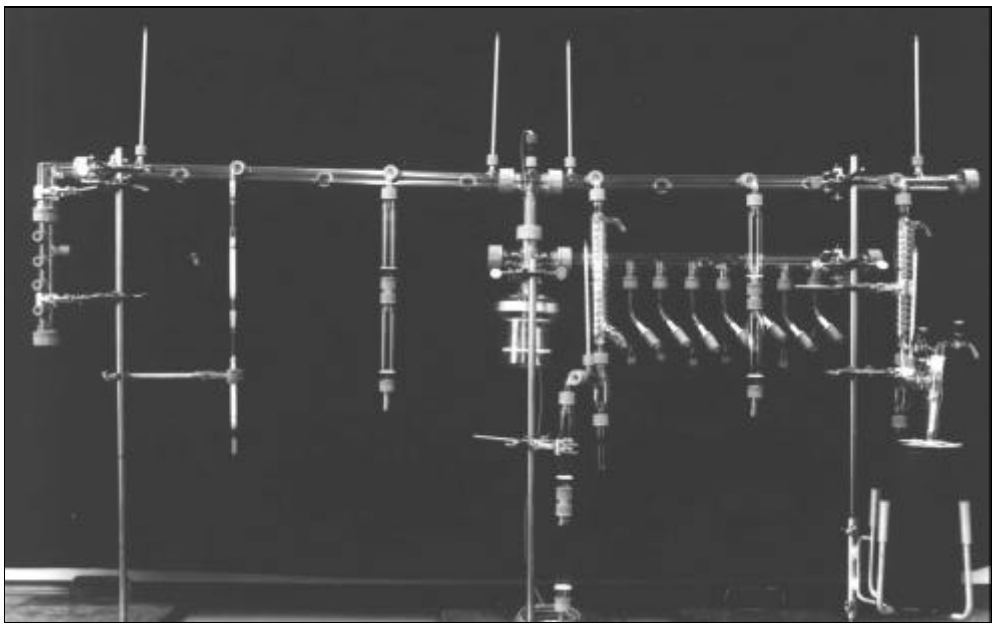


Abbildung 14: Mischapparatur zum homogenen Mischen von Proben-Teilgasströmen (Laboraufbau)

Die hierbei verwendete Mischapparatur (Abb. 14) wurde eigens für diese Untersuchungen entwickelt.

Über 8 regelbare Einlaßventile gelangt das Abgas aus dem Triebwerkprüfstand zunächst in ein Sammelrohr und von dort über eine Glasfritte in eine Mischkammer. Bei der Mischkammer handelt es sich um einen statischen Mischer, an dessen oberem Ende das Abgas in ein Verteilerrohr gelangt. An dem Verteilerrohr befinden sich standardmäßig 10 verschließbare Abgänge, an denen unterschiedliche Sorptionseinrichtungen adaptiert werden können. Durch Anflanschen von Erweiterungsrohren läßt sich die Zahl der verschließbaren Abgänge erhöhen. Am Ende des Verteilerrohres ist die Möglichkeit gegeben, Probengas für die kontinuierlich registrierende Meßtechnik abzuziehen.

An der Mischapparatur ist darüberhinaus die Möglichkeit gegeben, einerseits die Apparatur selbst mit Inertgas zu spülen und andererseits eine rückwärts gerichtete Inertgasspülung des gesamten Probenahmesystems bis hin zu den Probenahmeköpfen durchzuführen. Dies hat sich nicht nur als zweckmäßig, sondern als notwendig erwiesen, um insbesondere einen eindeutigen Probenahmebeginn definieren zu können.

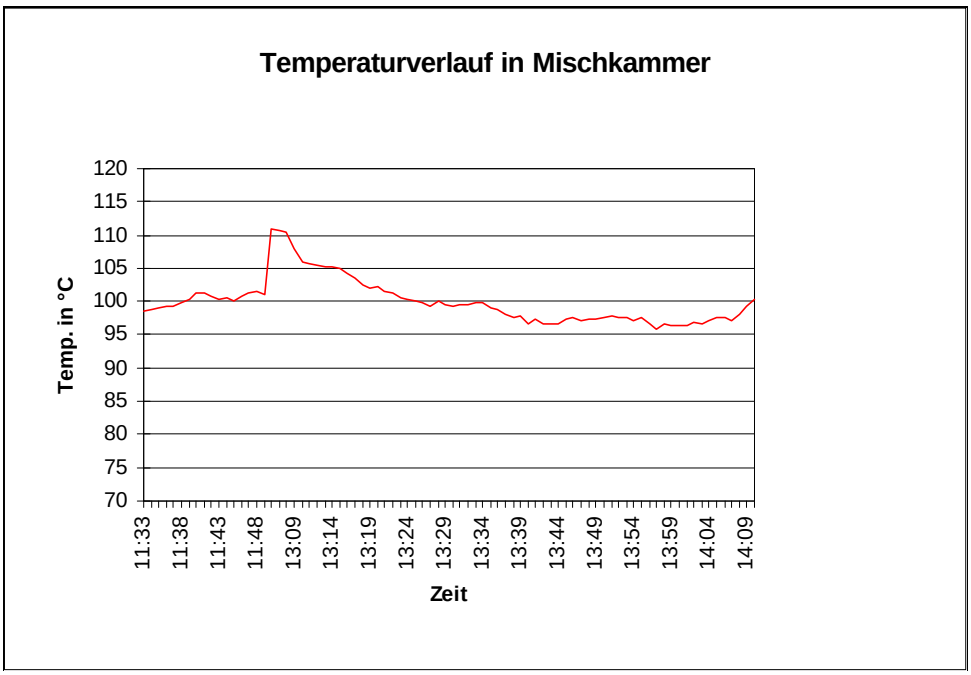


Abbildung 15: Temperaturverlauf in der Mischapparatur während eines kompletten Prüflaufes

Es hat sich in diesem Zusammenhang herausgestellt, daß es beim Anlassen der Triebwerke zu geringfügigen, von Triebwerktyp abhängigen Zündverzögerungen (ca. 2 bis 20 s) kommt. Während dieser Phase kann z.B. unverbranntes Kerosin in die Probenahmeapparatur gelangen. Um dieses zu verhindern, wird sowohl die Mischkammer als auch das der Mischkammer vorgeschaltete Probenahmesystem solange mit Inertgas gespült (300 bis 600 l/h), bis das Triebwerk „rund“ läuft. Sodann wird über beide Enden der von der Mischkammer abgehenden Verteilerrohre ein Volumenstrom von insgesamt ca. 750 l/h abgesaugt. Das Volumen des gesamten Beprobungssystems beträgt ca. 8,1 l. Unter Berücksichtigung der über die an die Verteilerrohre der Mischkammer angeflanschten Sorptionseinrichtungen abgesaugten Proben-Teilvolumenströme von zusätzlich insgesamt ca. 250 l/h (Summe ca. 1000 l/h), beträgt die Gaswechselrate (Totzeit der Beprobungseinrichtung) in der gesamten Beprobungseinrichtung ca. 30 s. Die Totzeit der Beprobungseinrichtung wird bei der Beprobung einzelner Lastzustände berücksichtigt. Die gesamte Mischapparatur wird während der Beprobung so betrieben, daß das die Apparatur durchströmende Abgas konstant eine Temperatur von >95 °C annimmt. Abb. 15 zeigt den Temperaturverlauf in der Mischkammer während eines komplett beprobten Prüflaufes.

11.3 Sorptionseinrichtungen

Bei der diskontinuierlichen Probenahme organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von Flugzeugtriebwerken wurde verfahrensseitig unterstellt, daß der überwiegende Anteil der betreffenden Verbindungen sich durch vorangegangene sorptive Anreicherung qualitativ und quantitativ ermitteln läßt.

Nach einem Aufsatz von Stumpf und Blazowski[23] basierten Untersuchungen der School of Aerospace Medicine -SAM - auf der Abscheidung organisch-chemischer Verbindungen aus dem Abgas von Triebwerken bei tiefen Temperaturen (0 °C, -78 °C, -175 °C).

In Abhängigkeit von unterschiedlichen eingesetzten Treibstoffen und Lastzuständen werden jedoch lediglich Summenangaben zu verschiedenen Verbindungsgruppen gemacht.

Auf der Basis dieses Hinweises wurden mit Hilfe eines an die in Abschnitt 11.2 beschriebene Mischapparatur adaptierten Tieftemperatursorptionssystems (TSS) nach Richtlinie VDI 2457 Bl. 3[24] Versuche zur quantitativen Abscheidung organisch-chemischer Verbindungen durchgeführt.

Die Abscheideapparatur (siehe Abb. 16) wurde mit Hilfe einer Kühlmischung von Propanol-2 und Trockeneis bei einer Temperatur von ca. -80 °C betrieben.

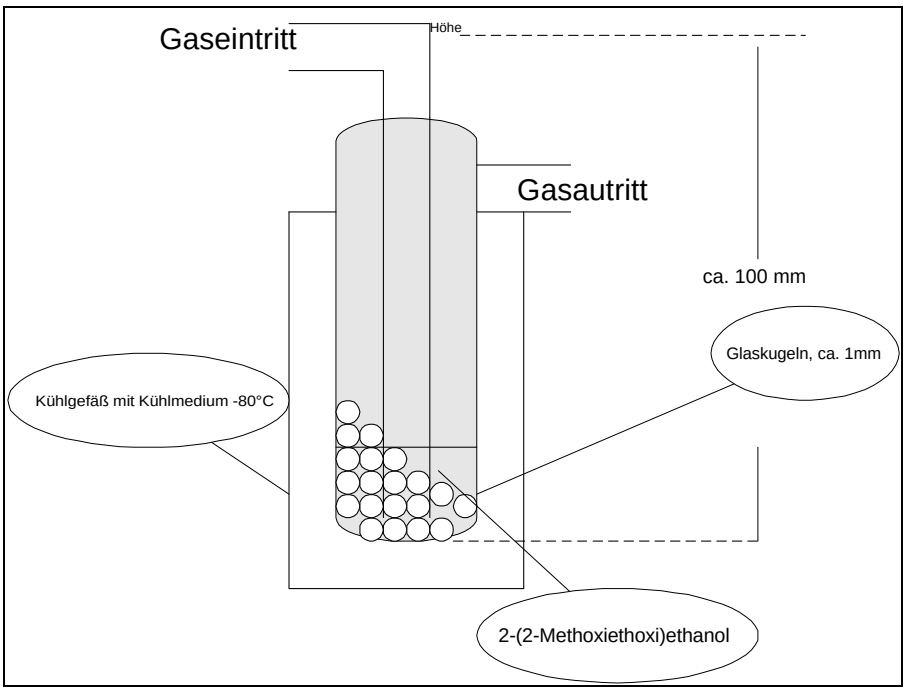


Abbildung 16: Schematische Darstellung einer Tieftemperatursorptionsvorrichtung gemäß VDI 2457 Bl. 2

Als Flüssigsorbens wird 2-(2-Methoxiethoxi)ethanol (DEGME) verwendet. Der Probengasdurchfluß durch die Sorptionseinrichtung beträgt 224 l/h und die Probenahmezeit deckt einen kompletten Triebwerkprüflauf von ca. 60 Minuten ab. Das Sorptionsmittel wurde unter dem Gesichtspunkt einer hohen Sorptionsfähigkeit für organisch-chemische Verbindungen ausgewählt. Nachteilig ist in diesem Zusammenhang der relativ hohe Aufwand zur Reinigung des Sorptionsmittels durch Destillation unter vermindertem Druck und Inertgasspülung.

Tabelle 8: Sorbens und absorbierte organisch-chemische Bestandteile des Abgases werden ohne weitere Aufarbeitung mittels GC/MS unter den nachfolgend genannten Bedingungen untersucht.

PARAMETER	
GC	HP 5890 Series II
MSD	HP 5871
Säule	SE 54-DF, 50m, id. 0,25mm Filmdicke 0,25µm Fa. Macherey Nagel
Trägergas	Helium
Injektortemperatur	250°C
Detektortemperatur	280°C
Ofenprogramm	Starttemperatur : 40°C Anfangszeit: 4 Min Rate 1: 30°C/Min auf 100°C, Haltezeit 2Min. Rate 2: 25°C/Min. auf 280°C, Haltezeit 7,8 Min.
Einspritzvolumen	3 µl, splitless

Das Ergebnis ist insofern unbefriedigend, da nicht ausgeschlossen werden kann, daß während der Beprobungszeit eventuell in der Probe vorliegende leicht flüchtige organische Verbindungen durch die erste Sorptionseinrichtung durchbrechen (Strip-Effekt) und eine Anreicherung nicht erfolgt. Die Chromatogramme zeigen, daß unter den o.g. Bedingungen innerhalb der ersten 9 Minuten eines Runs keine signifikanten Peaks festgestellt werden konnten. Allerdings ist nach Beurteilung der Chromatogramme zu vermuten, daß eine Anreicherung schwerer flüchtiger organischer Verbindungen in der zweiten Sorptionseinrichtung zwar erfolgt, ob diese allerdings vollständig verlaufen ist, kann nicht gesagt werden. Es wird aufgrund des Effektes zwischen der ersten und der zweiten Sorptionseinrichtung allerdings vermutet, daß auch hier die Absorption nur unvollständig verlaufen ist. Da schwerer flüchtige organische Verbindungen hinsichtlich der sich anschließenden Analytik besser an festen Sorbentien anzureichern sind, wurde die Anreicherungsmethode „Tieftemperatursorption“ im Rahmen der beschriebenen Untersuchungen nicht weiter verfolgt, da hierin keine reale Chance gesehen wurde Einzelsubstanzen, entsprechend der Aufgabenstellung, sicher zu identifizieren.

In diesem Kontext galt es zunächst eine Reihe von festen Sorbentien auf ihre mögliche Eignung zu untersuchen.

Tabelle 9: Untersuchte Sorbentien

SORBENS	LITERATURHINWEIS
XAD-2	25 26
Kieselgel E	27
TENAX TA	28
Florisil	29
CARBOSIEVE SIII	30 31 32
CARBOTRAP	26 27 28
CARBOXEN	26, 27, 28
AKTIVKOHLE, Coconut Base Carbon	33

Wie im Abschnitt 12 dieses Kapitels näher beschrieben wird, erscheinen auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen die Sorbentien

Amberlithe XAD-2

TENAX TA sowie

CARBOSIEVE SIII

für die Anreicherung organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von Flugzeugtriebwerken als geeignet. Allerdings lassen sich die jeweiligen Sorbentien nicht mit Hilfe eines einzigen Verfahrens analytisch bearbeiten.

Das jeweilige Feststoffsorbens wird in geeignete Glasrohre ein- oder mehrschichtig gefüllt und zur Probenahme an die jeweiligen Anschlüsse der Mischapparatur adaptiert.

Tabelle 10: Aufbau der jeweiligen Sorptionseinheiten.

SORPTIONS-MITTEL	ANZAHL DER SCHICHTEN	SCHICHTGEWICHT [mg]	ANZAHL DER SORPTIONS-EINHEITEN	ABMESSUNG DER SORPTIONS-EINHEIT [mm]
XAD-2	2	690	1	ø = 12 h = 18
TENAX TA	1	185	2	ø = 4 h = 60
CARBOSIEVE SIII	4	170	1	ø = 4 h = 20

Zur quantitativen Ermittlung diskreter Stoffgruppen (siehe Abschn. 14) wie z.B. Aldehyde, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-Furane (PCDD/F) etc. wurden die in den jeweiligen Normen und Richtlinien vorgeschriebenen Verfahren angewendet. Hierbei wurden z.T. auch Anreicherungen mit flüssigen Sorbentien durchgeführt, sofern dieses im Rahmen der entsprechenden Verfahrensvorschrift gefordert war. Einzelheiten hierzu finden sich in Abschnitt 14 dieses Kapitels sowie in Abschnitt 19.3 in Kapitel 3.

11.4 Probenahmepumpen und Probengasmengenmessung

Die Probengasteilstrommengen werden mit Hilfe geeigneter Probengaspumpen dem durch die Mischapparatur strömenden Gesamtprobengasvolumenstrom entnommen und zur Anreicherung der in den jeweiligen Teilströmen enthaltenen organischen Verbindungen durch die in Tabelle 11 genannten Sorptionseinrichtungen geleitet.

Die Probengasteilstrommengen sind unmittelbar von den aktuellen Prüflaufbedingungen (Prüfzeitraum), der Dimensionierung der Sorptionseinrichtungen (Aufbau einer entspr. Unterdruckes) und den spez. Durchbruchvolumina der verwendeten Sorptionsmittel abhängig [34].

Für die überwiegend eingesetzten festen Sorptionsmittel ergaben sich die in Tabelle 11 angegebenen Probengasteilstrommengen.

Tabelle 11:

SORPTIONSMITTEL/-EINRICHTUNG	PROBENGASVOLUMENSTROM [l/h]
XAD-2/VDI 3481 Bl.2	140...210
TENAX TA/TDS-Röhrchen	18...65
CARBOSIEVE SIII/TDS-Röhrchen	38...54

Die Probegasteilmengen wurden mit Hilfe unterschiedlicher Meßprinzipien und unterschiedlicher Apparaturen gemessen und zwar mittels kalibrierter Balgengaszähler sowie durch thermische Massendurchflußmessung.

Tabelle 12: Aufbau der Probengasmengenmessung.

NR.	SORPTIONS-EINRICHTUNG	MESS-PRINZIP *)	PUMPEN-LEISTUNG l/h]	AUTOM. REGELUNG	MANUELLE REGELUNG
1	XAD-2	GZ	12...720		x
2	TENAX GC	GZ	12...720		x
3	CARBOSIEVE SIII	TMD	30...360	x	

*) TMD = Thermische Massendurchflußmessung
GZ = Balgengaszähler

Die Abbildungen 17 und 18 zeigen beispielhaft den jeweiligen Typ der eingesetzten Meßapparaturen. Hinsichtlich des Meßprinzips der thermischen Massendurchflußmessung wird auf die einschlägige Firmenschrift der Firmen G. Breitfuß GmbH Harpstedt und Bronkhorst Hig-Tech B.V. - Ruurlo, Netherland[35] verwiesen.

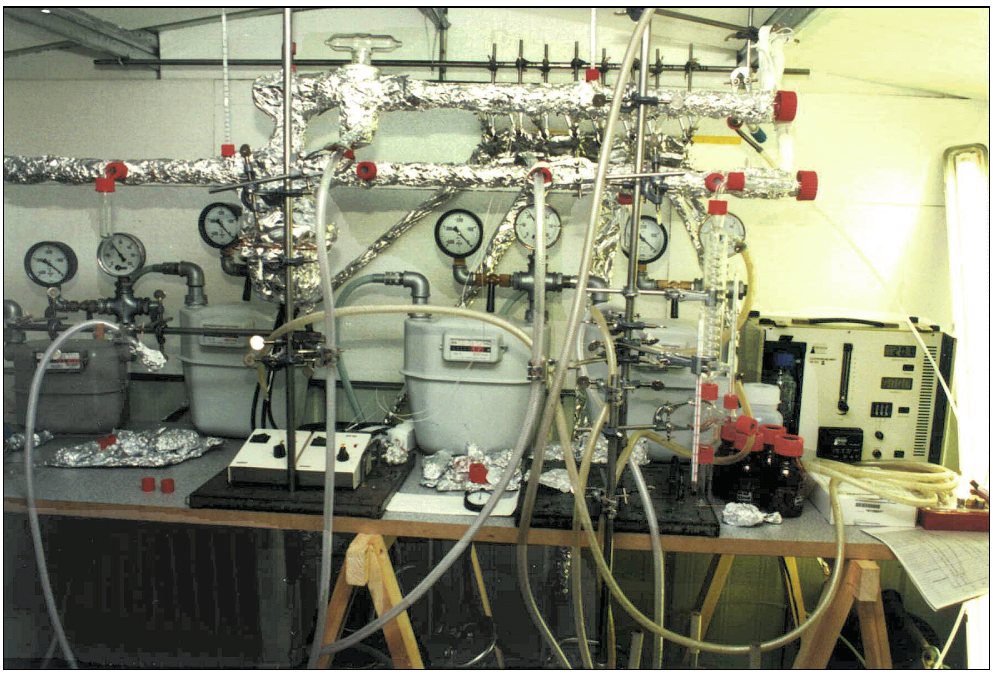


Abbildung 17: konventionelle Beprobungseinrichtung mit Gasuhr als Gasmengenmesser

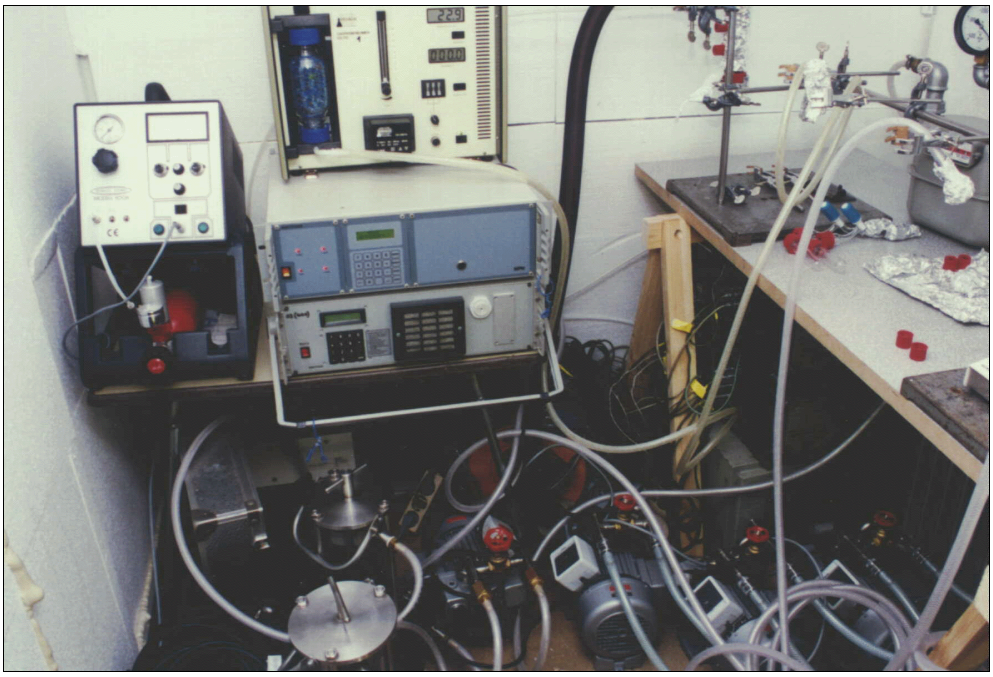


Abbildung 18: Beprobungseinrichtung, vollautomatisch mit thermischem Massendurchflußmesser

11.5 Adaption des meßtechnischen Equipments am Triebwerksprüfstand

Die in Abschnitt 11.2 beschriebene Mischapparatur, die Gasmengenmeßeinrichungen, Pumpengruppen, Teile der kont. registrierenden Meßeinrichtung etc. sind in einem separaten, beheizten Meßhaus, welches Wand an Wand zum Abgasturm des Prüfstandes errichtet wurde, untergebracht (siehe Abbildung 19).

Abbildung 19: Externes Meßhaus und Meßwagen der HLfU

Der überwiegende Anteil der kontinuierlich registrierenden Meßtechnik, Prüfgasaufbereitung, Meßwertaufnahme und -aufbereitung, Datenfernübertragung etc. ist im Emissionsmeßzug der HLfU, einem 11-Tonner-Meßfahrzeug untergebracht. Meßfahrzeug und Meßhaus sind über entsprechende Transferlines, wie beheizte Gasleitungen, Meßkabel etc. miteinander verbunden.

Über ein Datenfernübertragungsmodul werden 32 Meßgrößen, die am Prüfstand über 24 Stunden täglich im 5 Sekundentakt ermittelt und zu 1 Minutenmittelwerten verdichtet werden, in die Dienststelle Kassel der Hessischen Landesanstalt für Umwelt übertragen. Damit ist für einen Teil der Meßdaten eine direkte Anbindung des Prüfstandes an den Standort Kassel der HLfU gegeben. Dies ist insbesondere für Prüfläufe von Triebwerken von Bedeutung, die nicht diskontinuierlich beprobt werden können. Einzelheiten hierzu werden in Abschnitt 13.11 dieses Kapitels beschrieben.

Eine schematische Darstellung des gesamten Meßaufbaus ist in Abbildung 20 wiedergegeben.

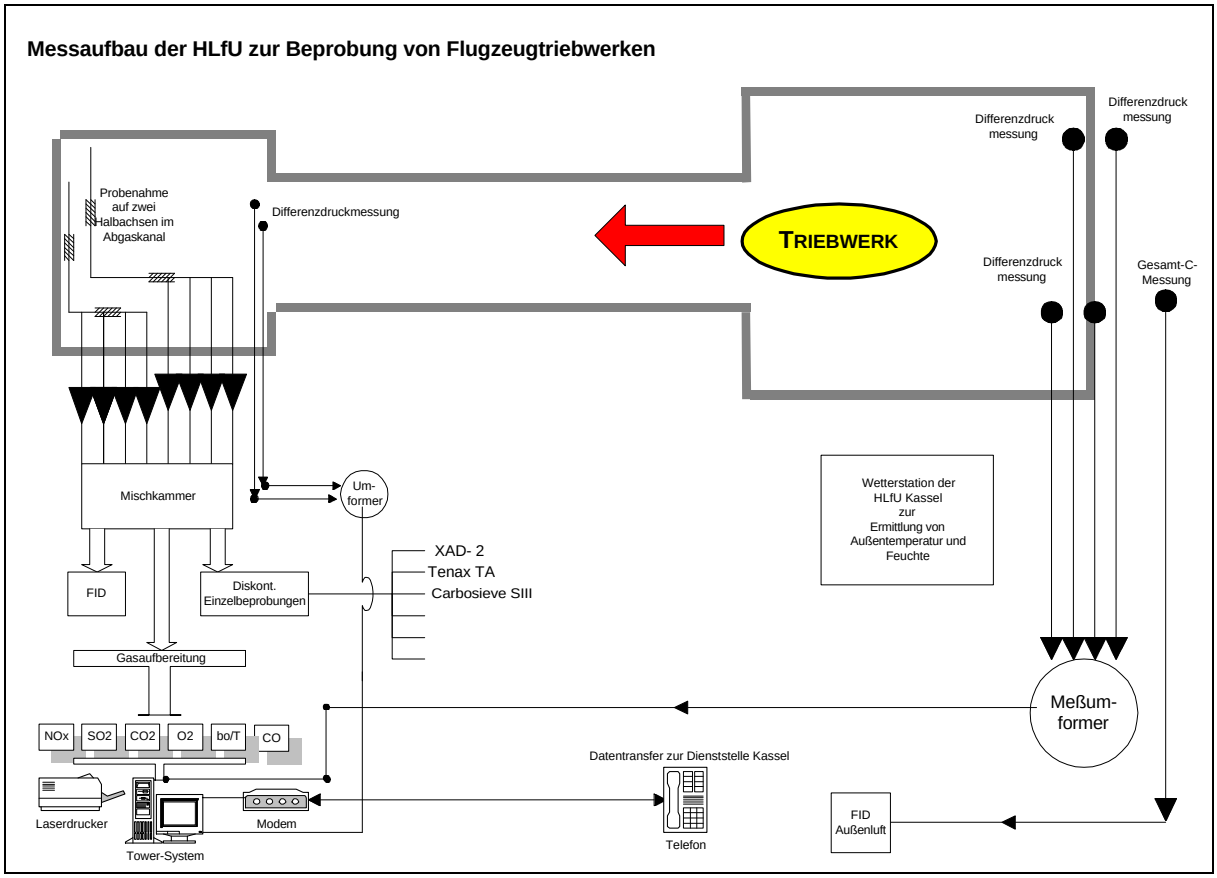


Abbildung 20: Schematische Darstellung des Meßaufbaus

12 ANALYTISCHE METHODEN

12.1 Verfahrensentwicklung

Die Tatsache, daß durch vorgegebene Prüfparameter an den jeweiligen Triebwerken probenahmetechnische Zwänge vorherrschen, die ihrerseits unmittelbaren Einfluß auf die sich anschließende Analytik haben, mußten die anzuwendenden Analysenverfahren auf diese Randbedingungen abgestimmt werden. Hierdurch ergeben sich insbesondere Schwierigkeiten bezüglich der jeweiligen Bestimmungsgrenzen der zu ermittelnden Einzelverbindungen.

12.1.1 Sorption an ausgewählten Sorbentien

Wie in Abschnitt 11.3 dieses Kapitels beschrieben wurde, wurden unterschiedliche feste Sorbentien zunächst empirisch auf ihre Eignung überprüft. Als entscheidendes Kriterium für die Erkennung auf Eignung war zunächst die unter vergleichbaren Bedingungen abgeschiedene und identifizierbare Anzahl unterschiedlicher organisch-chemischer Verbindungen. Hierbei war zu beachten, daß die zur Verfügung stehende Sorptionszeit durch die Dauer eines Triebwerksprüflaufes festgelegt war. Ferner korrellieren die Größen “Sorptionsmittelmenge”, “Probenahmevolumen = Sorptionsvolumen”, “Durchbruchsvolumen” direkt mit den Größen “Nachweisempfindlichkeit” für die jeweilige Verbindung und damit bei der Flüssigextraktion mit der “erforderlichen Lösemittelmenge”.

Aus ersten Vorversuchen deutete sich an, daß im Abgas von Flugzeugtriebwerken mit einem hohen Anteil der im Kerosin enthaltenen aliphatischen Verbindungen C7 - C18 zu rechnen ist. Darüberhinaus war mit einem im Vergleich zu den reinen Aliphaten geringeren Anteil an aromatischen Verbindungen sowie Carbonylverbindungen auszugehen.

Die Massenkonzentration an flüchtigen organischen chemischen Verbindungen (VOC) wurde in einem einschlägigen Vorversuch mit Hilfe eines kontinuierlich registrierenden Meßgerätes (Flammenionisationsdetektor, FID) mit > 40 mg/m^3 – integriert über einen gesamten Prüflauf – ermittelt.

Im einzelnen wurden die in Tabelle 9 genannten Sorbentien untersucht, wobei sich die Sorbentien Amberlithe XAD-2, Tenax TA und Carbosieve SIII für die Untersuchungen nach dem o.g. Kriterium als geeignet erwiesen.

12.1.1.1 XAD-2

Bei Amberlithe XAD-2 handelt es sich um ein Styrol-Divinylbenzol-Harz. Es eignet sich für die Adsorption organischer Stoffe sowohl in Wasser als auch in Luft. Die maximale Temperatur, bei der dieses Material angewendet werden kann, wird mit 200 °C angegeben [36]. Der Porendurchmesser beträgt bei diesem Sorptionsmittel 8,5 bis 9 nm.

12.1.1.2 Tenax TA

Tenax TA ist ein poröses Material auf der Grundlage von polymerem Diphenylenoxid. Es nimmt flüchtige und halbflüchtige Verbindungen auf und hat eine Temperaturobergrenze von 350 °C. Das Material hat eine geringe Affinität zu Wasser und Methanol. Bei der Probenahme von sehr flüchtigen Verbindungen wird üblicherweise ein Kohlenstoff-Molekularsieb als Reverse-Adsorbens verwendet.

12.1.1.3 Carbosieve SIII

Hierbei handelt es sich um ein Kohlenstoffmolekularsieb, welches bei der Pyrolyse einer Polymervorstufe zurückbleibt. Die Größe und Form der Moleküle und die Größe und die Form der Poren in den Adsorberteilchen entscheidet, wie gut die Analyten adsorbiert und wieder desorbiert werden.

Carbosieve SIII besitzt eine hohe spezifische Oberfläche (etwa 820 m^2/g) und 15 - 40 Å-Poren. Das sphärische Kohlenstoff-Molekularsieb wird als ausgezeichnetes Adsorbens für insbesondere kleine Moleküle in der Luft beschrieben[37]. Obwohl Carbosieve SIII noch hydrophob ist, nimmt es etwas mehr Wasser bei der Probenahme auf als z.B. Carboxen-569. Das reine Kohlenstoffgerüst ermöglicht eine thermische Desorption der Verbindungen ohne Verlust.

Tabelle 13:

Adsorbens	**Mesh Size**	**SurfaceArea [m^2/g]**	**Density [g/ml]**	**Max.Temp. [°C]**	**Application**
XAD-2	20/50	330	0,31	200	C10-C28
Tenax TA	60/80	35	0,25	350	C7-C26
Carbosieve SIII	60/80	820	0,61	> 400	C2-C5

12.1.2 Elution mit verschiedenen Lösemitteln

Zur Desorption von mit organischen Stoffen beladenen Probenahmeröhrchen mit Lösemitteln wurden unterschiedliche Lösemittel eingesetzt, um ein möglichst optimales Verhältnis zwischen Lösemittelmenge, Desorptionszeit und Bestimmungsgrenze der jeweiligen organischen Stoffe zu erzielen.

Die Lösemittelmenge richtet sich zunächst nach der während der Probenahme eingesetzten Sorptionsmittelmenge. Diese ihrerseits ist abhängig vom Probenahmeverfahren und hier insbesondere von dem jeweils benötigten Teilgasstrom, der in einer endlich begrenzten Zeit (die maximale Probenahmezeit ist identisch mit der Gesamtdauer des Prüflauf eines Triebwerkes) dem Gesamtabgasstrom zu entnehmen ist. Hier ist in aller Regel ein Kompromiß einzugehen. Wählt man die Sorptionsmittelmenge zu gering, was gleichzeitig mit kleinvolumigen Sorptionsgefäßen verbunden ist, so steigt der Unterdruck in der Probenahmeapparatur möglicherweise stark an, und die beabsichtigten Probevolumina lassen sich nicht erzielen. Wählt man dagegen großvolumige Sortionseinheiten sind entweder die Schichthöhen an Sorptionsmitteln gering, was zu einer fehlerhaften Adsorption führen kann oder für die anderseits größeren Sorptionsmittelmengen werden ebenso größere Volumina an Lösemitteln erforderlich, wodurch es bei der Aufarbeitung zu Verlusten kommen kann.

Für die Anreicherung an festen Sorbentien wurden im wesentlichen drei verschiedene alternative Sorptionsgefäße eingesetzt (siehe auch Tabellen 14 bis 16).

Bei den Sorptionsrohren gemäß Richtlinie VDI 3481 Bl.2 [38] wurden i.d.R. mehrere Sorptionsmittelschichten untergebracht, die ihrerseits mechanisch getrennt wurden. Das Gesamtschüttvolumen des eingesetzten Sorptionsmittels über alle Schichten betrug in Summe ca. 20 ml. Ebenso wurde hier zur Desorption ein relativ großes Lösemittelvolumen benötigt.

Beim Einsatz sog. ORBO-Röhrchen (siehe Tabelle 15) betrug das Sorptionsmitteleinsatzgewicht ca. 50 - 100 mg pro Röhrchen; dementsprechend konnten die Lösemittelmengen gering gehalten werden.

Die zur thermischen Desorption verwendeten Probenröhrchen (TDS-Röhrchen) eigneten sich ebenfalls zur Präparation mit geeigneten Sorptionsmitteln um diese anschließend mit Lösemitteln zu desorbieren. Auch hier bestand die Möglichkeit mehrere Sorptionsmittelschichten einzubringen - auch unterschiedliche Sorptionsmittel in einem Röhrchen.. Die erforderlichen Lösemittelmengen konnten bei Einsatz dieser Methode ebenfalls gering gehalten werden. Eine Gesamtübersicht ist den nachfolgenden Tabellen 14 bis 16 zu entnehmen.

Tabelle 14 : Probenahmeröhrchen nach VDI 3481, Bl2

Adsorbens	Schüttvolumen ml	Lösemittel	LM-Volumen ml
Kieselgel E	20	Aceton	20
Aktivkohle	20	CS_2	20
XAD-2	20	Toluol	20

Tabelle 15 : Probenahme mittels ORBO-Probenahmeröhrchen

Adsorbens	Bed Wt. Mg A/B	Lösemittel	LM-Volumen ml
TENAX TA SKC-Sorptionsrohr/ Nr. 226-35031	100/50	Toluol	2/1
CARBOSIEVE SIII Supelco Orbo Tube 91	130/65	CS_2	0,75
Florisil SKC-Sorptionsrohr/ Nr. 226-39	100/50	CS_2	0,75
CARBOXEN-564 Supelco Orbo Tube 90	160/80	CS_2	0,75
Carbotrap 20/40 Supelco Orbo Tube 101	100/50	CS_2	0,75

Tabelle 16: Probenahme mittels TDS-Röhrchen

Adsorbens	Schüttvolumen ml	Lösemittel	LM-Volumen ml
CARBOSIEVE SIII	0,8	CS_2	1
CARBOSIEVE SIII	3 x 0,25	CS_2	0,333 ml/Schicht

Die eingesetzten Lösemittel hatten folgende Spezifikationen:

Aceton: zur Rückstandsanalyse, >> 99 %, Fa. Promochem Code-Nr. 0018-67

Toluol: zur Rückstandsanalyse, > 99,8 %, Fa. Promochem Code-Nr. 8092

CS_2: benzolarm, > 99,9 %, Fa. Merck, Art.-Nr. 1.022133.0500

Jede der drei Schichten eines Adsorptionsröhrchens oder der gesamte Inhalt eines Sorptionsröhrchens wird für sich in ein 1 ml Injektionsfläschchen überführt und dieses mit einer Bördelkappe verschlossen. In die Fläschchen werden zunächst 50 µl Lösung des inneren Standards (entsprechend 1,842 µg Chlorbenzol) und dann 283 µl Schwefelkohlenstoff durch das Septum hinzugegeben. Anschließend wird die beschädigte Bördelkappe durch eine neue ersetzt, die Probe im Ultraschallbad homogenisiert und über Nacht stehengelassen.

Von der überstehenden Lösung werden 100 µl entnommen, in ein Injektionsfläschen mit Mikrolitereinsatz überführt und in den Teller des automatischen Probengebers des Gaschromatographen gestellt oder ein Aliquot dieser Lösung manuell gespritzt.

Zur Herstellung substanzspezifischer Kalibrierreihen oder zur Herstellung von Blindproben wurde gleichermaßen verfahren.

12.1.3 Fraktionierung der Eluate

12.1.3.1 Untersuchungsgegenstand

Proben von Emissionsmessungen an Flugzeugtriebwerken; Probenmatrix „Tenax TA“ oder „Carbosieve SIII“

12.1.3.2 Chemikalien

Aluminiumoxid (basisch, super I; Fa. ICN)

Chlorbenzol, Reinheitsgrad p.A. (Merck, p.A.)

Dichlormethan, Reinheitsgrad (Merck,Uvasol)

Hexan, Reinheitsgrad (Merck, p.A.)

Kieselgel (Silicagel 63-200 mesh, Fa. ICN)

Methanol, Reinheitsgrad (Merck, LiChrosolv)

Pentan, Reinheitsgrad (Promochem; f. d. Analyse leicht flüchtiger, halogenierter u. aromatischer Kohlenwasserstoffe)

Schwefelkohlenstoff, Reinheitsgrad (Merck, Uvasol)

Toluol, Reinheitsgrad p.A. (Promochem zur Rückstandsanalyse)

12.1.3.3 Geräte

Rotationsverdampfer

Chromatographiesäule mit 5 g Kieselgel; alternativ Chromatographiesäule mit 5 g Aluminiumoxid.

1 Spitzkolben 100 ml Volumen, mit Glasstopfen

2 Spitzkolben 50 ml Volumen, mit Glasstopfen

1 Spitzkolben 10 ml Volumen, mit Glasstopfen

Microliterspritzen, 0,5 ml und 5 µl Volumen

Rollrandfläschchen mit Bördelkappen

Gaschromatograph mit Trennsäule DB-5, 0,25 µm Schichtdicke der Phase, 60 m Länge, 0,25 mm innerer Durchmesser

12.1.3.4 Vorgehensweise

Das Sorbens (Tenax TA 60/80 mesh bzw. Carbosieve S III) wird aus den Sorptionsröhrchen quantitativ in einen 10 ml Spitzkolben überführt und mit 2 ml des Desorptionsmittels (Pentan bei Tenax TA 60/80 bzw. Schwefelkohlenstoff bei Carbosieve S III) versetzt. Die Probe wird unter mehrfachem Schütteln eine Stunde lang äquilibriert und danach der Säulenchromatographie zugeführt.

0,5 ml dieses Eluates werden auf eine Chromatographiesäule mit 5 g Kieselgel (alternativ mit 5 g Aluminiumoxid) aufgegeben. Man läßt den Extrakt in die Säule einziehen, gibt 50 ml Hexan auf die Säule und spült damit langsam letztere. Die Hexanfraktion wird in einem 100 ml Spitzkolben aufgefangen. Anschließend wird die Säule zunächst mit 20 ml Dichlormethan bis zum vollständigen Eindringen des Lösungsmittels und dann mit 20 ml Methanol Dichlormethan bis zum vollständigen Eindringen des Lösungsmittels gespült, wobei jede Fraktion für sich in je einem 50 ml Spitzkolben aufgefangen wird. Anschließend wird die Kieselgelsäule nacheinander mit 50 ml Methanol und 50 ml Hexan gespült; diese Eluate werden verworfen (die Aluminiumoxid-Säule wird verworfen).

Jede der drei Fraktionen wird für die nachfolgende gaschromatographische Analyse mit jeweils 2 ml Toluol als „Keeper“ sowie 2 µg Chlorbenzol (Innerer Standard) versetzt und am Rotationsverdampfer unter Vakuum (Wasserbadtemperatur bei Hexan: < 50 °C; bei Methanol: < 50 °C; bei Dichlormethan: < 30 °C) auf jeweils 1 ml Endvolumen eingeengt. Jedes dieser Konzentrate wird gemäß den nachfolgenden Bedingungen für sich analysiert.

12.1.3.5 Analysenbedingungen

Es wird unter folgenden Bedingungen gearbeitet:

Injektion:	splitless
Injektionsvolumen:	1 µl
Trägergas:	Helium, 1 ml/min
Temperatur des Injektorblockes:	250 °C
Temperaturprogramm für Lösungsmittel Toluol:	
Anfangstemperatur:	100 °C
Haltezeit:	4 min
1. Temperaturrampe:	20 °C/min
1. Endtemperatur:	140 °C
Haltezeit:	0 Minuten
2. Temperaturrampe:	3 °C/min
2. Endtemperatur:	280 °C
Haltezeit:	10 Minuten
Temperatur des Detektors:	250 °C

Bedingt durch den in Abschnitt 12.1.5 beschriebenen Einsatz der Thermodesorption wurde dieses Verfahren nicht zur Routineanalytik eingesetzt, sondern diente lediglich zur qualitativen Aufklärung des Spektrums organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von Flugzeugtriebwerken.

12.1.4 GC/MS-Untersuchungen zur qualitativen Identifikation, Massenspektrogramme, Bedingungen, Gerät

Die qualitative Bestimmung der im Abgas von Flugzeugtriebwerken enthaltenen organisch-chemischen Verbindungen erfolgte mit Hilfe einer GC/MS-Einrichtung. Hierbei handelte es sich um ein Quadrupol-Gerät der Firma Hewlett-Packard mit zusätzlicher Thermodesorptionseinrichtung (TDS) mit Kaltaufgabesystem (KAS) der Firma Gerstel (siehe hierzu auch Abschnitt 12.1.5).

Bei der Verwendung von Tenax TA erfolgte die Desorption der organsichen Stoffe mittels TDS-Einrichtung direkt in das Massenspektrometer.

Die Verwendung von XAD-2 sowie Carbosieve SIII machte vor der massenspektrometrischen Bearbeitung zunächst eine einschlägige Aufarbeitung mittels Flüssigdesorption und anschließendem Clean-up erforderlich (siehe Abschnitt 12.1.2 und 12.1.3). Die Injektion in das Massenspektrometer erfolgte bei den v.g. Sorbentien manuell.

Die nachfolgend angegebenen GC/MS-Randbedingungen lagen den Untersuchungen zugrunde:

Tabelle 17

GC/MS

Gaschromatograph		**Massenselektiver Detektor**	
Bezeichnung	**Hersteller**	**Bezeichnung**	**Hersteller**
HP 5890 Series II	Hewlett-Packard	HP 5971 Series	Hewlett-Packard

Ofenprogramm

Init.-Temp (°C)	**Init.Time (min)**	**Rate 1 (°C/min)**	**Final Temp. (°C)**	**Final Time (min)**	**Rate 2 (°C/min)**	**Final Temp (°C)**	**Final Time (min)**
35	10	2	75	1	1	200	14

Geräteparameter

Trägergas	**Fluß ml/min**	**Inj.-temperatur 1) °C**	**Inj.-temperatur 2) °C**	**Detektortemp. °C**
Helium	1,5	24	250	250

1) bei Betrieb mit TDS-KAS-Einheit;
2) beim Injizieren von mit Lösemitteln desorbierten Proben

Trennsäule

Permabond ® P-100 für die petrochemische Analytik (Dimethylpolysiloxan), Fa. Macherey-Nagel Co., Länge 100 m, ID 0,25 mm, Filmdicke 0,5 µm.

Unter den v.g. Bedingungen wurden Massen-Spektrogramme erhalten, wie sie nachfolgend in Abbildung 21 exemplarisch dargestellt sind. Wie in Kapitel 3 erwähnt wird, ließen sich nach dieser Methode und unter den beschriebenen analytischen Bedingungen > 90% der organisch-chemischen Verbindungen qualitativ bestimmen. Ein Anspruch auf weitere Aufklärung von organisch-chemischen Stoffen wurde als unverhältnismäßig angesehen.

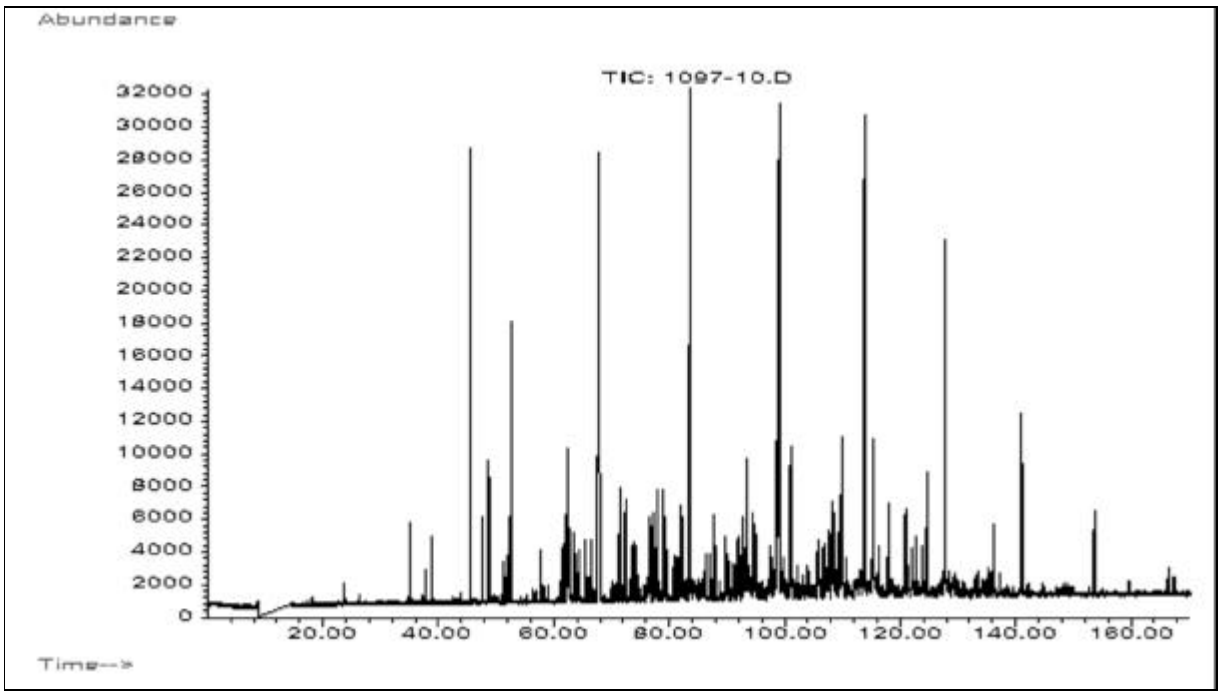


Abbildung 21: Exemplarische Darstellung eines Massenspektrogrammes einer Abgasprobe

12.1.5 Thermische Desorption, Bedingungen, Gerät

Vorwiegend zur Herabsetzung der Nachweisempfindlichkeit und zur schnelleren, überwiegend verlustfreien Auswertung von mit organisch-chemischen Stoffen beladenen Sorptionsröhrchen dient das Verfahren der „Thermischen Desorption“. Hierbei werden spezielle, meist zylindrische Glasrohre mit einem geeigneten Sorptionsmittel gefüllt, während der Beprobung mit den zu bestimmenden Stoffen beladen und daraufhin dicht verschlossen, und bis zur Auswertung kühl und dunkel gelagert.

Zur Desorption werden die TDS-Röhrchen in den Desorptionsofen eingesetzt. Hier wird das Sorptionsrohr in kurzer Zeit auf eine Temperatur von ca. 350 °C unter Trägergasbeaufschlagung aufgeheizt. Die hierbei desorbierten flüchtigen organischen Stoffe werden daraufhin zunächst im Kaltaufgabesystem (KAS) der TDS-Einrichtung bei tiefer Temperatur (ca. -80 °C) gesammelt und dann durch ein Temperaturprogramm mit einem Trägergasstrom direkt auf die Trennsäule der GC/MS-Einrichtung gespült.

Der Vorteil dieser Methode ist darin zu sehen, daß die Gesamtmenge der auf einem Beprobungsröhrchen sorbierten organischen Stoffe die dem Massenspektrometer zugeführte Probe darstellt. Nachteilig kann es sein, daß unerwünschte Begleitstoffe ebenso auf die Trennsäule gelangen. Ein möglicherweise erforderliches clean-up der Proben ist nach dieser Methode nicht vorgesehen.

12.1.5.1 Probenvorbereitung:

Das mit 0,75 ml Tenax TA gefüllte TDS-Röhrchen wird mit 5,525 µg ISTD (Chlorbenzol) beaufschlagt und zur Desorption in den TDS-Ofen geschoben.

12.1.5.2 TDS-Bedingungen:

12.1.5.2.1 Gerätebezeichnung:

Gerstel Thermodesorptionssystem TDS 2

12.1.5.3 Temperaturprogramm:

Anfangstemperatur:	-15 °C
Anfangshaltezeit:	0,00 min
Heizrate:	60 °C/min
Haltetemperatur:	350 °C
Haltezeit:	7,00 min
Transfertemperatur:	375 °C
Desorptionsmodus:	Standby Cooling
Standby-Temperatur:	70 °C
Überführungsmodus:	Splitless

12.1.5.4 KAS-Bedingungen:

12.1.5.4.1 Gerätebezeichnung:

Gerstel Kaltaufgabesystem KAS 3

12.1.5.5 Temperaturprogramm:

Anfangstemperatur:	-80 °C
Anfangshaltezeit:	0,00 min
Heizrate:	12 °C/s
Haltetemperatur:	350 °C
Haltezeit:	2,00 min
Kryokühlung:	Ein
Ausgleichszeit:	0,20 min
GC-Runtime:	181 min
Aufgabemodus:	Splitless

12.1.6 GC-Untersuchungen, Chromatogramme, Bedingungen, Geräte

Auf die Richtlinienreihe VDI 2457, insbesondere die Blätter 1 und 3, wird verwiesen.

12.1.6.1 Anwendungsbereich

Das Verfahren ist zur Bestimmung von organischen Verbindungen gedacht, die auf Carbosieve-S-III – Molekularsieb sorbiert sind.

12.1.6.2 Kurzbeschreibung des Verfahrens

Die auf dem Molekularsieb während der aktiven Probenahme sorbierten organischen Verbindungen werden mit Schwefelkohlenstoff desorbiert. Die Masse der desorbierten Stoffe in der Schwefelkohlenstofflösung wird am GC mittels FID bestimmt.

12.1.6.3 Sorptionseinrichtung zur Probenahme

Sorptionsrohre mit je drei Schichten Carbosieve-S-III – Molekularsieb (0,25 ml Schüttvolumen pro Schicht).

12.1.6.4 Geräte zur Analyse

Gaschromatograph HP 5890 Serie II plus mit FID und DOS-ChemStation zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der Meßkomponenten.
Injektionsspritzen zur Dosierung von Kalibrierstandards und des Elutionsmittels:
10 µl, 25 µl, 50 µl, 100 µl, 1000 µl.
Bördelgläser (Injektionsfläschchen) mit 1 ml Nennvolumen, Kappen und ggf. Mikrolitereinsätzen,
Bördelzange,
Glastrichter d = 15 mm

12.1.6.5 Chemikalien und Lösungen, Kalibrierlösungen

Die einzusetzenden Reagenzien bzw. Lösungsmittel entsprechen der Qualität "zur Analyse", mit der Ausnahme von:
Schwefelkohlenstoff, benzolarm , UVASOL, Fa. Merck, Charge :112 271 5

Tabelle 18

Komponente	Gehalt [%]	Dichte [g/ml]	Hersteller
Chlorbenzol	99,0	1,11	Fa. Merck
sowie – je nach Bedarf –weitere Chemikalien, wie z.B.			
Benzol, z.A.	> 99,7	0,88	Fa. Merck
Toluol, z.A.	> 99,8	0,87	Fa. Merck
m-Xylol, z.A.	> 97,0	0,86	Fa. Merck
p-Xylol, z.A.	> 99,5	0,88	Fa. Merck

12.1.6.6 Lösungen

Stammlösung (Kalibrierlösung): Aus jeweils 0,5 ml der einzelnen Komponenten wird ein Flüssigkeitsgemisch (Stammlösung) hergestellt. In jedem Gemisch sind ca. 10-15 Substanzen enthalten.

Verdünnung V1: Die Stammlösung wird im Verhältnis 1:1000 mit CS_2 verdünnt.

Verdünnung V2: Die Verdünnung V1 wird im Verhältnis 1:1000 mit CS_2 verdünnt. Aus dieser Verdünnung werden die verschiedenen Eichpunkte hergestellt.

12.1.6.7 Herstellung der Chlorbenzollösung (ISTD)

Verdünnung 01: 10 µl Chlorbenzol (s.o.) werden mit 990 µl CS_2 aufgefüllt. Die Konzentration an Chlorbenzol beträgt jetzt 10,940 mg/ml.

Verdünnung 02:	10 µl Verdünnung 01 werden mit 990 µl CS_2 aufgefüllt. Die Konzentration an Chlorbenzol beträgt jetzt 0,1094 µg/µl.
ISTD:	50 µl von Verdünnung 02 pro Probe. Die Konzentration an Chlorbenzol beträgt jetzt 5,5 µg/ Probe.

12.1.6.8 Eichpunkte aus Stammlösung (Kalibrierlösung)

EP 1: 50 µl V2 werden mit 50 µl ISTD und 900 µl CS_2 aufgefüllt.
EP 2: 20 µl V2 werden mit 50 µl ISTD und 930 ml CS_2 aufgefüllt.
EP 3: 10 µl V2 werden mit 50 µl ISTD und 940 µl CS_2 aufgefüllt.
EP 4: 5 µl V2 werden mit 50 µl ISTD und 945 µl CS_2 aufgefüllt.

12.1.6.9 Betriebsmittel zum Betrieb des GC

An der Gasentnahme müssen mindestens folgende Gasdrücke gewährleistet sein:

Helium:	4,5 bar
Wasserstoff:	1,5 bar
synthetische Luft:	3,0 bar

12.1.6.10 Probenaufbereitung

Jede der drei Schichten eines Adsorptionsröhrchens wird für sich in ein 1 ml Injektionsfläschchen überführt und dieses mit einer Bördelkappe verschlossen. In die Fläschchen werden zunächst 50 µl Lösung des inneren Standards (entsprechend 1,842 µg Chlorbenzol) und dann 283 µl Schwefelkohlenstoff durch das Septum hinzugegeben. Anschließend wird die beschädigte Bördelkappe durch eine neue ersetzt, die Probe im Ultraschallbad homogenisiert und über Nacht stehengelassen.

Von der überstehenden Lösung werden 100 µl entnommen, in ein Injektionsfläschen mit Mikrolitereinsatz überführt und in den Teller des automatischen Probengebers gestellt.

12.1.6.11 Analytische Bestimmung für GC HP 5890 Serie II plus:

12.1.6.11.1 Trennsäule:

Typ:	Permabond P100-0,50
Säulenlänge:	100 m
Säulendurchmesser:	0,25 mm

12.1.6.11.2 Gasflüsse:

Vordruck H_2:	40 ml/min
Vordruck $Luft_{synth}$:	430 ml/min
Trägergas He durch die Säule:	1,00 ml/min
Split Vent:	50 ml/min
Septum Purge:	1 ml/min
Auxillary Gas:	20 ml/min

12.1.6.12 Geräteparameter:

12.1.6.12.1 Einspritzblock

Betriebsart:	Split Mode
Einspritzblock - Temp.:	250 °C
Eingespritztes Volumen:	2 µl (mit Autosampler)

12.1.6.12.2 Ofen

Temperaturprogramm:

Haltezeit 1:	10 min bei 35 °C
Gradient 1:	2°C/min bis 75 °C
Haltezeit 2:	1 min
Gradient 2:	1°C/min bis 200 °C
Haltezeit 3:	24 min

12.1.6.12.3 Detektor

Temperatur:	250 °C

12.1.6.13 Auswertung der Chromatogramme

12.1.6.13.1 Integrationsparameter

Die Integrationsparameter werden von der Gerätesoftware („Autointegrate“) vorgeschlagen; sie sind nach Prüfung der graphischen Darstellung des Chromatogrammes (auf z.B. zu hohe oder zu geringe Empfindlichkeit, unzureichende Trennung) ggf. manuell den aktuellen Erfordernissen anzupassen.

12.1.6.14 Qualitative und quantitative Zuordnung der Meßsignale

Die qualitative Zuordnung der zu analysierenden Komponenten erfolgt durch die Bestimmung der Retentionszeiten anhand der Kalibrierlösungen.

Die quantitative Auswertung der Proben resp.Chromatogramme wird nach der Methode des Internen Standards durchgeführt.

12.1.6.15 Berechnen des Ergebnisses

12.1.6.15.1 Qualitative Auswertung

Charakteristisch für eine Substanz ist die Nettoretentionszeit. Die Zuordnung der Peaks kann deshalb mit Hilfe von Vergleichssubstanzen erfolgen.

Zur Identifizierung werden die Nettoretentionszeiten im Chromatogramm mit denen bekannter Verbindungen verglichen, die unter jeweils denselben Untersuchungsbedingungen erhalten wurden. Es muß sich eine Übereinstimmung auf mindestens zwei Trennsäulen unterschiedlicher Polaritäten ergeben, um auf die Identität von Vergleichssubstanz und Probe zu schließen.

Dies gilt auch für die Aufstockungsmethode, bei der eine Vergleichssubstanz zur Analysenmischung gegeben wird, was bei Identität der Verbindungen zu einer Peakvergrößerung führt.

12.1.6.15.2 Quantitative Auswertung

Die quantitative Auswertung erfolgt in Übereinstimmung mit dem gewählten Kalibrierverfahren nach den Methoden des „externen“ oder „internen Standards“. Die Analysenwerte müssen dabei im Konzentrationsbereich der Kalibrierungen liegen.

12.1.6.15.2.1 Externer Standard

Die Massenkonzentration c_i der Substanz i wird nach folgender Gleichung berechnet, wobei der Meßwert A_i in die nach c_i aufgelöste Kalibrierfunktion eingesetzt wird:

$$c_i = \frac{A_i - b_i}{k_i} \qquad (1)$$

12.1.6.15.2.2 Interner Standard

Die Massenkonzentration c_i der Substanz i wird nach folgender Gleichung berechnet, wobei die Meßwerte A_i und A_{st} sowie c_{st} in die nach c_i aufgelöste Kalibrierfunktion eingesetzt werden:

$$c_i = \frac{c_{St}}{k}\left(\frac{A_i}{A_{St}} - b_i\right) \qquad (2)$$

b_i = Achsenabschnitt der Kalibriergeraden für die Substanz i

k_i = Steigung der Kalibriergeraden für die Substanz i

Zur Auswertung der Messungen, unter Berücksichtigung der Wiederfindungsraten etc. wird auf die Richtlinie VDI 2457 Blatt 1[39] verwiesen.

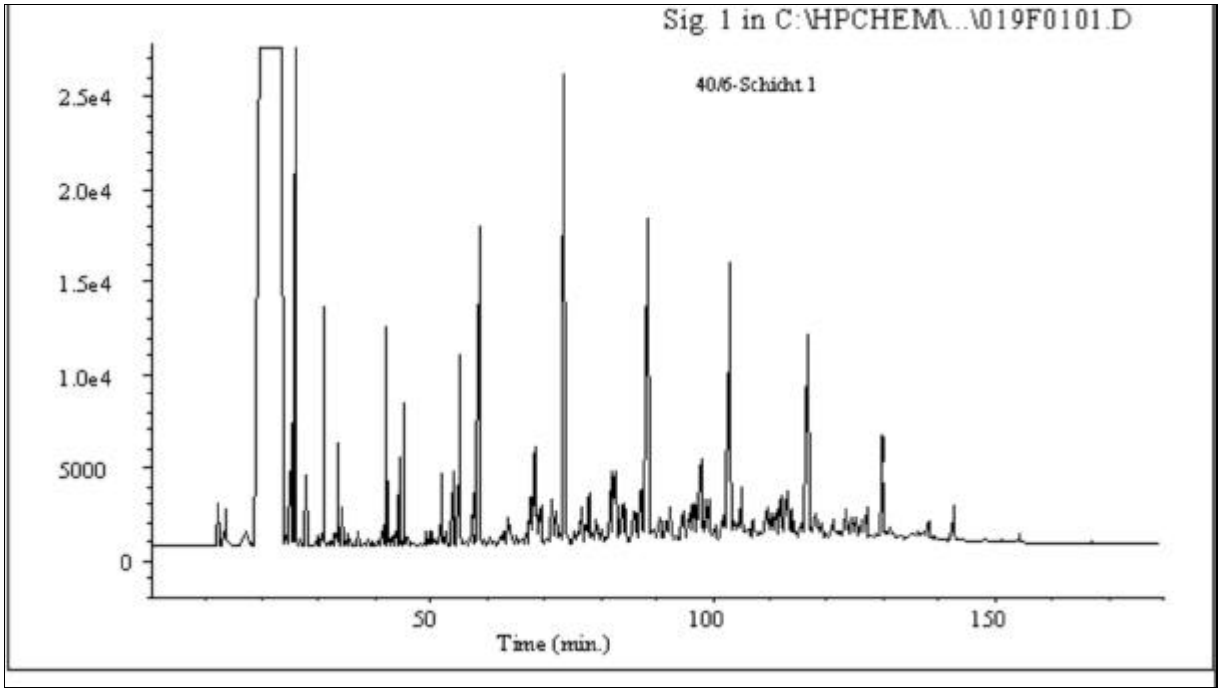


Abbildung 22: Exemplarische Darstellung eines Gaschromatogrammes einer Abgasprobe

12.1.7 Festphasenextraktion zur Untersuchung von Kerosin

Ziel war es, für den zivilen Flugzeugkraftstoff (Kerosin) eine Trennmethode auf der Basis der Festphasenextraktion zu entwickeln. Die Verwendung der Festphasenextraktion für ähnliche Probenmatrices, wie z. B. Mineralöl und Altöl findet sich in der Literatur bei [*Ciupe et al.*, *Van Horne*, *Barber* und *Kicinski et al.*] [40, 41, 42, 43, 44, 45].

Der untersuchte Flugzeukraftstoff (Kerosin JET A1) wurde mittels der Festphasenextraktion unter Verwendung einer Silika-Cyanopropylsilika-Mischphase in zwei Fraktionen aufgetrennt. Die vorliegende Dokumentation enthält eine vollständige Arbeitsanweisung für die Festphasenextraktion und die Analytik von Kerosin. Mit dem beschriebenen Verfahren ist es möglich, die in Kerosin enthaltenen Komponenten selektiv zu identifizieren und zu quantifizieren.

Die Identifizierung einzelner Substanzen in den Fraktionen erfolgte mit Gaschromatographie und Massenspektrometrie (GC/MS); die Quantifizierung der Kerosinprobe wurde am Gaschromatograph mit Flammenionisations-Detektor (GC/FID) durchgeführt. In der ersten Kerosin-Fraktion befinden sich aliphatische Kohlenwasserstoffe, in der zweiten Fraktion monoaromatische und diaromatische Kohlenwasserstoffe.

Kerosin JET A1 setzt sich, gemessen an den den Flächenanteilen im Chromatogramm, aus folgenden Kohlenwasserstoff-Klassen zusammen:

1. Alkane 77,3%
2. Monoaromaten 18,1%
3. Diaromaten 3,1%

4. Alkene 1,5%

Die Hauptkomponenten der aliphatischen Fraktion sind: Nonan, Decan, Undecan, Dodecan, Tridecan und Tetradecan. Die dominierenden Substanzen der aromatischen Fraktion sind: Ethylbenzol, Xylol, Trimethylbenzol und Ethyltoluol.

12.1.7.1 Prinzip der Festphasenextraktion

Die Verwendung der Festphasenextraktion zur Probenaufarbeitung bietet gegenüber konventionellen Methoden (z.B. Flüssig-Flüssig-Extraktion) einige wichtige Vorteile:

Anreicherung des Analyten (Aufkonzentrierung)

Entfernung von Störkomponenten und Matrixanteile

Wechsel zu einer für die anschließende Analytik günstigen Matrix

Reduktion des Lösungsmittelverbrauchs

Größere Probenanzahl in kürzerer Zeit

Das Grundprinzip der Festphasenextraktion ist in Analogie mit dem der Flüssig-Flüssig-Extraktion zu sehen. Die flüssige Probe wird durch die gewählte Festphase gedrückt oder gesaugt. Dabei werden die Probenbestandteile am Sorbens zurückgehalten und folglich „extrahiert“. Die Störkomponenten und Matrixanteile werden bei diesem Vorgang idealerweise nicht retardiert. Wenn dies dennoch der Fall ist, können restliche Störkomponenten mit einer Waschlösung vom Sorbens gewaschen werden. Schließlich werden die zu isolierenden Verbindungen mit einem geeigneten Lösungsmittel vom Sorbens abgelöst und in einer sauberen Fraktion selektiv eluiert.

In vielen Fällen erreicht man mit der Extraktion auch eine Aufkonzentrierung des Analyten aus der Matrix, da dieser auf der Festphase angereichert wird.

Alternativ zu der hier beschriebenen Vorgehensweise kann eine Extraktionssäule auch gewählt werden, um die Verunreinigungen in einer Probe selektiv zurückzuhalten, während der Analyt die Säule unreteniert durchläuft.

12.1.7.2 Beschreibung des Flugzeugkraftstoffs Kerosin

Kerosin (Flugpetrol) setzt sich wie folgt aus verschiedenen Kohlenwasserstofftypen zusammen: Paraffine (50-65 Vol. %), Naphtene (20-30 Vol. %), Aromaten (10-20 Vol. %), Olefine (<1 Vol. %), Schwefelverbindungen (<0,01 Gew. %). Kerosin enthält kein Blei [alle Angaben aus *Schlatter et al.*].

Der hier untersuchte zivile **Flugtreibstoff Jet A1** ist der international meist verwendete Kerosintyp und enthält 0,1 % Benzol.

12.1.7.3 Arbeitsanweisung

12.1.7.3.1 Geräte, Chemikalien und Lösemittel

12.1.7.3.1.1 Geräte

12.1.7.3.1.1.1 Geräte für die Probenvorbereitung:

- Feinwaage
- Ultraschallbad
- 100 ml Meßkolben mit Glasstopfen
- 50 ml Meßkolben mit Glasstopfen

– 1 ml Meßpipette

12.1.7.3.1.1.2 Geräte für die Festphasenextraktion:

– Vakuum-Kammer für 12 Säulchen mit Kontroll-Manometer
– Deckel für die Vakuumkammer mit Durchflußhähnen aus verchromtem Messing und Edelstahlnadeln
– Vakuumpumpe
– Trockaufsatzdeckel für die Kammer mit Anschluß für Stickstoff
– Erlenmeyerkolben 100 ml
– Spitzkolben 10 ml mit NS-Schliff und Glasstopfen
– Spritze 100 µl skaliert
– Spritze 10 ml skaliert
– Probenfläschchen 1 ml aus Braunglas mit Einsatz für 100 µl
– Pasteurpipetten, kurz
– Pipettiersaugbälle für 2 ml
– Mikroliterpipette (Kolbenhubpipette) für 1000 µl-Pipettieraufsätze und Einwegspritzen (1000 µl)

12.1.7.3.1.2 Chemikalien und Adsorbentien

– Kerosinprobe: JET A1, Flughafen Frankfurt a. M.
– Festphasen-Säulen: CHROMABOND CN/SiOH, 6 ml, 500/1000 mg
– Glas, Fa. Macherey-Nagel

Interne Standards:

1) Chlorbenzol, Fa. Riedel-de Haen, UN-No. 1134, min. 99,9% für Gaschromatographie,
2) 1,1,2-Trichlorethan, Fa. Riedel-de Haen, UN-No. 2810, min. 99,9% für Gaschromatographie,

12.1.7.3.1.3 LÖSEMITTEL

- n-Pentan EOCl zur Analyse LHKW und aromatischen Kohlenwasserstoffe, Fa. Promochem
- Methanol, Fa. Promochem

12.1.7.4 Probenaufarbeitung

12.1.7.4.1 Probenvorbereitung

Bei Raumtemperatur werden 1 g Kerosin (Flugpetrol) in einem 100 ml-Meßkolben mit n-Pentan auf 100 ml aufgefüllt. Diese Stammlösung gut schütteln und im Kühlschrank aufbewahren.

Aus der Stammlösung wird 1 ml entnommen und in einem 50 ml-Meßkolben mit n-Pentan auf 50 ml aufgefüllt. Gut schütteln und bis zur Verwendung im Kühlschrank aufbewahren.

Die Kerosin-Lösung vor der Probenaufgabe auf Raumtemperatur bringen und für 10 min ins Ultraschallbad stellen.

12.1.7.4.2 Festphasenextraktion

Die für die Probenaufarbeitung von Kerosin ausgewählte Festphasenkartusche enthält im unteren Teil 1000 mg Silika (SiOH), auf das 500 mg Cyanopropylsilika-Phase (CN) geschichtet sind. Die beiden Adsorbermaterialien besitzen folgende Eigenschaften:

SiOH

funktionelle Gruppe:	ungebundenes aktiviertes Silika
primäre Wechselwirkung:	polar
sekundäre Wechselwirkung:	Kationenaustausch

Silika ist im allgemeinen das polarste Sorbens. Ungebundenes und aktiviertes Silika ist darüber hinaus eine mäßige Säure. Das Sorbens SiOH ist sehr gut geeignet, um aus einer Probe Analyten mit ähnlicher Strukur und Eigenschaften selektiv zu trennen. Die extreme Polarität von Silika ist für die schnelle Adsorption von Wasser aus der Umgebungsluft verantwortlich. Die SiOH-Phase muß daher stets trocken und geschlossen aufbewahrt werden (in Alufolie).

CN

funktionelle Gruppe:	Cyanopropyl
primäre Wechselwirkung:	unpolar, polar
sekundäre Wechselwirkung:	Kationenaustausch

CN besteht aus Cyanopropylketten, die über eine Silylether-Brücke mit dem Silikagerüst verknüpft sind. Es gilt als Sorbens mittlerer Polarität. CN ist gut geeignet für eine Anwendung, bei der sich unter Verwendung von unpolaren Festphasen (z. B. C18 oder C8) extrem unpolare Analyten irreversibel an das Adsorbermaterial anlagern würden. Ebenso kann CN als polares Sorbens eingesetzt werden, wenn es darum geht, sehr polare Analyten (die auf ungebundenem Silika irreversibel verbleiben würden) zu trennen.

12.1.7.4.3 Durchführung der Festphasenextraktion

12.1.7.4.3.1 Konditionierung der Festphasen-Säule:

Vor der Probenaufgabe ist es notwendig, die Festphase zu aktivieren, um reproduzierbare Wechselwirkungen mit den Analyten zu erhalten. Für die Konditionierung der CN/SiOH-Festphase zur Extraktion von Kerosin sind zwei Schritte erforderlich:

Die Glassäule mit dem Sorbens wird in Alufolie eingewickelt und 1 h im Trockenschrank bei 140 °C aufgeheizt. Anschließend wird sie nach Abkühlen auf ca. 30 °C auf einen Säulenanschluß mit einem Durchflußhahn auf den Deckel der Vakuumkammer gesteckt. Der Durchflußhahn ermöglicht dann bei der Elution des Analyten die genaue Aufteilung des Elutionsmittels in verschiedene Fraktionen.

Nach Anschalten der Vakuumpumpe wird mit 6 x 1 ml n-Pentan bei einem Säulenfluß von 1 ml/min (leichtes Vakuum) gespült. Das Lösemittel wird stets mit einer Mikroliterpipette in

1 ml-Portionen auf die Säule gegeben. Nach dem die gesamte Lösemittelmenge bis auf einen sehr geringen Überstand (1 mm) durch die Säule gelaufen ist, wird der Hahn geschlossen und die Vakuumpumpe abgeschaltet. Die Festphase darf nach Abschluß der Konditionierung auf keinen Fall trocken laufen.

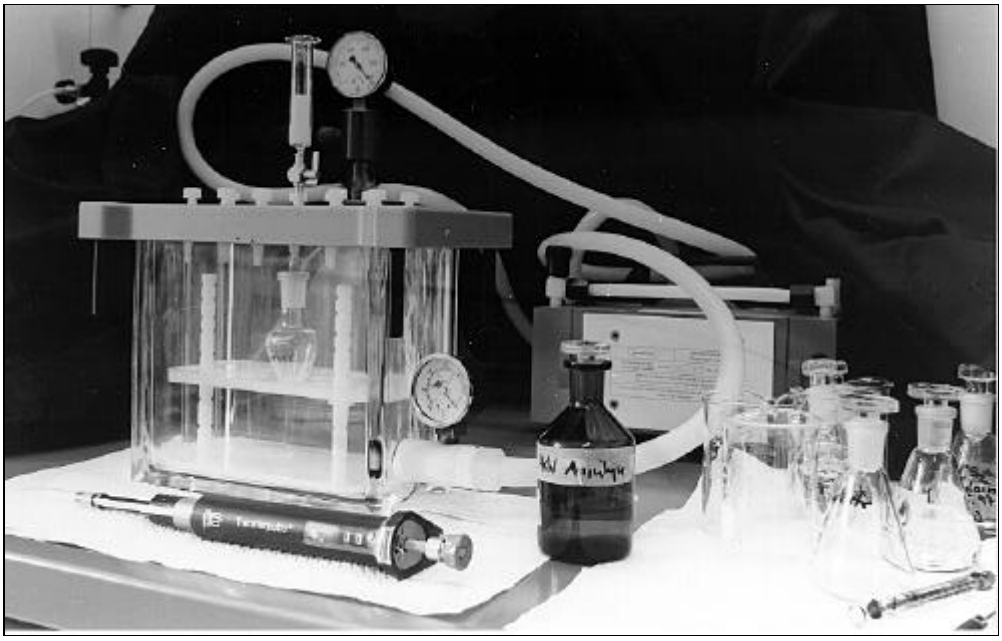


Abbildung 23: Aufbau der Festphasenextraktion mit Vakuumkammer und Vakuumpumpe

Nun ist die Festphase bereit für die Retention des Analyten.

12.1.7.4.3.1.1 PROBENAUFGABE:

Zunächst werden 10 µl des ersten internen Standards Chlorbenzol (Konzentration: 0,1105 µg/µl in n-Pentan) und 10 µl des zweiten internen Standards 1,1,2-Trichlorethan (Konzentration 0,144 µg/µl in n-Pentan) auf die Säule gegeben. Mit einer Spritze werden dann 200 µl der gut homogenisierten Kerosin-Probe aufgebracht. Auf diesen Überstand wird im Anschluß daran mit der Mikroliterpipette 1 ml n-Pentan gegeben und kurzzeitig durch Einschalten der Vakuumpumpe bei 1 psi Unterdruck die gesamte Lösung in die Festphasenmatrix eingesaugt. Der erhaltene Extrakt wird in einem Erlenmeyerkolben aufgefangen. Im Extrakt ist das Lösemittel-Totvolumen der Festphasensäule enthalten, das verworfen werden kann.

12.1.7.4.3.1.2 Elution:

Unter den Säulenauslaß wird nun ein 10 ml-Spitzkolben gestellt. Die Elution der aufgegebenen Probe und der internen Standards erfolgt mit n-Pentan in zwei Fraktionen:

1. 3,5 ml n-Pentan
2. 4,5 ml n-Pentan.

Das Elutionsvolumen wird in 1 ml-Portionen bzw. 0,5 ml-Portionen auf die Säule pipettiert.

Jede Portion wird einzeln tropfenweise durchgesaugt bei leichtem Vakuum (Säulenfluß 1 ml/min). Nach Abschluß der ersten Fraktion wird der Durchflußhahn zugedreht und das Auffanggefäß gewechselt. Die Fraktion enthält die Aliphaten und den internen Standard Chlorbenzol („aliphatische Fraktion“). In der zweiten Kerosinfraktion finden sich Ben-

zol,Toluol und weitere Alkylaromaten sowie Diaromaten und der interne Standard 1,1,2-Trichlorethan („aromatische Fraktion“).

Einengung des Probenvolumens:

An die Elution der beiden Fraktionen schließt sich die Einengung der Probenvolumina unter Stickstoff an. Der Deckel mit Säulenaufsätzen wird gegen den Trockenaufsatzdeckel mit Stickstoffanschluß eingetauscht. Mit 2,4 bar wird ein leichter Stickstoffstrom in die in der Kammer stehenden Spitzkolben geleitet. Auf diese Art wird das Lösemittel verdampft und die Probenvolumina auf ca. 100 µl eingeengt. Die Probe darf auf keinen Fall bis zur Trockne eingedampft werden. Mit einer Pasteurpipette wird das Eluat in ein Braunglas-Vial mit Einsatz überführt und gegebenenfalls mit n-Pentan auf 100 µl gebracht.

12.1.7.4.4 Wiederverwendung der Festphase

Eine Glassäule mit CN/SiOH-Festphase kann bis zu drei Mal verwendet werden. Danach kommt es zu nicht reproduzierbaren Erscheinungen. Nach der Elution der Probe wird die Säule gründlich gespült, getrocknet und in Alufolie aufbewahrt. Dabei wird wie folgt vorgegegangen:

Zunächst wird die obere Fritte der Säule mit einer Pasteurpipette 3 mal mit n-Pentan ausgespült. Die Säule wird danach wieder auf die Vakuumkammer gesetzt und mit angelegtem Vakuum gewaschen.

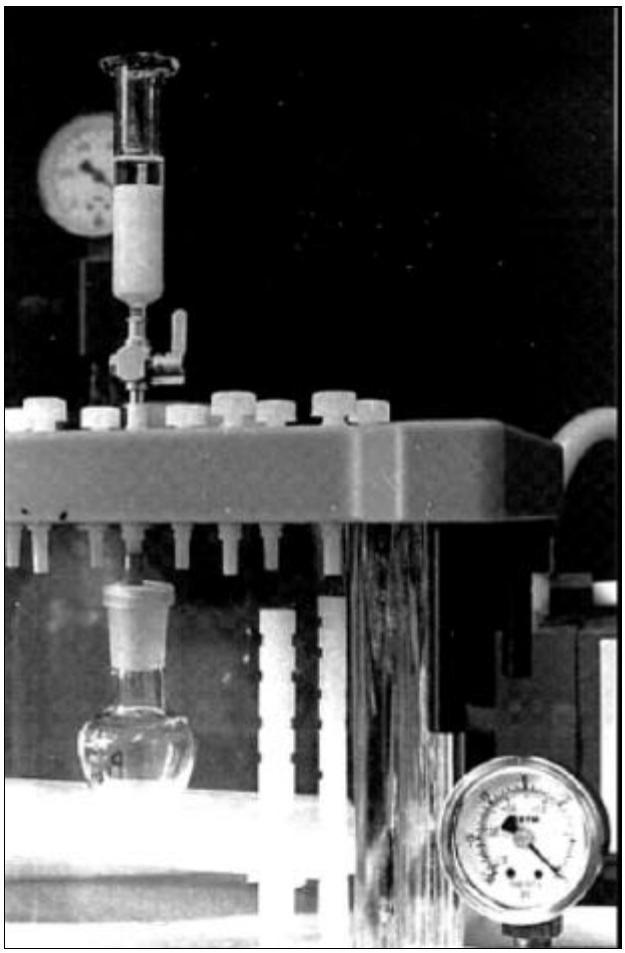


Abbildung 24: Aufbau der Festphasenextraktion mit Vakuumkammer und Vakuumpumpe

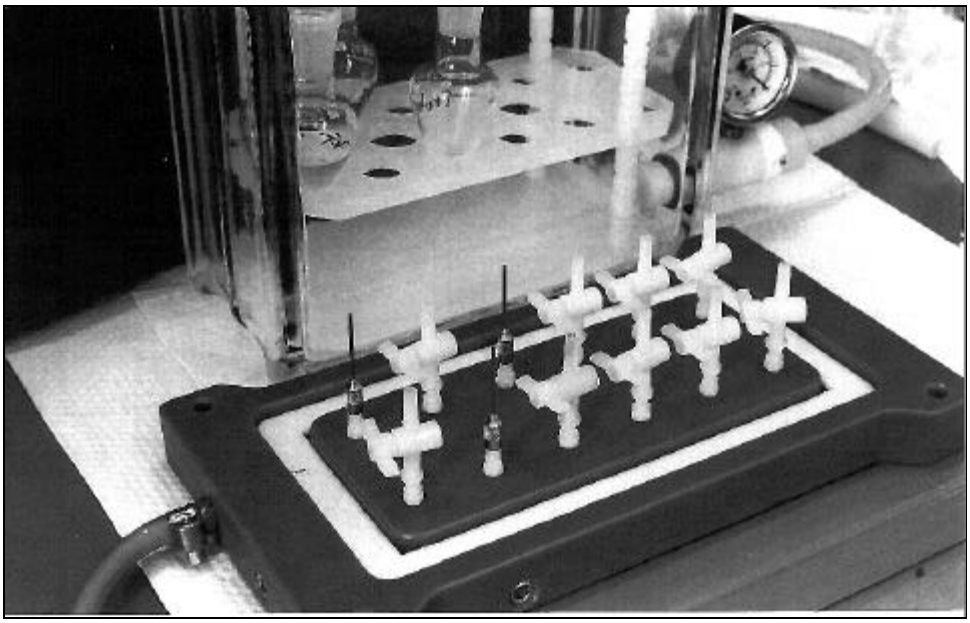


Abbildung 25: Kammer-Aufsatz für die Einleitung von Stickstoff

Das Spülen erfolgt zuerst mit 3 x 2 ml n-Pentan, um unpolare Verunreingungen von der Festphase zu lösen. Danach werden 3 x 2 ml Methanol zur Ablösung polarer Verunreinigungen durchgesaugt. Der Säulenfluß sollte beides mal ca. 2 ml/min betragen (Vakuum: -2 psi).

Das anschließende Trockenziehen erfolgt 10 min lang bei einem angelegten Vakuum von -6 psi.

Ausgebrauchte Säulen werden im Ganzen zum Feinchemikalien-Abfall gegeben.

12.1.7.4.5 Analyse am Gaschromatograph (GC/FID)

Von der Probe werden 2 µl am GC/FID splitlos injiziert. Die Geräteparameter und das eingesetzte Temperaturprogramm sind in Tabelle19 dargestellt

.

Tabelle 19: Geräteparameter und Temperaturprogramm

Gaschromatograph:	HP 5890 Series II Plus
Injektor:	Injektion: 2 µl splitlos, Splitless-Einlaß-system, Temperatur: 250 °C
Kapillarsäule:	Fused Silica, Permabond P100,100 m, 0,25 mm ID
Trägergas:	Helium, 0,8 ml/min
Detektor:	FID, Temperatur: 250 °C
Temperaturprogramm:	Start: 35°C, 10 min 2 °C/min, 75 °C, 1 min 1 °C/min, 200 °C, 24 min Gesamtdauer: 180 min

12.1.7.5 Qualitätsüberprüfung der Festphasenextraktion

12.1.7.5.1 Elutionskurven

Eine erste Absicherung der experimentell entwickelten Methode kann mit Hilfe der Darstellung von Festphasenextraktionen einiger Standardsubstanzen in Form von Elutionskurven erreicht werden. Über die Elutionskurven erhält man einen Hinweis auf die Vollständigkeit der Elution und kann eine Substanz zu einer bestimmten Elutionsfraktion zuordnen.

Die Elutionskurven wurden aus der Festphasenextraktion von Standardgemischen (aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe) mit n-Pentan in einzelnen Portionen zu je 2 ml aufgenommen. Das gesamte Elutionsvolumen betrug 10 ml. Die Ergebnisse sind in Abb. 26 - 28 gezeigt.

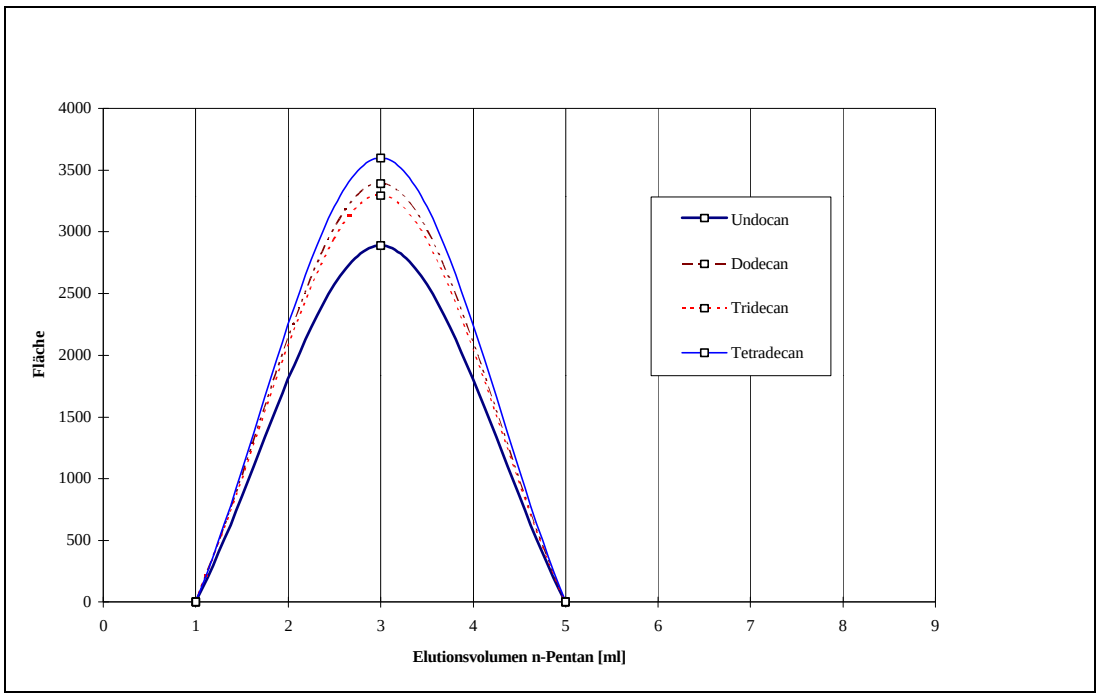


Abbildung 26: Elutionskurven von gesättigten Aliphaten (C11-C14)

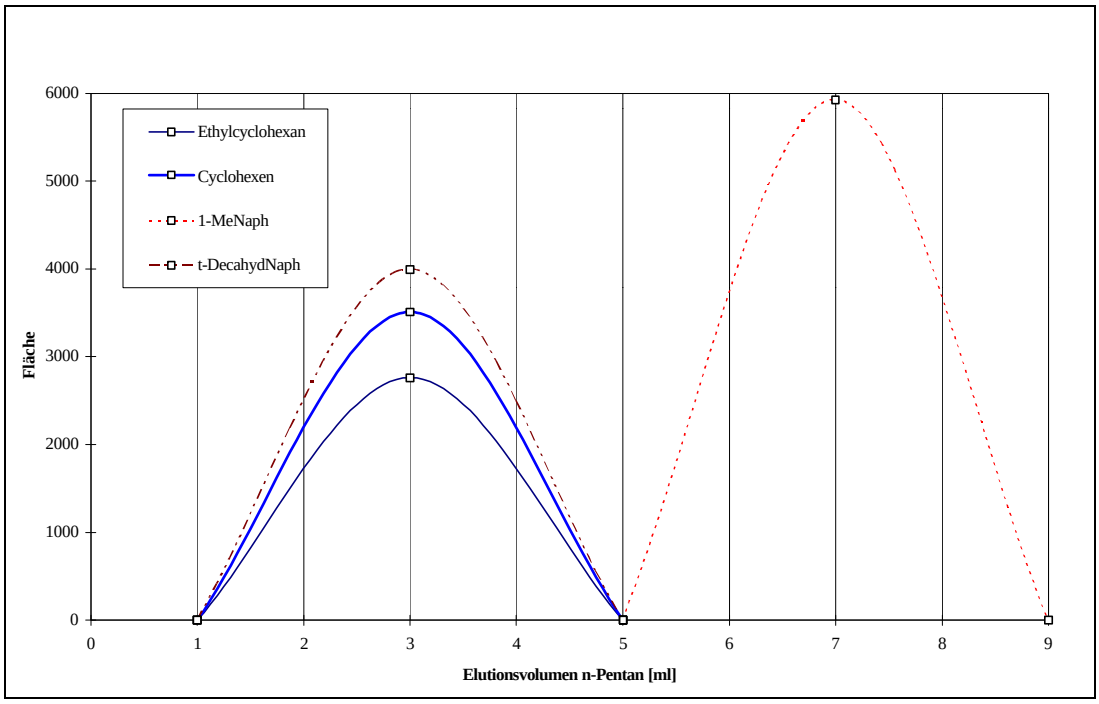


Abbildung 27: Elutionskurven von Alkylbenzolen

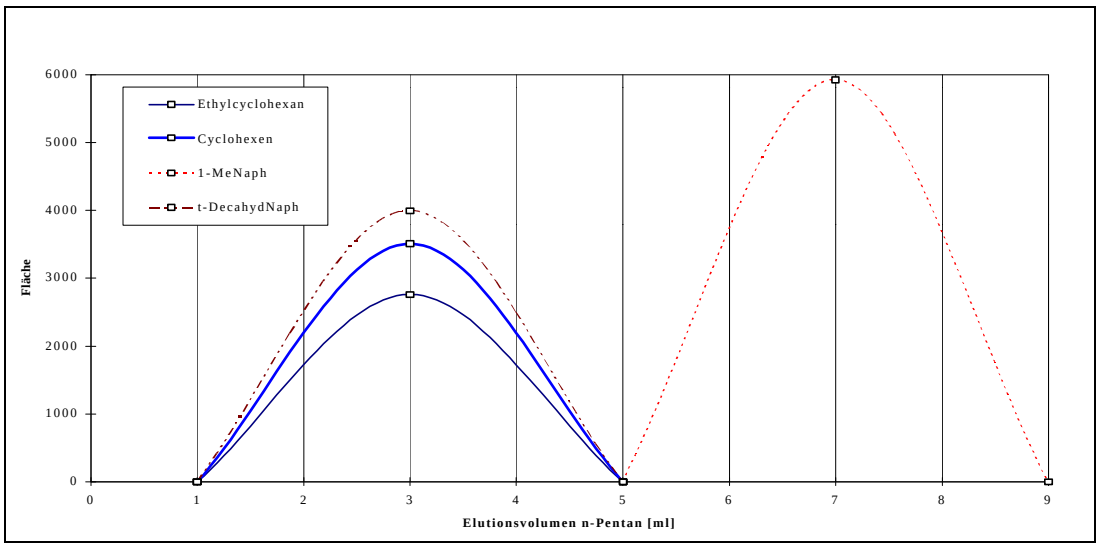


Abbildung 28: Elutionskurven von cyclischen Aliphaten und Diaromaten

Es ist zu erkennen, daß die Elution für alle Substanzen nach 9 ml vollständig abgeschlossen ist. Die Unterteilung der Gesamtprobe in zwei eindeutig abgrenzbare Fraktionen ist möglich. Wie zu ersehen ist, befinden sich in der Fraktion von 1 ml bis 5 ml die aliphatischen Kohlenwasserstoffe und davon scharf getrennt die aromatischen Kohlenwasserstoffe in der zweiten Fraktion von 5 ml bis 9 ml.

12.1.7.6 Wiederfindung in den Standardgemischen

Die Wiederfindungsraten der Festphasenextraktion für alle untersuchten Substanzen des Kerosins wurden mit Standardgemischen bekannter Konzentration ermittelt. Wiederfindungen der untersuchten Substanzen wurden als zufriedenstellend erachtet, wenn sie zwischen 75 und 125 % lagen. Das heißt die Abweichung von der vollständigen Wiederfindung kann ± 25 % betragen. In Tabelle 20 sind die mittleren Wiederfindungen aus 3 Versuchsdurchführungen mit der Festphasenextraktion für alle in den Standardgemischen untersuchten Substanzen angegeben.

Aus Tabelle 20 ist zu erkennen, daß der größte Teil der untersuchten Substanzen zufriedenstellend in den Proben wiedergefunden wird. Unterhalb dem vorgegeben Kriterium von 75 % Wiederfindung liegen lediglich Octan, Ethylbenzol, 1-Hepten, Ethylcyclohexan, Ethynylbenzol, 1,2,3-Trimethylbenzol und o-Xylol. Da keine der ermittelten Wiederfindungen unter 68 % liegt, kann sowohl die benutzte Festphase CN/SiOH als auch das gewählte Elutionsmittel als geeignet betrachtet werden.

Tabelle 20: Wiederfindung der untersuchten Substanzen mit der Festphasenextraktion

Substanz	Retentionszeit [min] am GC/FID	Wiederfindung [%]
Benzol	30,83	**77,6**
Heptan	34,11	**89,9**
Toluol	41,52	**79,1**
Ethylbenzol	54,3	**68,7**
Octan	45,46	**67,9**
Nonan	59,08	**101,8**
Decan	73,87	**111,1**
Undecan	88,85	**82,8**

Substanz	Retentionszeit [min] am GC/FID	Wiederfindung [%]
Dodecan	103,46	**87,4**
Tridecan	117,44	**83,8**
Tetradecan	130,71	**82,8**
Pentadecan	143,34	**98,4**
Hexadecan	167,89	**114,2**
Heptadecan	167,89	**122,8**
1,2,3-Trimethylbenzol	78,49	**69,6**
1-Hepten	33,24	**70,6**
m-/p-Xylol (Koelution)	55,46	**81,8**
4-Ethyltoluol	69,18	**110,3**
1,2,4-Timethylbenzol	73,88	**77,6**
Cyclohexen	32,57	**108,7**
Ethylcyclohexan	50,53	**73,0**
Ethynylbenzol	56,37	**69,0**
Styrol	58,54	**82,7**
o-Xylol	58,9	**72,3**
Propylbenzol	67,87	**94,7**
3-Ethyltoluol	68,97	**118,8**
1,3,5-Trimethylbenzol	69,98	**106,2**
Indan	80,81	**103,4**
Butylbenzol	83,37	**114,7**
t-Decahydronaphtalin	84,19	**103,2**
1-Methylnaphtalin	121,74	**109,9**
1,4-Dimethylnaphtalin	138,58	**90,2**

12.1.7.7 Ergebnisse der Kerosinanalytik

12.1.7.7.1 Bestimmung einer Kerosinprobe von JET A1

12.1.7.7.1.1 Kerosinprobe

Bei der Kerosinprobe handelt es sich um das Kerosin JET A1. Diese Probe wurde am 16.05.97 beim Flughafen Franfurt a. M. genommen. Bei der Probenaufarbeitung wurde wie in Abschn. 12.1.7.4; Kap2. beschrieben vorgegangen. Von dieser Probe wurden zwei parallele Bestimmungen mit der Festphasenextraktion durchgeführt. Die Identifizierung der enthaltenen Kohlenwasserstoffe erfolgte am GC/MS. Am GC/FID wurden die beiden Kerosinfraktionen vermessen und über die zugegebenen internen Standards quantifiziert.

12.1.7.7.1.2 Identifizierung der Kerosinfraktionen am GC/MS

Die erste und zweite Kerosinfraktion wurden mit dem gleichen Temperaturprogramm und der gleichen Trennsäule (siehe Tabelle 19) am GC/MS vermessen. In Tabelle 21 sind die erkannten Verbindungen aufgelistet.

Tabelle 21: Retentionszeiten am GC/MS

Fraktion 1, „Aliphaten“

Substanz	Retentsionszeit [min]
1-Hepten	**26,9**
Octan	**39,8**
Ethylcyclohexan	**44,3**
Chlorbenzol (ISTD 1)	**46,6**
p-/m-Xylol (Blindwert)	**49,8**
1-Nonen	**52,2**
Nonan	**53,7**
3-Methylnonan	*64,5*
Decan	**68,9**
4-Methyldecan	*72,6*
2-Methyldecan	*79,1*
trans-Decahydronaphtalin	**79,2**
Undecan	**84,7**
2-Methylundecan	*94,6*
Dodecan	**100,1**
2,6-Dimethyl-Undecan	*102,3*
2-Methyldodecan	*109,7*
3-Methyldodecan	*110,7*
Tridecan	**115,0**
Tetradecan	**129,1**
Pentadecan	**142,4**
Hexadecan	**155,0**

Retentionszeiten am GC/MS, Fortsetzung

Fraktion 2, „Aromaten“

Substanz	Retentsionszeit [min]
Benzol	**24,7**
Toluol	**36,1**
1,1,2-Trichlorethan (ISTD 2)	**36,4**
Ethylbenzol	**48,8**
p-/m-Xylol	**49,9**
o-Xylol	**53,5**
Propylbenzol	**62,7**
3-Ethyltoluol	**62,9**
4-Ethyltoluol	**63,6**

1,3,5-Trimethylbenzol	**66,8**
1,2,4-Trimethylbenzol	**69,0**
1,2,3-Trimethylbenzol	**73,7**
Butylbenzol	**77,7**
1-Methyl-2-propylbenzol	*77,9*
1,2,3,5-Tetramethylbenzol	*88,5*
Naphtalin	*100,2*
1-Methylnaphtalin	**116,9**
2-Methylnaphtalin	*119,5*
1,3-Dimethylnaphtalin	*134,6*
1,4-Dimethylnaphtalin	**136,6**

Mit der Messung am GC/MS wird eine genaue Identifizierung der in den beiden Fraktionen vorhandenen Substanzen möglich. Zusätzlich werden mit der GC/MS Hinweise auf bisher nicht identifizierte Verbindungen erhalten. Die in Tabelle 21 kursiv geschriebene Verbindungen wurden nicht durch Gegenspritzen eines Einzelstandards validiert. Alle übrigen Substanzen sind validiert. Die Quantifizierung beschränkt sich auf die Auswahl der bereits validierten Einzelsubstanzen.

In Fraktion 1 befinden sich neben den homologen geradkettigen Alkanen auch ein bestimmter Anteil von verzweigten Alkanen. In der Fraktion 2 treten neben den erwarteten Alkylbenzolen weitere höher alkylierte Benzolderivate auf. Außerdem findet sich Naphtalin und mehrere methylierte Diaromaten.

Da die Retentionszeiten am GC/MS im Vergleich zur Detektion mit FID verschoben sind, werden diese anhand der untersuchten Standardgemische (mit bekannten Retentionszeiten für GC/FID) auf GC/FID-Bedingungen übertragen.

12.1.7.7.1.3 Blindwert der Festphasenextraktion

Für die Aufarbeitung von Kerosin sollte ein Blindwert ermittelt werden. Dieser Blindwert enthält zum einen Verunreinigungen, die bereits im Elutionsmittel enthalten sind und solche, die bei der Extraktion aus der Festphase in das Eluat gelangt sind. Durch das Einengen des Eluats von mehreren Millilitern auf 100 µl werden auch die Verunreinigungen aufkonzentriert. Die Erstellung einer Blindwertprobe ist daher unerläßlich.

Zur Bestimmung des Blindwerts sollte, in Anlehnung an die in 12.1.7.4, Kap. 2 beschriebene Aufarbeitung, wie folgt vorgegangen werden:

Nach dem Konditionieren werden auf die Festphasenkartusche je 10 µl der internen Standards Chlorbenzol und 1,1,2-Trichlorethan gegeben. 1 ml n-Pentan wird unter Vakuum durchgesaugt und verworfen. Dann wird mit 8 ml n-Pentan bei leichten Vakuum (Säulenfluß 1 ml/min) eluiert. Das Eluat wird mittels Stickstoff auf 100 µl eingeengt und am GC/FID analysiert.

Die Quantifizierung des Blindwerts erfolgt über den zugegebenen internen Standard. Ein Beispielchromatogramm (GC/MS) des Blindwerts für die Kerosinaufarbeitung findet sich Abbildung 29.

Folgende Substanzen wurden in der Blindwertprobe gefunden: p-/m-Xylol, o-Xylol, Decan und Undecan.

12.1.7.7.2 Quantifizierung der Kerosinprobe

Die Auswertung der Kerosinprobe erfolgt über eine externe Standard-Kalibrierreihe. Zu den vier Verdünnungen der Standardgemische der Kalibrierreihe wird der interne Standard in jeweils gleichen Konzentrationen zugegeben. Es wird eine Kalibrierreihe mit Chlorbenzol (für Fraktion 1) und eine mit 1,1,2-Trichlorethan (für Fraktion 2) erstellt. Die Auswertung verläuft nach folgendem Schema:

- Kalibrierreihe:

$$\frac{C_x}{C_{istd}} = b \cdot \frac{A_x}{A_{istd}} + c$$

C_x	:= Konz. des Einzelstandards [µg/ml]
C_{istd}	:= Konz. des internen Standards [µg/ml]
A_x	:= Fläche des Einzelstandards
A_{istd}	:= Fläche des internen Standards
b, c	:= Steigung und Achsenabschnitt der Regressionsgerade

Auswertung der Probe (P):

$$C_x(P) = \left[b \cdot \frac{A_x(P)}{A_{istd}(P)} + c \right] \cdot C_{istd}(P)$$

$C_x(P)$	:= Konz. der Einzelsubstanz in der Probe [µg/ml]
$C_{istd}(P)$	:= Konz. des internen Standards in der Probe [µg/ml]
$A_x(P)$	:= Fläche der Einzelsubstanz in der Probe
$A_{istd}(P)$	:= Fläche des internen Standards in der Probe

- Berücksichtigung des Blindwerts (B):

Für Substanzen, die im Blindwert vorhanden sind, muß die Blindwertkonzentration anteilmäßig subtrahiert werden.

a) In Fraktion 1: $$C_x(P_{neu}) = C_x(P) - \frac{3{,}5\ \text{ml}}{8\ \text{ml}} \cdot C_x(B)$$

b) In Fraktion 2: $$C_x(P_{neu}) = C_x(P) - \frac{4{,}5\ \text{ml}}{8\ \text{ml}} \cdot C_x(B)$$

$C_x(B)$	:= Konz. der Einzelsubstanz im Blindwert [µg/ml]
$C_x(P_{neu})$	:= blindwertfreie Konzentration in der Probe [µg/ml]

- Konzentration im Kerosin:

$$C_x(K) = \left(\frac{C_x(P_{neu})}{2\,ml \cdot C_K} \right) \cdot 10^{-3}$$

$C_x(K)$:= Konz. der Substanz im Kerosin [mg/g]
C_K := Konzentration des Kerosin in der Kerosin-Probenlösung [g/ml]
Angabe der Substanzkonzentration in Milligramm pro Gramm Kerosin.

12.1.7.8 Exemplarische Ergebnisse der Kerosin-Analytik zur Überprüfung des Verfahrens

12.1.7.8.1 Ergebnisse der Kerosinprobe JET A1 (16.05.97)

Mit dem Verfahren der Festphasenextraktion wurden zwei parallele Bestimmungen der Kerosinprobe JET A1 (16.05.97) durchgeführt. Die Identifizierung und Quantifizierung erfolgte wie in Abschn. 12.1.7.7.2, Kap.2 beschrieben. In Tabelle 22 sind die Konzentrationen aller untersuchten Substanzen als Mittelwert aus den zwei Parallelen angegeben.

Tabelle 22: Substanzkonzentrationen im Kerosin in [mg/g]. Mittelwert aus zwei Parallelen von JET A1 (16.05.97)

Fraktion 1	Mittelwert	Fraktion 2	Mittelwert
	Konz. [mg/g]		Konz. [mg/g]
Heptan	0,0	Benzol	0,4
Octan	7,1	Toluol	2,2
Nonan	28,1	Ethylbenzol	5,7
Decan	49,8	p-/m-Xylol	2,4
Undecan	43,8	o-Xylol	1,4
Dodecan	38,9	Propylbenzol	2,4
Tridecan	26,9	3-Ethyltoluol	2,9
Tetradecan	14,4	4-Ethyltoluol	3,6
Pentadecan	5,9	1,2,3-TriMeBz	10,5
Hexadecan	1,7	1,2,4-TriMeBz	25,5
Ethylcyclohexan	3,0	1,3,5-TriMeBz	2,6
1-Hepten	3,8	Butylbenzol	2,3
1-Nonen	5,9	1-MethylNaph	2,4
t-DecahydNaph	4,5	1,4-DimethylNaph	1,5
SUMME Frakt. 1	**233,7**	**SUMME Frakt. 2**	**65,7**

Die relative Standardabweichungen der Substanzkonzentrationen zwischen den Parallelen betrug in Fraktion 1 nur 0-12 % und für die meisten Substanzen in der zweiten Fraktion 1-40 %, wobei höhere Abweichungen bei Benzol (87 %), o-Xylol (69 %) und 1,4-Dimethylnaphtalin (54 %) auftraten. Die am GC/MS aufgenommenen Chromatogramme von Fraktion 1 und 2 (mit und ohne Angabe der Retentionszeiten) finden sich im „Anhang - Chromatogramme“ zu diesem Abschnitt.

*12.1.7.8.2 Vergleich mit Literaturwerten von [*Schlatter et al.*]*

Die bestimmten Substanzen stellen zusammen ungefähr zwei Drittel der im Kerosin enthaltenen Kohlenwasserstoffe. Das restliche Drittel von Kerosin besteht aus verzweigten Alkanen, weiteren Alkylbenzolen und Naphtalenderivaten. In Tabelle 23 ist ein Vergleich mit den von [*Schlatter et al.*] gefundenen Flächenanteilen im Kerosin gezeigt.

[*Schlatter et al.*] untersuchten Kerosin mit der Hot-soak-Methode. Die in Tab. 23 aufgelisteten Substanzen entsprechen etwa ein Drittel der von ihnen gefundenen Kerosinsubstanzen. Decan, Undecan und Dodecan stellen nach ihren Aussagen den Hauptanteil von Kerosin. Beim Vergleich der Zusammensetzung dieser Substanzauswahl mit den Ergebnissen dieser Arbeit sind insgesamt keine größeren Abweichungen festzustellen. Lediglich Toluol liegt um Faktor 30 und Ethylbenzol um Faktor 40 höher als der von [*Schlatter et al.*] gefundenen Wert. Das Verhältnis Toluol/Benzol beträgt nach dieser Arbeit 3:1, während [*Schlatter et al.*] ein Verhältnis von 1:5 finden.

Wie aus Tabelle 22 zu erkennen ist, müssen Tridecan, Tetradecan, 1,2,3- und 1,3,5-Trimethylbenzol ebenfalls zu den Hauptkomponenten des Kerosins gezählt werden.

Tabelle 23: Flächenanteile der Hauptkomponenten im Kerosin

	Diese Arbeit	*Schlatter et al.*
Substanzen	**Flächen-%**	**Flächen-%**
Hexan	<0,01	<0,01
Benzol	0,11	0,05
Heptan	<0,01	0,14
Toluol	0,34	<0,01
Octan	0,92	0,72
Ethylbenzol	0,44	<0,01
p-/m-Xylol	1,64	0,54
o-Xylol	0,98	0,58
Nonan	4,48	2,71
1,2,4-TriMeBz	1,05	2,42
Decan	8,85	8,12
Undecan	6,87	10,73
Dodecan	7,66	7,73
SUMME	33,00	34,00

Aus den Flächenanteilen aller untersuchten Kohlenwasserstoffe dieser Arbeit läßt sich folgende mittlere prozentuale Zusammensetzung von zwei Drittel des Kerosins ableiten:

Alkane	77,3 %
Alkene	1,5 %
Monoaromaten	18,1 %
Diaromaten	3,1 %

12.1.7.8.3 ANHANG - Chromatogramme

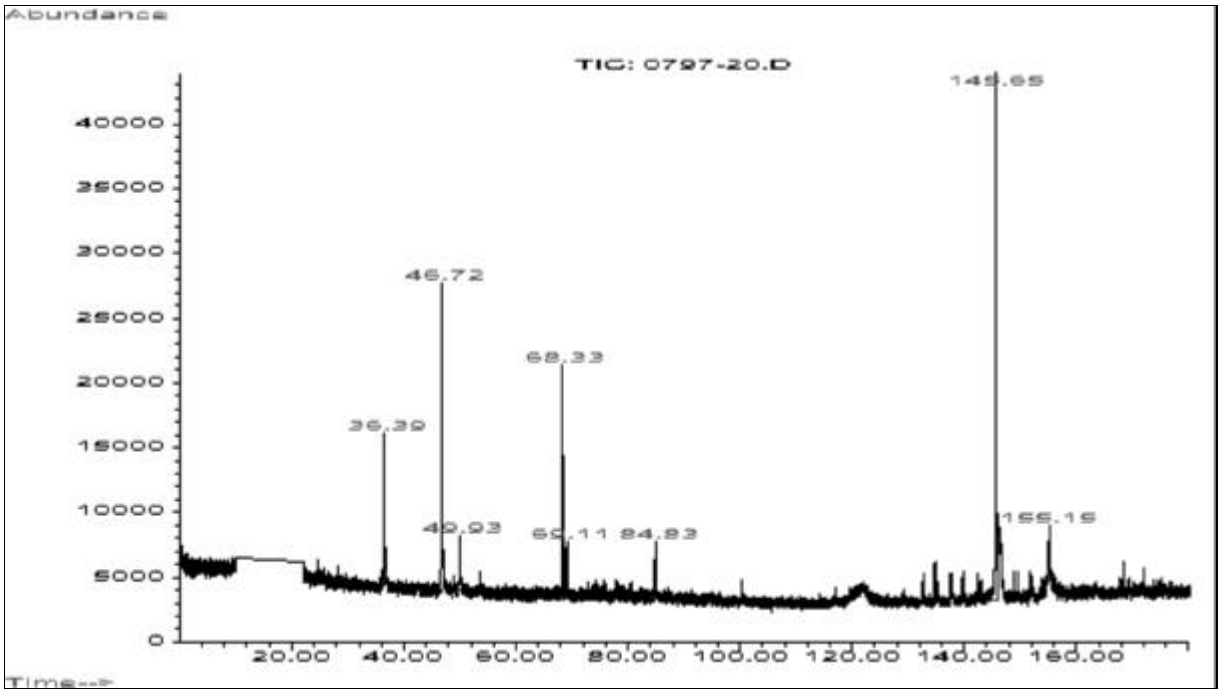


Abbildung 29: GC/MS-Chromatogramm des Blindwerts der Festphasenextraktion (FB4)

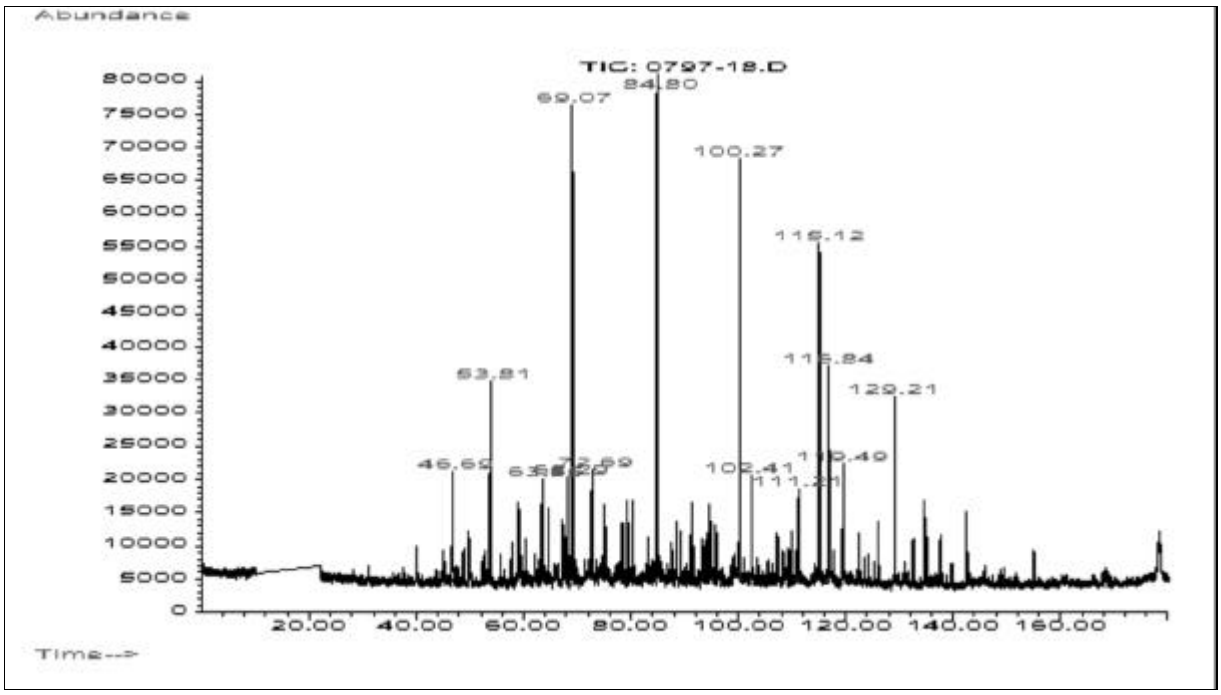


Abbildung 30: GC/MS-Chromatogramm der Kerosinfraktion 1 (F15) mit Angabe der Retentionszeiten

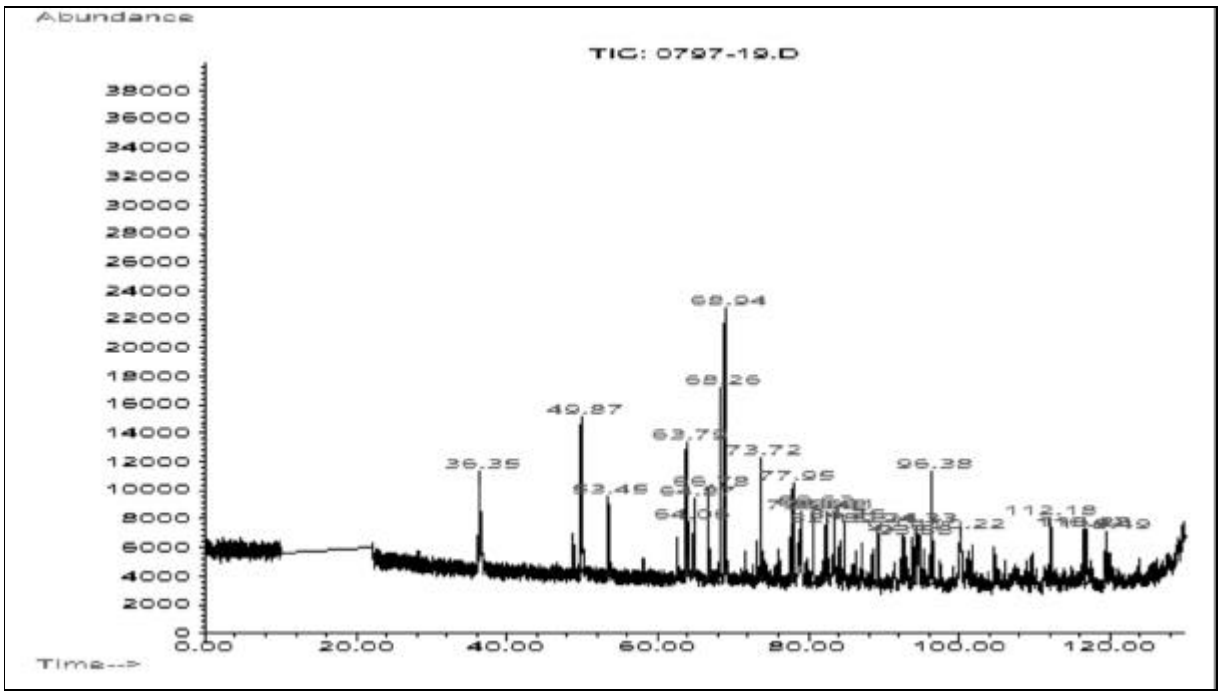


Abbildung 31: GC/MS-Chromatogramm der Kerosinfraktion 2 (F14) mit Angabe der Retentionszeiten

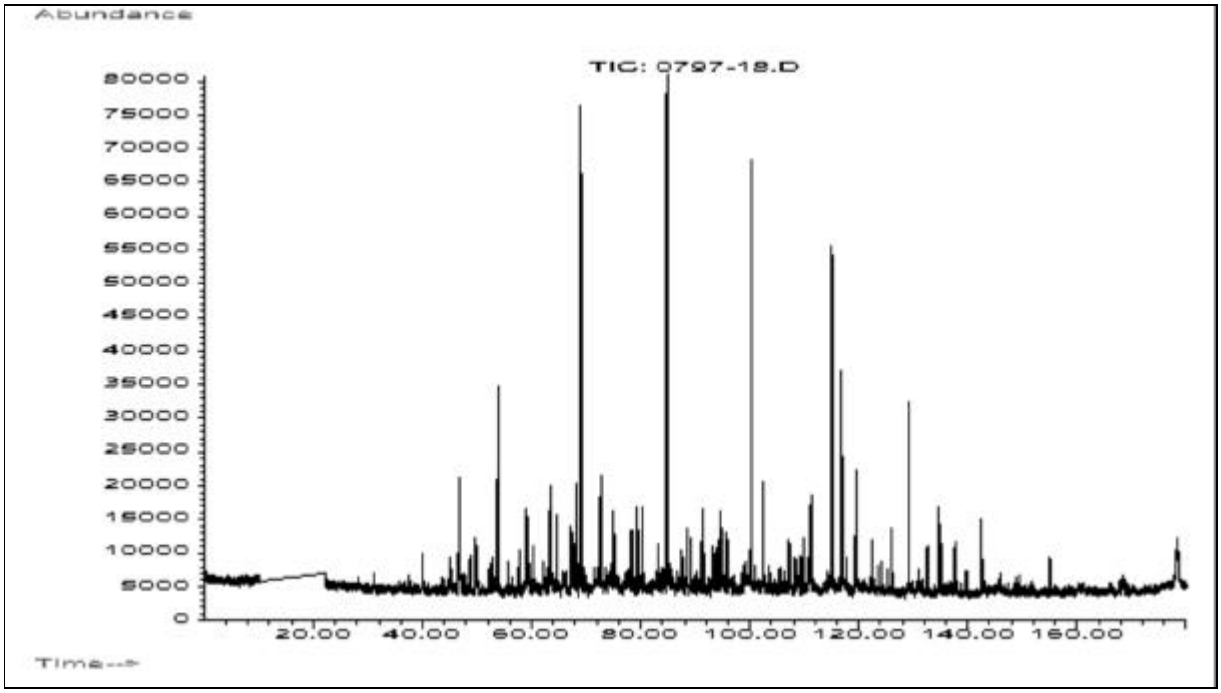


Abbildung 32: GC/MS-Chromatogramm der Kerosinfraktion 1 (F15) ohne Angabe der Retentionszeiten

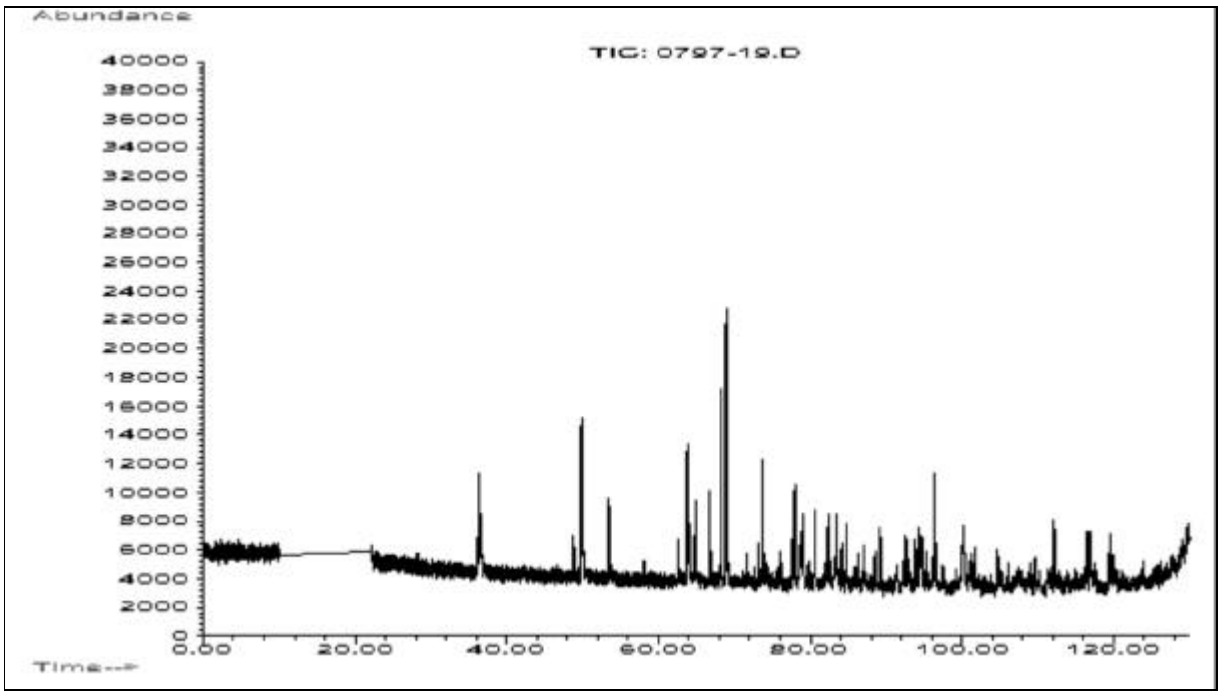


Abbildung 33: GC/MS-Chromatogramm der Kerosinfraktion 2 (F14) ohne Angabe der Retentionszeiten

13 KONTINUIERLICHE MESSWERTERFASSUNG

Für eine Reihe von Meßgrößen bestand im Rahmen dieses Projektes die Möglichkeit der ständigen Ermittlung und Registrierung. Dies war insbesondere deshalb von Vorteil, weil wie bereits erwähnt eine z.T. sehr komplexe Termindisposition einerseits und andererseits die Tatsache, daß die Probenehmer nicht ständig vor Ort sein konnten, bei diskontinuierlich nicht erfaßbaren Prüfläufen zumindest ein Grunddatensatz erfaßt wurde. Aus diesem Grunddatensatz war schließlich eine Plausibilitätsbetrachtung möglich, die den Schluß zuläßt, daß keine Abweichungen in der Art der Prüfung bei allen geprüften Triebwerken vorlag.

Über einen Zeitraum von nahezu zwei Jahren wurden folgende Meßgrößen ständig erfaßt:

- Differenzdruck am Luftansaugturm in vier unterschiedlichen Höhen
- VOC in der angesaugten Außenluft
- Außentemperatur und Luftfeuchte
- Differenzdruck am Übergang zwischen Abgasrohr und Rieselrohr an zwei Stellen
- Abgastemperatur an 8 Probeentnahmestellen für diskontinuierliche Beprobung
- VOC im Abgas der geprüften Triebwerke
- Luftdruck (Barometerstand)
- Außentemperatur
- NOx, SO_2, CO_2, O_2, und CO im Abgas der geprüften Triebwerke

Die v.g. Meßgrößen wurden im 5 Sekundentakt ermittelt und zunächst zu 1 Minutenmittelwerten verdichtet und archiviert. Mittels Datenfernübertragungsmodul bestand jederzeit die Möglichkeit, die archivierten Daten in die Außenstelle der Hessischen Landesanstalt für Umwelt zu übertragen, sie dort zu analysieren und Entscheidungen zu treffen. Ebenso konnte der jeweilige Status der kontinuierlich registrierenden Meßeinrichtungen abgefragt werden und Funktionsstörungen oder gar Geräteausfälle sofort erkannt werden.

In die Bewertung konnten somit über die gesamte Meßzeit gesehen ca. 140 Prüfläufe einbezogen werden.

Beprobte Triebwerke	CF6-50E2/C2	CFM56-3B1	CFM56-3B2	CFM56-3C1
Prozent	63	16	14	7

Nachfolgend werden die Meßverfahren, die im Rahmen der kontinuierlichen Meßwertermittlung eingesetzt wurden, kurz skizziert.

13.1 Differenzdruckmessung im Rahmen der Zuluft- und Abgasgeschwindigkeitsermittlung

Folgende Geräte wurden eingesetzt:
4 Stck. Digital-Handmanometer der Fa. Debro Meßtechnik GmbH; 40670 Meerbusch

Meßbereich:	0-100 hPa
Baujahr:	1995
TYP:	DP 200
SN-Nr.:	DD 4065/DD4066/DD4067/DD4068
Genauigkeit:	0,25 % vom Endwert

Ausgang: 0-1 V DC
Einbauort: Meßhaus

1 Stck. Digital-Handmanometer der Fa. Debro Meßtechnik GmbH; 40670 Meerbusch
Meßbereich: 0-20 hPa
Baujahr: 1995
TYP: DP 200
SN-Nr.: DD 3063
Genauigkeit: 0,25 % vom Endwert
Ausgang: 0-1 V DC
Einbauort: Ansauggitter des Triebwerkprüfstandes

1 Stck. Digital-Handmanometer der Fa. Debro Meßtechnik GmbH; 40670 Meerbusch
Meßbereich: 0-20 hPa
Baujahr: 1995
TYP: DP 205
SN-Nr.: DD 3064
Genauigkeit: < 0,1 % vom Endwert
Ausgang: 0-1 V DC
Einbauort: Ansauggitter des Triebwerkprüfstandes

2 Stck. Digital-Mikromanometer der Fa. Müller; Rheinbach bei Bonn
Meßbereich: 0-2000 Pa
Baujahr: 1990
TYP: MP6 KSR
SN-Nr.: keine
Genauigkeit: < 0,1 % vom Endwert
Ausgang: 0-2 V DC
Einbauort: vor Ansauggitter des Triebwerkprüfstandes

4 Stck. Meßumformer im Gehäuse der Fa. Jumo GmbH, 36035 Fulda
Baujahr: 1995
TYP: TMM 45/11,01,00,52
SN-Nr.: keine
Abweichung: 0,05 % vom Endwert
Eingang: 0-1 V DC
Ausgang: 0-20 mA zur Datenerfassung im Meßwagen
Einbauort: Meßhaus

4 Stck. Meßumformer im Gehäuse der Fa. Jumo GmbH, 36035 Fulda
Baujahr: 1995
TYP: TMM 45/11,01,00,52
SN-Nr.: keine
Abweichung: 0,05 % vom Endwert
Eingang: 0-1 V DC
Ausgang: 0-20 mA zur Datenerfassung im Meßwagen
Einbauort: vor Ansauggitter des Triebwerkprüfstandes

1 Stck. Flügelrad Anemometer der Fa. Höntzsch GmbH, 71303 Waiblingen

Typ:	µP-Flowtherm
Baujahr:	1995
SN-Nr.:	0295
Meßbereich v:	0-120 m/s
Meßbereich t:	-12,5 - +87,5 °C
Genauigkeit:	1,5 % vom Endwert
Ausgänge:	2 x 0-4 V zur Datenerfassung Meßwagen
Einbauort:	vor Ansauggitter des Triebwerkprüfstandes

1 Stck. Vortex-Meßaufnehmer der Fa. Höntzsch GmbH, 71303 Waiblingen

Typ:	VAT 40/30 GE 20 m/s 180/p3Ex
Baujahr:	1995
SN-Nr.:	31098763
Meßbereich v:	0-20 m/s
Meßbereich t:	-25 - +180 °C
Genauigkeit:	1,5 % vom Endwert
Ausgänge:	2 x 0-20 mA zur Datenerfassung Meßwagen
Einbauort:	vor Ansauggitter des Triebwerkprüfstandes (zeitweise)

13.2 Temperaturmessung in der Außenluft und im Abgas von Triebwerken

Außen- und Meßhaustemperatur wurden mit Pt 100 Widerstandsthermometern in 4-Leiterschaltung an Meßumformer der Fa. Thies, Göttingen angeschlossen.

Typ:	2.1082.10.080
Meßbereich:	-30 - +50 °C bzw. 0 - 300 °C
Ausgang:	0-20 mA zur Datenerfassung
Linearität:	0,2 % vom Meßbereich
Einbauort:	Umformer im Rack des klimatisierten Meßwagen

Temperaturen im Abgas der Triebwerke wurden mit NiCrNi-Thermoelementen gemessen.
Hierzu wurden die Themoelemente aus dem Abgaskanal in das Meßhaus geführt und auf Meßumformer der Fa. Hartmann & Braun, Frankfurt geführt.

Typ:	Geatherm VUY 201
Baujahr:	1976
Eingang:	0...5 mV, 0...500 mV
Ausgang:	0-20 mA zur Datenerfassung
Meßfehler:	< 0,5 %
Einbauort:	Meßumformer in Gehäuse im Meßhaus, Thermoelemente im Abgaskanal.

13.3 Luftdruck und Feuchtegehalt der Außenluft, Feuchtegehalt des Abgases von Triebwerken

Luftdruck-Barogeber der Fa. Thies, Göttingen

Typ:	3/79

Baujahr:	1987
Meßelement:	Aneroid-Dosensatz,temp.-komp.
SN:	keine
Meßbereich:	946 bis 1053 hPa
Ausgang:	0,945...1,052 V auf Meßumformer zur Datenerfassung
Einbauort:	Rack im klimatisierten Meßwagen

Die Feuchtigkeit der Außenluft wurde mit einer transportablen Wetterstation der HLfU-Wiesbaden gemessen.

13.4 Messung von NO_x

Die Ermittlung der Massenkonzentration von NO/NO2 erfolgte mit Hilfe einer Meßeinrichtung vom Typ UNOR 610

Meßverfahren:	Kontinuierlich arbeitender, selektiver, nicht dispersiver IR-Gasanalysator.
Hersteller:	Firma Maihak AG, 22303 Hamburg, Semperstr. 38
Typ:	UNOR 610
Baujahr:	1995
Geräte-Nr.:	900551
Aufstellungsort:	Klimatisierter Meßwagen der HLfU, in unmittelbarer Nähe zum Emissionsort
Umgebungstemperatur:	ca. 20 °C; zulässige Umgebungstemperatur +5 - +45 °C
Wartungszyklus:	1 mal wöchentlich, bzw. in kürzerem Intervall, sofern über DFÜ eine Störung erkennbar war.
Art der Referenzpunktkontrolle:	manuell
eingestellter Meßbereich:	0 - 550 mg/m³
Gerätetyp eignungsgeprüft:	Eignungsprüfungsbericht des Rheinisch-Westfälischen Überwachungs-Verein e.V., Nr.: 1165/89 179232/01-NO-610 vom 08.03.1993 GMBl. 1993, Nr.26, Seite 468
Einfluß von Begleitstoffen:	hier CO_2, NO_2, SO_2, NH_3 und H_2O = Summenquer-empfindlichkeit < 0,05 % vom Meßbereichsendwert
Einstellzeit:	< 90 sec
Nachweisgrenze:	< 2 % vom Anzeigebereich
zeitliche Veränderung der Nullpunktanzeige:	< 2 %

Registriereinrichtung: Die aktuellen Meßdaten der Meßeinrichtung wurden mit Hilfe Programmmodules ANACOMP® im Datenerfassungsprogramm ANAVIS® im 5 Sekundentakt erfaßt und zu 1 Minuten-Mittelwerten verdichtet. Mit dem Erfassungsprogramm ANAVIS® wurden diese Daten für jeden Prüflauf visualisiert (siehe Materialiensammlung auf beiliegender CD-ROM). Ebenso wurden die erhaltenen Meßdaten mit dem Datenerfassungsprogramm ANAZENT® via Datenfernübertragungsmodul an die Außenstelle Kassel der HLfU übertragen.

13.5 Messung von SO_2

Meßverfahren:	nicht-dispersive Ultraviolett-Absorption (NDUV-Photometer)
Hersteller:	Firma Maihak AG, 22303 Hamburg, Semperstr. 38
Typ:	Defor 3

Baujahr: 1993

Geräte-Nr. 870116

Aufstellungsort:	Klimatisierter Meßwagen der HLfU, in unmittelbarer Nähe zum Emissionsort
Umgebungstemperatur:	ca. 20 °C; zulässige Umgebungstemperatur +5 - +40 °C
Wartungszyklus:	1 mal wöchentlich, bzw. in kürzerem Intervall, sofern über DFÜ eine Störung erkennbar war.
Art der Referenzpunktkontrolle:	manuell
eingestellter Meßbereich:	0-200 mg/m³
Gerätetyp eignungsgeprüft:	Eignungsprüfungsbericht des TÜV-Norddeutschland e.V. Nr. 128CG01770 vom 13.03.1990; GMBl.1993 Nr.26 Seite 468
Einfluß von Begleitstoffen:	< 4 % vom Meßbereichsendwert
Einstellzeit:	90 % Zeit < 160 sec
Nachweisgrenze:	< 0,7 % vom Meßbereichsendwert
zeitliche Veränderung der Nullpunktanzeige:	< 1,3 % vom Meßbereichsendwert

Registriereinrichtung: Die aktuellen Meßdaten der Meßeinrichtung wurden mit Hilfe Programmmodules ANACOMP® im Datenerfassungsprogramm ANAVIS® im 5 Sekundentakt erfaßt und zu 1 Minuten-Mittelwerten verdichtet. Mit dem Erfassungsprogramm ANAVIS® wurden diese Daten für jeden Prüflauf visualisiert (siehe Materialiensammlung auf beiliegender CD-ROM). Ebenso wurden die erhaltenen Meßdaten mit dem Datenerfassungsprogramm ANAZENT® via Datenfernübertragungsmodul an die Außenstelle Kassel der HLfU übertragen.

13.6 Messung von CO

Meßverfahren:	NDIR-Prinzip, 2 Strahl-Wechsellicht Photometer mit gegenseitiger Modulation
Hersteller:	Fa. Hartmannn & Braun
Typ:	Uras 3 G
Baujahr:	1985
Geräte-Nr.:	31534182
Aufstellungsort:	Klimatisierter Meßwagen der HLfU, in unmittelbarer Nähe zum Emissionsort
Umgebungstemperatur:	ca. 20° C; zulässige Umgebungstemperatur +5 - +35°C
Wartungszyklus:	1 mal wöchentlich, bzw. in kürzerem Intervall, sofern über DFÜ eine Störung erkennbar war.
Art der Referenzpunktkontrolle:	manuell
eingestellter Meßbereich:	0- 250 mg/m³
Gerätetyp eignungsgeprüft:	Eignungsprüfungsbericht des TÜV-Bayern Nr. D1-WUC30-Dr.bra-ru 1146262 vom 22.101980,Nr.D1-WUC 30 Dr.bra-sch 1171160 vom 11.3.1981 und Nr. 1357697 vom 2.3.1987; GMBl.1990 Nr. 12 Seite 235
Einfluß von Begleitstoffen :	Bei Begleitgasen, die eine über das Maß hinausgehende Meßwertanzeigeänderung bewirken, sind zusätzliche Selektivierungsmaßnahmen erforderlich.(Interferenzfilter)
Einstellzeit:	< 50 sec
Nachweisgrenze:	< 1 % vom Meßbereichsendwert
zeitliche Veränderung der Nullpunktanzeige:	< 1 %

Registriereinrichtung: Die aktuellen Meßdaten der Meßeinrichtung wurden mit Hilfe Pro-

grammmodules ANACOMP® im Datenerfassungsprogramm ANAVIS® im 5 Sekundentakt erfaßt und zu 1 Minuten-Mittelwerten verdichtet. Mit dem Erfassungsprogramm ANAVIS® wurden diese Daten für jeden Prüflauf visualisiert (siehe Materialiensammlung auf beiliegender CD-ROM). Ebenso wurden die erhaltenen Meßdaten mit dem Datenerfassungsprogramm ANAZENT® via Datenfernübertragungsmodul an die Außenstelle Kassel der HLfU übertragen.

13.7 Messung von CO_2

Meßverfahren:	Nicht-dispersive Infrarot-(NDIR)-Absorptionsmethode
Hersteller:	Firma Maihak AG, 22303 Hamburg, Semperstr. 38
Typ:	UNOR 6N
Baujahr:	1990
Geräte-Nr.:	795394
Aufstellungsort:	Klimatisierter Meßwagen der HLfU, in unmittelbarer Nähe zum Emissionsort
Umgebungstemperatur:	ca. 20 °C; zulässige Umgebungstemperatur 0 - +40 °C
Wartungszyklus:	1 mal wöchentlich, bzw. in kürzerem Intervall, sofern über DFÜ eine Störung erkennbar war.
Art der Referenzpunktkontrolle:	manuell
eingestellter Meßbereich:	0-5 Vol. %
Gerätetyp eignungsgeprüft:	Für CO_2- Geräte werden keine Eignungsprüfungen durchgeführt.

Registriereinrichtung: Die aktuellen Meßdaten der Meßeinrichtung wurden mit Hilfe Programmmodules ANACOMP® im Datenerfassungsprogramm ANAVIS® im 5 Sekundentakt erfaßt und zu 1 Minuten-Mittelwerten verdichtet. Mit dem Erfassungsprogramm ANAVIS® wurden diese Daten für jeden Prüflauf visualisiert (siehe Materialiensammlung auf beiliegender CD-ROM). Ebenso wurden die erhaltenen Meßdaten mit dem Datenerfassungsprogramm ANAZENT® via Datenfernübertragungsmodul an die Außenstelle Kassel der HLfU übertragen.

13.8 Messung von O_2

Meßverfahren:	Paramagnetische Suszeptibilität des Meßgases mittels einer Meßzelle magnetdynamischen Types.
Hersteller:	Bühler Meß- und Regeltechnik GmbH, 4030 Ratingen
Typ:	OA 540
Baujahr:	1987
Geräte-Nr.:	712/3553G
Aufstellungsort:	Klimatisierter Meßwagen der HLfU, in unmittelbarer Nähe zum Emissionsort
Umgebungstemperatur:	ca. 20 °C; zulässige Umgebungstemperatur +5 - +40 °C
Wartungszyklus:	1 mal wöchentlich, bzw. in kürzerem Intervall, sofern über DFÜ eine Störung erkennbar war.
Art der Referenzpunktkontrolle:	manuell
eingestellter Meßbereich:	0- 25 Vol. %
Gerätetyp eignungsgeprüft:	Eignungsprüfungsbericht des Rheinisch-Westfälischen TÜV Nr. 3.5.2/667/86-337292 vom 08.06. GMBl. 1990 Nr. 12 Seite 239
Einfluß von Begleitstoffen:	< 0,2 Vol. % vom Endwert

Einstellzeit:	< 30 sec.
Nachweisgrenze:	< 0,2 Vol. %
zeitliche Veränderung der Nullpunktanzeige:	2 %

Registriereinrichtung: Die aktuellen Meßdaten der Meßeinrichtung wurden mit Hilfe Programmmodules ANACOMP® im Datenerfassungsprogramm ANAVIS® im 5 Sekundentakt erfaßt und zu 1 Minuten-Mittelwerten verdichtet. Mit dem Erfassungsprogramm ANAVIS® wurden diese Daten für jeden Prüflauf visualisiert (siehe Materialiensammlung auf beiliegender CD-ROM). Ebenso wurden die erhaltenen Meßdaten mit dem Datenerfassungsprogramm ANAZENT® via Datenfernübertragungsmodul an die Außenstelle Kassel der HLfU übertragen.

13.9 VOC-Messung in der Außenluft und im Abgas von Triebwerken

Meßverfahren:	Flammenionisationsdetektor
Hersteller:	Fa. Bernath-Atomic,Wennigsen
Typ:	FID Typ BA 3006/ FID Typ BA 3004
Baujahr:	1995/1986
Geräte-Nr.:	3072/626
Aufstellungsort:	Isoliertes Meßhaus in unmittelbarer Nähe zum Emissionsort, bzw. klimatisierter Meßwagen der HLfU, Probenahme Umgebung Ansauggitter.
Umgebungstemperatur:	ca. 20 °C; zulässige Umgebungstemperatur: +5 - +35 °C
Wartungszyklus:	1 mal wöchentlich, bzw. in kürzerem Intervall, sofern über DFÜ eine Störung erkennbar war.
Art der Referenzpunktkontrolle:	manuell
eingestellter Meßbereich:	0-164 mg/m³ C / 0-164 mg/m³ C
Gerätetyp eignungsgeprüft:	Eignungsprüfungsbericht des TÜV-Norddeutschland Nr.:128 CO 00530 vom 27.7.1987 und Nr. 128 CU 00580 vom 8.8.1988; GMBl. von 1996 Nr.8 Seite 188 / GMBl. von 1990 Nr.12 Seite 239
Einfluß von Begleitstoffen:	< 4 % vom Meßbereichsendwert
Einstellzeit:	< 50 sec
Nachweisgrenze:	< 2 % vom Anzeigebereich
zeitliche Veränderung der Nullpunktanzeige:	< 2 % vom Meßbereichsendwert

Registriereinrichtung: Die aktuellen Meßdaten der Meßeinrichtung wurden mit Hilfe Programmmodules ANACOMP® im Datenerfassungsprogramm ANAVIS® im 5 Sekundentakt erfaßt und zu 1 Minuten-Mittelwerten verdichtet. Mit dem Erfassungsprogramm ANAVIS® wurden diese Daten für jeden Prüflauf visualisiert (siehe Materialiensammlung auf beiliegender CD-ROM). Ebenso wurden die erhaltenen Meßdaten mit dem Datenerfassungsprogramm ANAZENT® via Datenfernübertragungsmodul an die Außenstelle Kassel der HLfU übertragen.

13.10 EINSATZ ZERTIFIZIERTER PRÜFGASE

Für die unter Nr. 13.4 bis 13.9 dargestellten Meßverfahren wurden für die Überprüfung der Analysenfunktion der eingesetzten kontinuierlich registrierenden Meßeinrichtungen zertifizierte Prüfgase verwendet. Die Fristen der Zertifizierung wurden überwacht. Nach Ablauf der Zertifizierungsfrist wurden die Prüfgase durch neue, meßbereichsorientierte, zertifizierte Prüfgase ersetzt.

13.11 Meßgasaufbereitung

Funktionsprinzip: Kühlen-Filtern-Trocknen

Typ:	GOT 200WR
Geräte-Nr.:	92006
Baujahr:	1992
Aufstellungsort:	Klimatisierter Meßwagen der HLfU, in unmittelbarer Nähe zum Emissionsort
Hersteller:	Gröger & Obst, 8137 Berg 2, Marienstr.4
Kühlung:	Elektro-Gaskühler mit funktionsüberwachtem Peltier-Element und zwei Zyklon-Wärmetauschern.
Kühltemp.:	5 - 8 °C geregelt
Filterung:	Zwei-Kammer-Tiefenfilter und Membranfeinfilter < 10 µm
Durchfluß:	50-250 l/h
Trocknung:	Permeationstrockner
Gerätetyp eignungsgeprüft:	TÜV Bayern Nr. 15431800 v. Febr. 91

13.12 Datenfernübertragung kontinuierlich ermittelter Messwerte

Im Zusammenhang mit der kontinuierlichen Erfassung bestimmter Abgasbestandteile und Zustandsgrößen an der Triebwerkstandlaufeinrichtung wurde ein **M**eßwert-**E**rfassungs-, **V**erarbeitungs- und **I**nformations-**S**ystem (MEVIS) mit den Programmkomponenten ANACOMP®, ANAVIS® und ANAZENT® eingesetzt.

MEVIS ist ein Meßwert- Erfassungs-, Verarbeitungs- und Informations-System für Meteorologie- und Umweltdaten.

MEVIS bietet verschiedene Möglichkeiten der Verarbeitung (mehrstufige Mittelwertbildung bis zu einem Jahr, unterschiedliche farbige Verlaufsgrafiken, Korrelations- und Windrosendarstellungen) und Ausgabe (Ausgabe über MEVIS-unabhängige Windows-Treiber auf fast beliebige Drucker und Plotter, Datenbankausgabe, Reporterstellung) der Meßdaten.

Kurzbeschreibung ANACOMP / ANAVIS / ANAZENT

Die vor Ort kontinuierlich gemessenen Werte (Abgase, Abgasgeschwindigkeit,Temperaturen u.s.w.) werden über entsprechnede Schnittstellen durch das Programm ANACOMP zyklisch übernommen. Mit dem DOS-Programm ANACOMP (Fa. Breitfuss Messtechnik GmbH) erfolgt im PC die Aufbereitung und Bereitstellung der Daten für die Weiterverarbeitung mit ANAVIS. Bei dem hier beschriebenen Projekt wurden zwei Analog/Digitalwandlerkarten vom Typ: ME 16 mit jeweils 16 Kanälen eingesetzt. Zur Datenaufnahme diente ein PC mit Pentium® 166 Mhz mit 16 MB Arbeitsspeicher und 1,7 GB Festplatte.

- ANACOMP arbeitet in einem DOS-Fenster von WINDOWS®.
  - Durch ANACOMP werden:
  - in jeder Minute für jeden aktiven Kanal ein Meßwert mit Statusinformationen,
  - nach Ablauf des in ANACOMP eingestellten “Meßintervalls 1” (in der Regel 30 Minuten) für jeden aktiven Kanal ein Mittelwert mit Statusinformationen,
  - nach Ablauf eines Kalibrierzyklusses Kalibrierwerte der kalibrierten Kanäle und

- nach Konfigurationsänderungen Angaben zu den Kanälen für die Übernahme durch ANAVIS bereitgestellt.

ANAVIS und ANAZENT sind WINDOWS®-Anwendungen.

- ANAVIS
  - prüft zyklisch, ob von ANACOMP Daten bereitgestellt werden,
  - wertet bereitgestellte Daten aus und speichert sie ab und stellt sie kanalbezogen dar,
  - stellt die vom Nutzer gewünschten Informationen als Tabellen, zeitbezogene Korrelationsgrafiken oder Listen dar und aktualisiert diese ggf. bei Eingang neuer Daten,
  - überträgt auf Anforderung die benötigten Konfigurations-, Meß-, Mittelwert- und Kalibrierdaten an die Zentrale,
  - kann Grafiken, Listen oder Reports über Drucker ausgeben
  - bereitet Grafiken in Form von WMF-Dateien für die Verwendung in anderen Applikationen auf
  - kann gemessene Werte als dBase- Datei bereitstellen,
- übernimmt Befehle (z.B. zum Kalibrieren) von der Zentrale und leitet sie an ANACOMP zur Ausführung weiter.

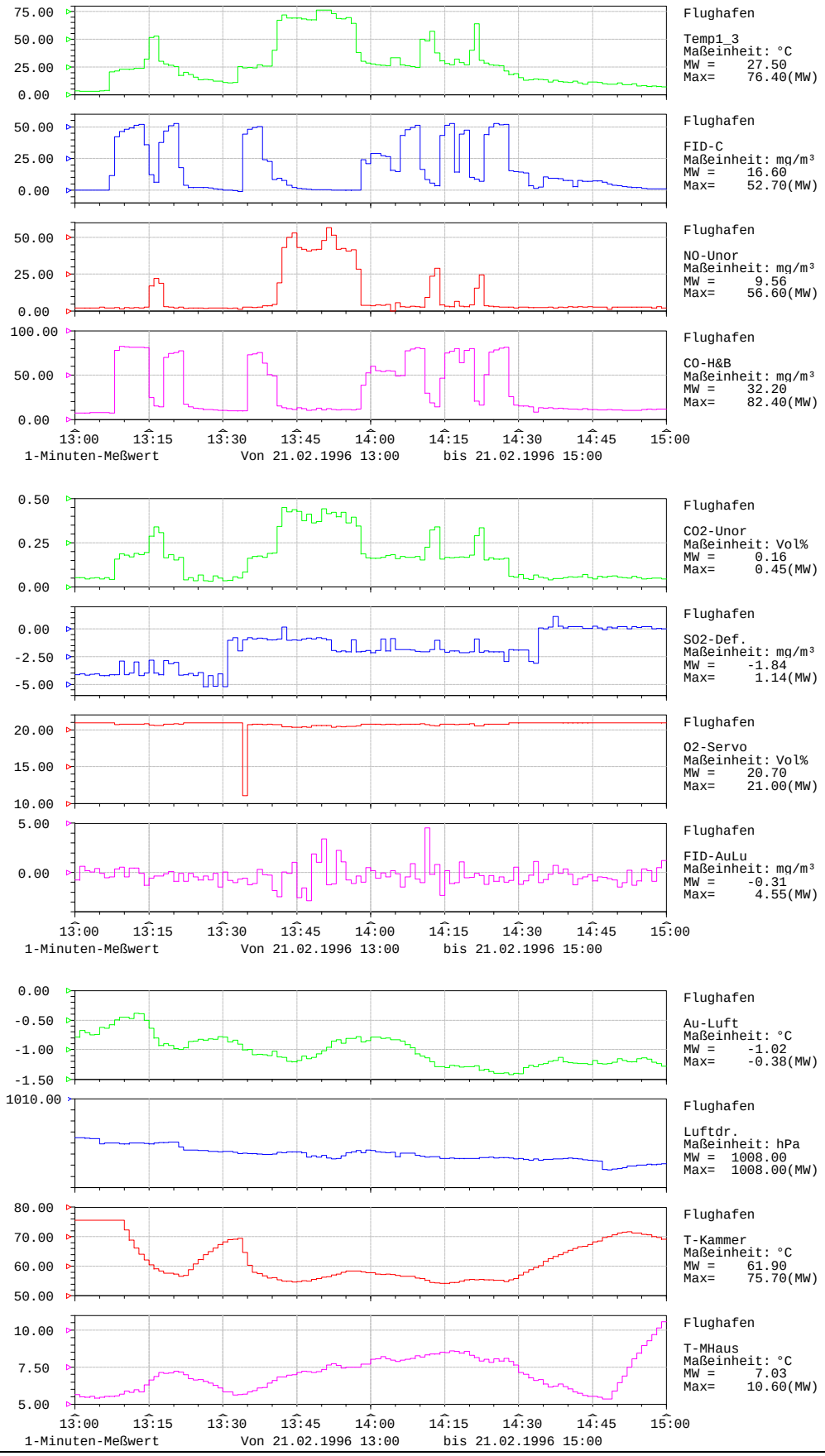
- ANAZENT

Die Verwaltung der Daten der Meßstation (Emissions-Meßzug vor Ort) erfolgt von einer Zentrale (hier: HLfU-Kassel) mit dem Programm ANAZENT. Die Zentrale kann automatisch oder auf Bedienerbefehl Daten von der Vor-Ort-Meßstation übernehmen und dieser Steuerbefehle übermitteln.

Dazu wird vom Programm ANAZENT eine Modem-Verbindung zur Meßstation aufgebaut und eine Datenübertragung veranlaßt. Durch die Datenübermittlung entstehen in der Zentrale identische Abbilder von Daten der Meßstation (Emissions-Meßzug, Standort: Triebwerkstandlaufeinrichtung Frankfurt-Flughafen)

Mit Hilfe dieses Systems war es möglich, während der gesamten Dauer des Projektes alle Prüfaktivitäten an der betreffenden Triebwerkstandlaufeinrichtung zu überwachen. Die in Abschn. 13.1 bis 13.9 beschriebenen kontinuierlich registrierenden Meßeinrichtungen waren an dieses Erfassungs- und Verarbeitungssystem angeschlossen. Meßwerte wurden im 5 Sekundentakt während 24 Stunden am Tag ermittelt, zu Minutenmittelwerten verdichtet und waren dann stattgefundenen Triebwerksprüfläufen exakt zuzuordnen. Die erhaltenen Meßdaten lassen sich in Form einschlägiger Grafiken visualisieren.

Nachfolgend wird in Abbildung 34 beispielhaft eine nach der oben beschriebenen Vorgehensweise erhaltene Auswertung der kontinuierlich erfaßten und mittels Datenfernübertragung übermittelten Meßdaten dargestellt. Für alle innerhalb des gesamten Meßprogrammes erfaßten Prüfläufe finden sich die entsprechenden Daten im Materialienband zu dieser auf der beiliegenden CD-ROM.


Flughafen
Temp1_3
Maßeinheit: °C
MW = 27.50
Max= 76.40(MW)
Flughafen
FID-C
Maßeinheit: mg/m³
MW = 16.60
Max= 52.70(MW)
Flughafen
NO-Unor
Maßeinheit: mg/m³
MW = 9.56
Max= 56.60(MW)
Flughafen
CO-H&B
Maßeinheit: mg/m³
MW = 32.20
Max= 82.40(MW)
13:00 13:15 13:30 13:45 14:00 14:15 14:30 14:45 15:00
1-Minuten-Meßwert Von 21.02.1996 13:00 bis 21.02.1996 15:00
Flughafen
CO2-Unor
Maßeinheit: Vol%
MW = 0.16
Max= 0.45(MW)
Flughafen
SO2-Def.
Maßeinheit: mg/m³
MW = -1.84
Max= 1.14(MW)
Flughafen
O2-Servo
Maßeinheit: Vol%
MW = 20.70
Max= 21.00(MW)
Flughafen
FID-AuLu
Maßeinheit: mg/m³
MW = -0.31
Max= 4.55(MW)
13:00 13:15 13:30 13:45 14:00 14:15 14:30 14:45 15:00
1-Minuten-Meßwert Von 21.02.1996 13:00 bis 21.02.1996 15:00
Flughafen
Au-Luft
Maßeinheit: °C
MW = -1.02
Max= -0.38(MW)
Flughafen
Luftdr.
Maßeinheit: hPa
MW = 1008.00
Max= 1008.00(MW)
Flughafen
T-Kammer
Maßeinheit: °C
MW = 61.90
Max= 75.70(MW)
Flughafen
T-MHaus
Maßeinheit: °C
MW = 7.03
Max= 10.60(MW)
13:00 13:15 13:30 13:45 14:00 14:15 14:30 14:45 15:00
1-Minuten-Meßwert Von 21.02.1996 13:00 bis 21.02.1996 15:00

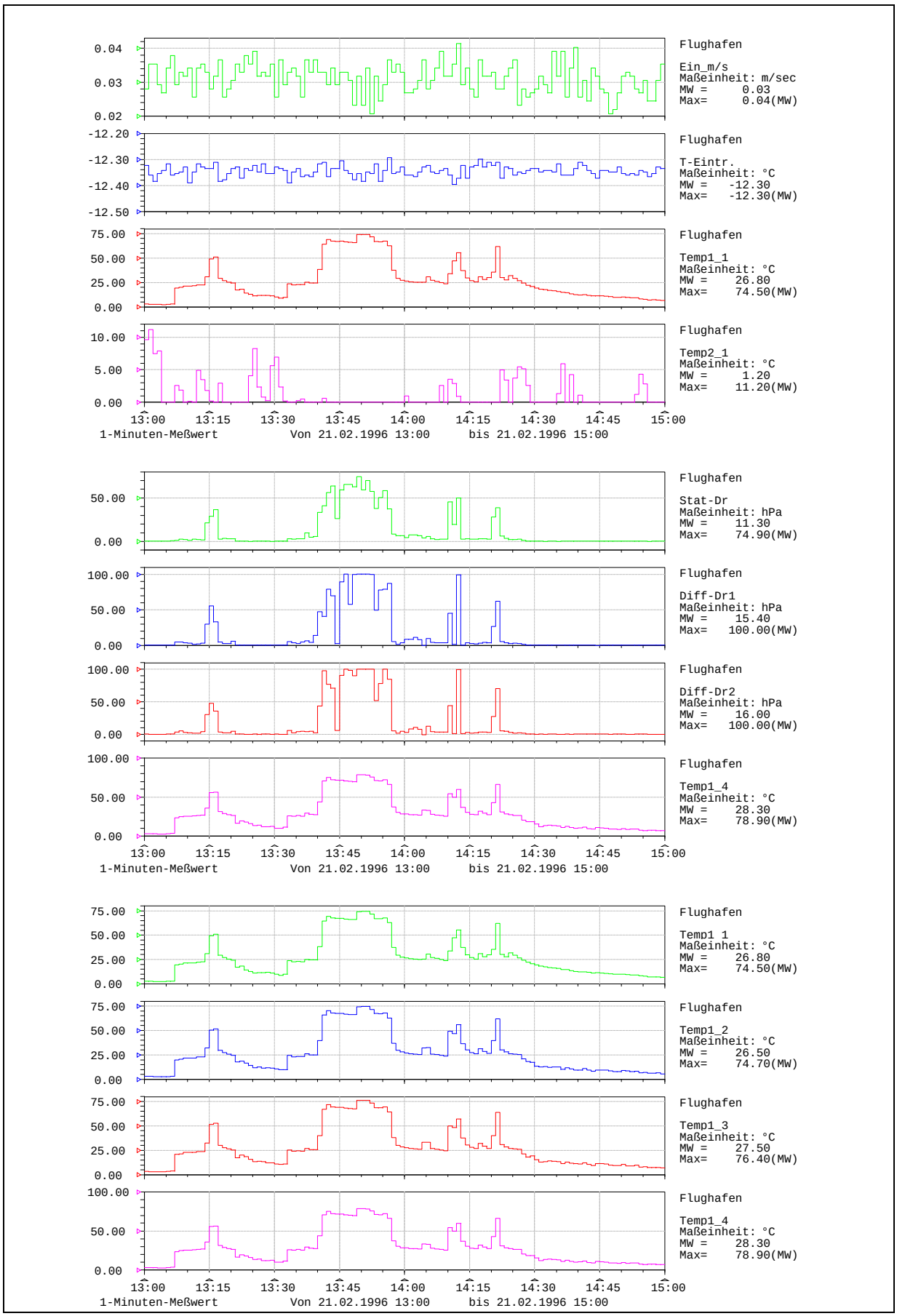


Abbildung 34: visualisierte und mittels DFÜ übertragene Meßdaten des Triebwerkstyp:CF6-50-C 2 SN 455861 vom 21.02.1996 vor Ort gemessen.

14 ERMITTLUNG DISKRETER STOFFGRUPPEN

Neben der Emissionsstrukturanalyse des Abgases von zivilen Flugzeugtriebwerken zur Ermittlung organisch-chemischer Verbindungen wurden im Rahmen des durchgeführten Projektes unterschiedliche Stoffgruppen spezifisch untersucht. Für diese Stoffgruppen wurden spezielle Probenahme- und Analysenverfahren angewendet, die i.d.R. in entsprechenden Vorschriften des Technischen Regelwerkes (DIN-, EN-, ISO-, CEN-Normen) beschrieben sind. Bei den betreffenden Stoffgruppen handelt es sich um

polychlorierte Dibenzo-(p)-dioxine, -furane (PCDD/F)
polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH)
Aldehyde
Ketone

Die Entnahme der Abgasproben erfolgte bei den v.g. Stoffen grundsätzlich über die Dauer eines kompletten Prüfzyklus (ca. 60 -CF6-. bis max. ca. 130 Minuten -CFM56-.). Als Entnahmeort wurde ebenfalls die in Abschn. 11.2, Kap. 2 beschriebene Mischapparatur gewählt.

Zu Beginn des Meßprogrammes wurde ferner versucht, den Gesamtstaubgehalt des Abgases zu ermitteln. Dies geschah u.a. mit der Absicht ebenso eventuell im Gesamtstaub enthaltene Inhaltsstoffe diskret zu ermitteln. Der Versuch der Gesamtstaubermittlung schlug jedoch angesichts des hohen Verdünnungsgrades des Abgases an der Probenahmestelle fehl. Die emittierten Staubgehalte lagen an der Probenahmestelle deutlich unter 0,1 mg/m³ und damit unterhalb der gravimetrischen Nachweisgrenze. Wenn in Abschn. 8.1.1, Kap. 1 auf einen während der Probenahme einzugehenden Kompromiß hingewiesen wird, so zeigt sich an dieser Stelle, welche Auswirkungen, bzw. Einschränkungen dieser einzugehende Kompromiß mit sich brachte. Auch an anderer Stelle wird insbesondere im Zusammenhang mit einer exakten Quantifizierung von im Abgas enthaltenen Einzelstoffen dieser Kompromiß deutlich.

Die Ermittlung der o.e. Stoffgruppen erfolgte nach folgenden Vorschriften:

PCDD/F :DIN EN 1948 [46] (die analytische Bearbeitung erfolgte in Fremdvergabe)
PAH : VDI 3873[47]
Aldehyde: Richtlinienvorentwurf VDI 3862[48]
Ketone: Richtlinienvorentwurf VDI 3862[49]

Eine Ausweitung des Programmes auf weitere Stoffgruppen erfolgte nicht, da zum Zeitpunkt der Programmplanung und -ausführung keine konkreten Hinweise vorlagen, die eine Erweiterung des Spektrums gerechtfertigt hätten.

Angeregt wurde allerdings, möglicherweise im Rahmen dieses Programmes auch olfaktometrische Untersuchungen vorzunehmen. Wegen der Komplexizität des Gesamtprogrammes im Zusammenhang mit der Ermittlung von chemischen Einzelstoffen wurde jedoch hiervon abgesehen.

15 FREMDVERGABEN

Im Rahmen des beschriebenen Meßprogrammes wurden verschiedene Arbeiten, vorwiegend aus Kapazitätsgründen, im Unterauftrag durch Dritte bearbeitet. Hierbei handelt es sich vorwiegend um:

1. den Bau der Beprobungseinrichtung nach konstruktiven Vorgaben durch die HLfU
2. die chem.-analytische Bearbeitung eines Teiles von Proben um einerseits die eigene chem. Analytik abzusichern und zum anderen die Vielzahl der Proben zeitnah bearbeiten zu können sowie
3. ein Verfahren zur Fraktionierung von Probeneluaten (siehe Absch. 12.1.3 Kap. 2 in Verbindung mit sich daran anschließender GC/MS zu entwickeln

Die Arbeiten zu 1. wurden durch die PAUL GOTHE STIFTUNG in Bochum ausgeführt. Die Arbeiten zu 2. und 3. wurde im Unterauftrag durch die Firma GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSPLATZ- UND UMWELTANALYTIK (GfA) in Münster-Roxel ausgeführt. Darüberhinaus wurden keine Fremdaufträge erteilt, alle übrigen Arbeiten wurden durch das Emissionslabor des Dezernates 6.2 -Luftreinhaltung/Emissionen- der HLfU erledigt.

16 EINSATZ EINES KONTINUIERLICH ARBEITENDEN OPTISCHEN MEßVERFAHRENS

Nachdem die überwiegende Anzahl organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von zivilen Flugzeugtriebwerken identifiziert wurde, sollte versucht werden, ein ausgewähltes Stoffspektrum direkt an der Übertrittsstelle vom Abgasschornstein der Triebwerkstandlaufeinrichtung zur Atmosphäre kontinuierlich zu ermitteln. Hierbei richtete sich die Auswahl vorrangig nach den zu Verfügung stehenden Möglichkeiten der vorhandenen Meßeinrichtung.

Bei dem angewendeten Verfahren zur Identifizierung und Messung der Konzentrationen verschiedener gasförmiger Abgasbestandteile handelt es sich um die „differentielle optische Absorptionsspektroskopie (DOAS)“, die auf dem Lambert-Beer´schen Gesetz beruht. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen der absorbierten Lichtmenge und der Anzahl der Moleküle im Lichtweg.

Da jedes Gas sein eigenes, unverwechselbares Absorptionsspektrum, den sogenannten „Fingerprint“ hat, können die Konzentrationen mehrerer verschiedener Gase im Lichtweg gleichzeitig bestimmt werden. Bei der DOAS-Methode wird ein Lichtstrahl von einer speziellen Lichtquelle - einer Xenon-Hochdrucklampe - über eine bestimmte Strecke gesendet; danach werden mittels komplexer, computergestützter Berechnungen die Lichtverluste durch Molekularabsorption entlang der Strecke ausgewertet und analysiert. Das Licht der Xenon-Lampe enthält sowohl das sichtbare Spektrum als auch Ultraviolett- und Infrarot-Wellenlängen.

Das Licht wird von einem Empfänger erfaßt und durch einen Lichtwellenleiter (LWL) zum Analysator weitergeleitet. Dieses LWL-Kabel macht es möglich, den Analysator in ausreichender Entfernung von etwaigen schädlichen Umgebungseinflüssen an der Meßstelle zu installieren.

Der Analysator besteht u.a. aus einem Hochleistungsspektrometer, einem Rechner und der dazugehörigen Steuereinheit. Das Spektrometer zerlegt das Licht mit Hilfe eines optischen Gitters in schmale Wellenlängenbänder. Dieses optische Gitter kann zur Untersuchung eines optimalen Wellenlängenbereichs eingestellt werden.

Das Licht wird in elektrische Signale umgewandelt. Ein schmaler Schlitz läuft mit hoher Geschwingkeit über den Detektor, hierdurch wird eine große Zahl von Augenblickswerten zusammengefaßt, um ein Abbild des Spektrums in dem relevanten Wellenlängenbereich zu erhalten.

Diese Abtastung wird hundertmal pro Sekunde wiederholt; die aufgezeichneten Spektren werden bis zu ihrer Auswertung im Mehrkanalspeicher der Auswerteeinheit aufsummiert.

Die Auswertung wird für jeden Wellenlängenbereich einzeln durchgeführt und basiert auf dem Vergleich von Absorptionskurven. Das jeweils letzte aufgezeichnete Absorptionsspektrum wird mit einem vom Computer berechneten Spektrum verglichen. Das berechnete Spektrum besteht aus einer Summierung der Referenzspektren für die jeweilige Auswertung. Der Rechner verändert die Größenfaktoren für jedes Referenzspektrum, bis er die bestmögliche Übereinstimmung erreicht. Daraus können dann mit hoher Genauigkeit die verschiedenen Gaskonzentrationen berechnet werden.

Als Meßeinrichtung wurde das Gerät Opsis® ER 060/ RE 060 probeweise eingesetzt. Hierzu wurde sowohl die Sendeeinheit als auch die Empfängereinheit an der Übertrittsstelle des Abgases aus der Triebwerkstandlaufeinrichtung in die Atmosphäre so montiert, daß der Lichtweg des Senders den Abgaskanal diagonal über eine Strecke von ca. 13,5 m geführt wird. .

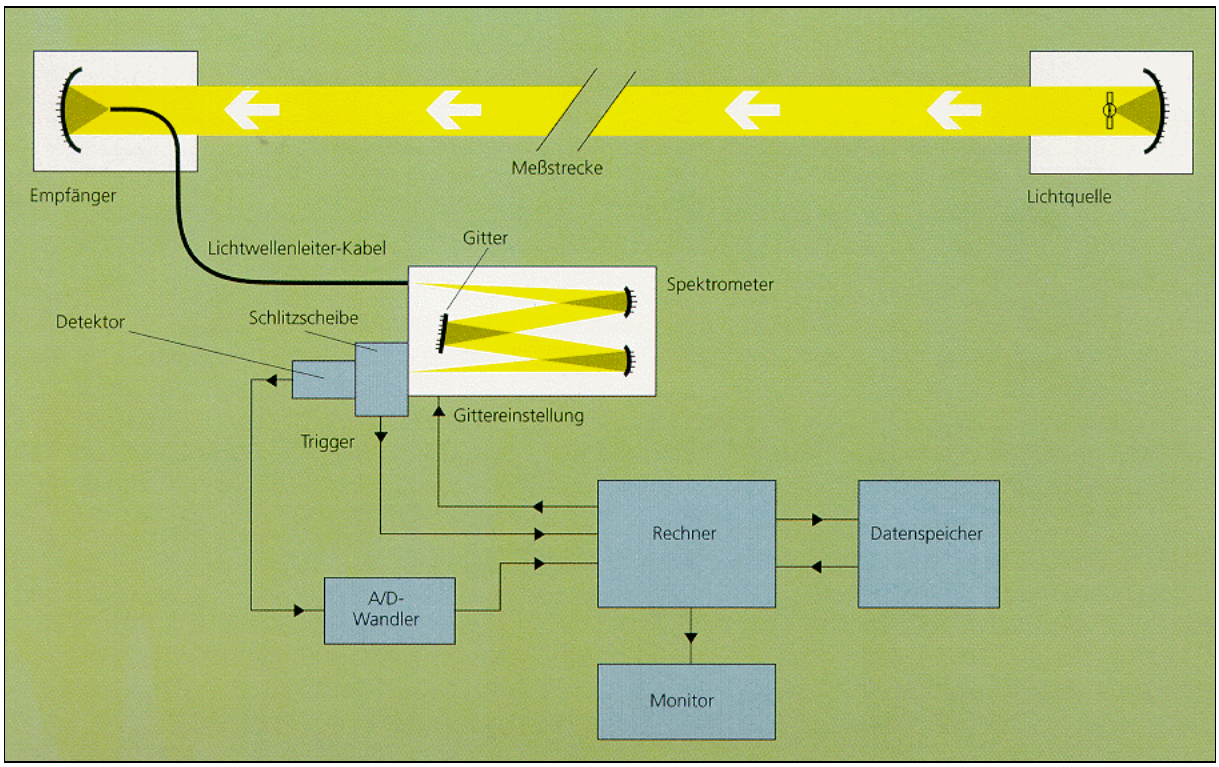


Abbildung 35: Funktionsschema Opsis-Meßeinrichtung

Die zur Verfügung gestellte Meßeinrichtung war ausgelegt, die Komponenten NO, Benzol, Toluol und p-Xylol zu messen. Es war beabsichtigt, die für diese Komponenten kontinuierlich wie diskontinuierlich erhaltenen Meßdaten mit der optischen Meßeinrichtung zu korrelieren. Das betreffende Gerät wurde jedoch vom Hersteller in einer nicht kalibrierten Version zu Verfügung gestellt, so daß sich die gewünschte Korrelation nicht erzielen ließ. Wie in Abbildung 36 jedoch gezeigt wird, lassen sich Abhängigkeiten zwischen den ermittelten Meßwerten und den jeweiligen Lastzuständen des Triebwerkes während eines Prüflaufes erkennen.

Dementsprechend erscheint es durchaus möglich, bei entsprechend sorgfältiger Kalibrierung solche oder ähnliche Meßeinrichtungen zur diskreten Ermittlung bestimmter Abgaskomponenten im Bereich von Triebwerkstandlaufeinrichtungen einzusetzen. Dabei geht die Palette meßbarer anorganischer und organischer Abgaskomponenten deutlich über die hier versuchsweise gemessenen Komponenten hinaus. Inwieweit es jedoch sinnvoll ist, mit Hilfe der beschriebenen Einrichtungen Anlagen dieser Art kontinuierlich zu überwachen, soll an dieser Stelle nicht diskutiert werden.

Triebwerk: Typ CFM56-3B2-724473 vom 24.07.97

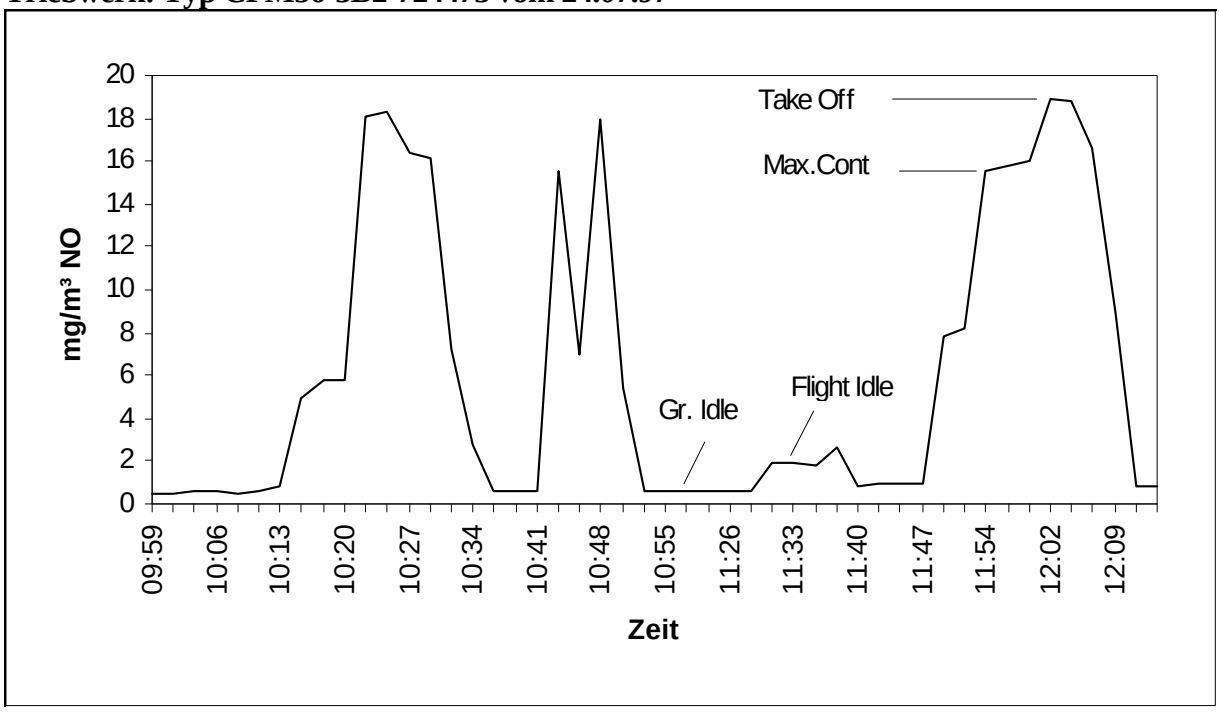


Abbildung 36: Meßtechnische Erfassung von NO mit einer optischen Meßeinrichtung

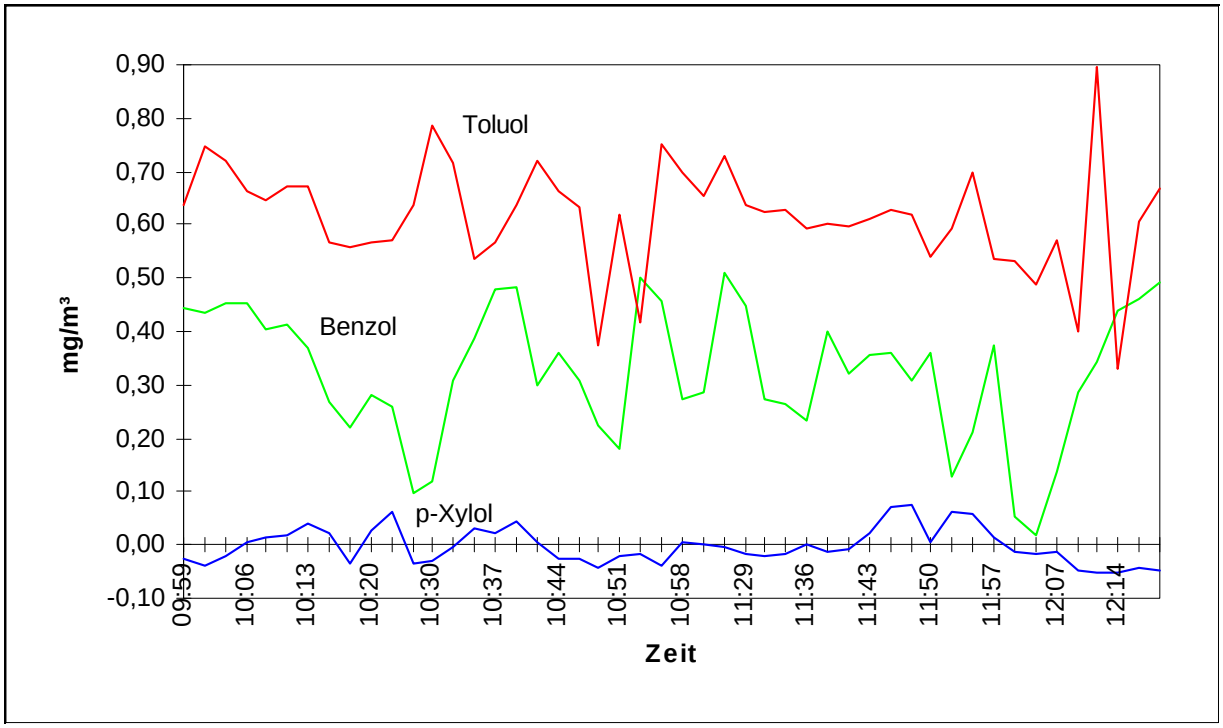


Abbildung 37: Meßtechnische Erfassung von Benzol, Toluol, p-Xylol mit einer optischen Meßeinrichtung

Die in Abbildungen 36 und 37 angegebenen Konzentrationswerte sind nicht als reale Werte anzusehen. Die Abbildungen zeigen lediglich Abhängigkeiten des Lastverhaltens von der Emission der betrachteten Komponenten. Eine vorherige sachrichtige Kalibrierung des Gerätes durch den Lieferanten mit geeigneten Prüfgasen hätte möglicherweise bessere Resultate erbracht.

17 HINTERHERFAHRTEN BEIM TAXIBETRIEB

Wie in Abschnitt 8, Kap. 1 bereits angedeutet wurde, wurden im Rahmen der Programmplanung grundsätzlich drei Möglichkeiten in Betracht gezogen, repräsentative Abgasproben aus Flugzeugtriebwerken zu erhalten.

Eine der Möglichkeiten ist die **Hinterherfahrt** im Abgasstrahl der Triebwerke im Taxibetrieb. Wie in Abbildung 38 ersichtlich, stellt der Taxibetrieb mit einem Schub von ca. 7 % für zivile Flugzeuge im betrachteten Flughafennahbereich den höchsten Zeitanteil der Emission dar.

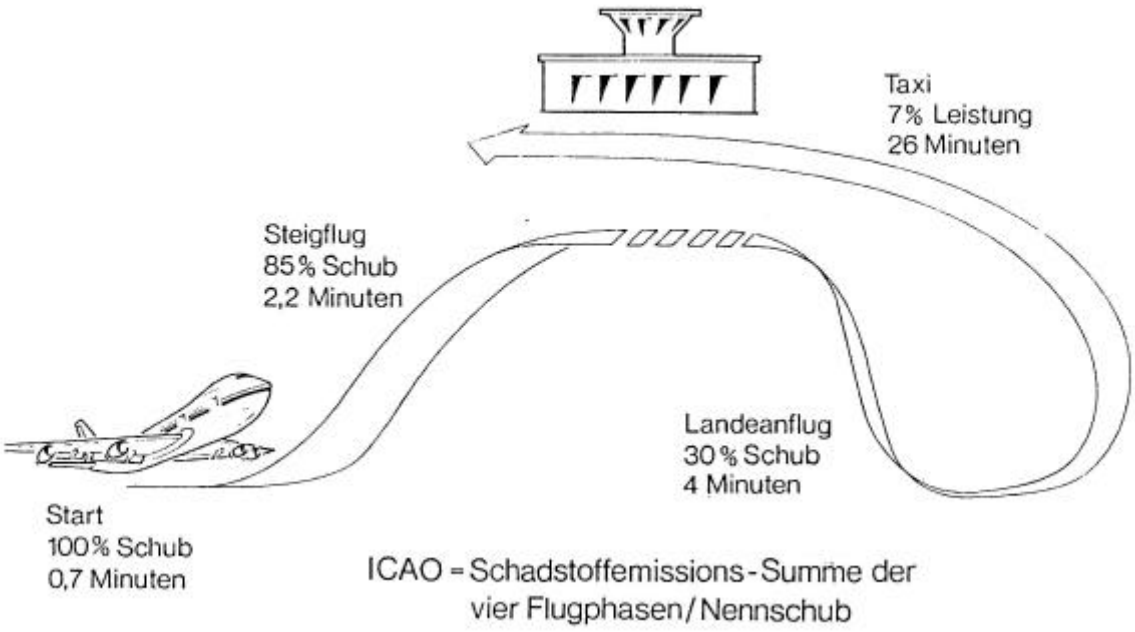


Abbildung 38: LTO-Zyklus (landing and Take off cycle)

Hinzu kommt, daß in diesem Betriebszustand der Flugzeugmotoren mit den höchsten Emissionen organisch-chemischer Verbindungen zu rechnen ist.

Zur Durchführung der Probenahme wurde ein batteriebetriebener Probenahmekit bestehend aus einer Edelstahl-Ansaugsonde, direkt daran adaptierten TDS-Röhrchen, mehrschichtig gefüllt mit Tenax TA bzw. Carbosieve SIII und einem DESAGA-Probenehmer in einem fahrenden „Follow-me“-Fahrzeug betrieben. Hierbei war die Ansaugsonde und die TDS-Probenahmeröhrchen in Fahrtrichtung auf dem Autodach befestigt.. Die meisten Hinterherfahrten erfolgten auf dem Weg der Flugzeuge von der Parkposition bis zur Startposition. Je nach zugewiesener Startbahn dauerten die Probenahmen bis zu ca. 20 Minuten. Es wurde versucht bei den Hinterherfahrten den Abstand zwischen Schubdüse und Probenahmesonde so dicht wie möglich zu wählen. Hierbei wurden Abstände zwischen ca. 30 und 50 m erzielt. Es ist davon auszugehen, daß die Probenahmesonde im Zentrum des Abgasstrahles positioniert werden konnte.

Bei den Hinterherfahrten wurde versucht, im wesentlichen Flugzeuge zu beproben, die von Motoren der Typen GE CF6-50 oder CFMI CFM56-3 angetrieben wurden. Hierbei wurden jedoch Maschinen unterschiedlicher Airlines beprobt. Nicht bei allen Probenahmen gelang es, ausschließlich die genannten Motoren bei der Probenahme zu erfassen, so daß auch Proben

erhalten wurden, in denen Abgase anderer Triebwerke enthalten ist. Wie die Tabelle 24 zeigt, deckt sich das Stoffspektrum qualitativ weitgehend mit den in den Tabellen 26 bis 28 angegebenen Stoffen.

Abbildung 39: Hinterherfahrt zur Beprobung von Flugzeugtriebwerken (Sicht aus hinterherfahrendem Follow-me-Fahrzeug)

Nach anschließender GC/MS-Analyse der TDS-Röhrchen (siehe Abschn. 12.1.4 in Verbindung mit Abschn. 12.1.5 oder 12.1.2, Kap. 2) wurden die in Tabelle 24 angegebenen organisch-chemischen Stoffe identifiziert (siehe auch Abbildung 40).

Tabelle 24: Übersicht der bei Hinterherfahrten identifierten Substanzen

Nummer	Retentions-zeit (min.)	Substanz	Summen-formel	Qualitäts-aussage
1)	17.48	1-Hexen	C_6H_{12}	91
2)	17.52	Methylcyclopentan	C_6H_{12}	87
3)	23.90	Benzol	C_6H_6	91
4)	26.68	1-Hepten	C_7H_{14}	95
5)	27.74	Heptan	C_7H_{16}	86
6)	32.07	1,2-Propandiol	$C_3H_8O_2$	86
7)	35.13	1-Pentanol	$C_5H_{12}O$	72
8)	35.47	Toluol	C_7H_8	91
9)	38.08	1-Octen	C_8H_{16}	95
10)	38.16	Cyclopentanon	C_5H_8O	86
11)	39.20	Octan	C_8H_{18}	94
12)	44.36	Ethylcyclohexan	C_8H_{16}	90
13)	48.17	Ethylbenzol	C_8H_{10}	90
14)	48.86	p-Xylol	C_8H_{10}	90
15)	48.86	m-Xylol	C_8H_{10}	90
16)	50.06	Ethynylbenzol	C_8H_6	68
17)	51.73	1-Nonen	C_9H_{18}	97
18)	52.03	cis-1-Ethyl-4-methylcyclohexan	C_9H_{18}	90
19)	52.18	Styrol	C_8H_8	95
20)	52.65	o-Xylol	C_8H_{10}	94
21)	53.17	Nonan	C_9H_{20}	95
22)	54.85	trans-1-Ethyl-4-methylcyclohexan	C_9H_{18}	87
23)	54.98	cis-1-Ethyl-2-methylcyclohexan	C_9H_{18}	90

Nummer	Retentions-zeit (min.)	Substanz	Summen-formel	Qualitäts-aussage
24)	58.12	2,6-Dimethyloctan	$C_{10}H_{22}$	83
25)	58.39	Propylcyclohexan	C_9H_{18}	76
26)	59.44	3-Ethyl-2-methylheptan	$C_{10}H_{22}$	83
27)	61.77	Propylbenzol	C_9H_{12}	90
28)	62.12	5-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	91
29)	62.33	4-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	91
30)	62.65	Benzaldehyd	C_7H_8O	96
31)	62.99	3-Ethyltoluol	C_9H_{12}	97
32)	63.24	4-Ethyltoluol	C_9H_{12}	95
33)	63.86	3-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	91
34)	63.97	Mesitylen	C_9H_{12}	97
35)	64.69	Phenol	C_6H_6O	97
36)	65.88	2-Ethyltoluol	C_9H_{12}	94
37)	66.15	6-Methyl-5-hepten-2-on	$C_8H_{14}O$	93
38)	66.82	1-Decen	$C_{10}H_{20}$	93
39)	67.94	Pseudocumol	C_9H_{12}	92
40)	68.11	Decan	$C_{10}H_{22}$	91
41)	70.83	(1-Methylpropyl)benzol	$C_{10}H_{14}$	91
42)	71.68	2,6-Dimethylnonan	$C_{11}H_{24}$	72
43)	71.79	4-Methyldecan	$C_{11}H_{24}$	91
44)	72.56	2-Ethyl-1-hexanol	$C_8H_{18}O$	78
45)	72.77	1,2,3-Trimethylbenzol	C_9H_{12}	87
46)	73.80	Benzylalkohol	C_7H_8O	95
47)	74.19	Butylcyclohexan	$C_{10}H_{20}$	95
48)	75.16	Indan	C_9H_{10}	92
49)	76.69	1,4-Diethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	93
50)	76.76	1,2-Diethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	94
51)	76.88	1-Methyl-2-propylbenzol	$C_{10}H_{14}$	91
52)	77.08	1-Methyl-3-propylbenzol	$C_{10}H_{14}$	95
53)	77.25	Butylbenzol	$C_{10}H_{14}$	72
54)	77.30	5-Methyldecan	$C_{11}H_{24}$	87
55)	78.26	2-Methyldecan	$C_{11}H_{24}$	90
56)	78.72	trans-Decahydronaphthalin	$C_{10}H_{18}$	97
57)	79.45	3-Methyldecan	$C_{11}H_{24}$	90
58)	79.54	1-Phenylethanon	C_8H_8O	91
59)	79.72	2-Methylbenzaldehyd	C_8H_8O	96
60)	81.16	2-Ethyl-1,4-dimethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	95
61)	81.26	4-Ethyl-1,2-dimethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	95
62)	81.51	1-Methyl-4-(1-methylethyl)benzol	$C_{10}H_{14}$	94
63)	81.63	1-Methyl-3-(1-methylethyl)benzol	$C_{10}H_{14}$	91
64)	81.95	4-Methylbenzaldehyd	C_8H_8O	93
65)	82.17	Dimethylbenzylalkohol	$C_9H_{12}O$	91
66)	83.86	Undecan	$C_{11}H_{24}$	95
67)	86.75	5-Methylundecan	$C_{12}H_{26}$	76
68)	87.62	Decahydro-2-methylnaphthalin	$C_{11}H_{26}$	91
69)	88.22	1,2,3,5-Tetramethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	91
70)	90.36	Pentylcyclohexan	$C_{11}H_{22}$	74
71)	92.13	(1,1-Dimethylpropyl)benzol	$C_{11}H_{16}$	72
72)	93.13	4-Methylundecan	$C_{12}H_{26}$	70
73)	93.61	1-Ethyl-3,5-dimethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	97
74)	93.90	2-Methylundecan	$C_{12}H_{26}$	87
75)	94.96	Benzoesäure	$C_7H_6O_2$	87
76)	95.46	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin	$C_{10}H_{12}$	92
77)	97.67	1,2,4-Trichlorbenzol	$C_6H_3Cl_3$	97
78)	97.80	2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	$C_8H_{18}O_3$	64
79)	99.02	Naphthalin	$C_{10}H_8$	95
80)	99.54	Dodecan	$C_{12}H_{26}$	91

Nummer	Retentions-zeit (min.)	Substanz	Summen-formel	Qualitäts-aussage
81)	101.43	2,6-Dimethylundecan	$C_{13}H_{28}$	91
82)	107.58	5-Methyldodecan	$C_{13}H_{28}$	78
83)	109.88	2,9-Dimethylundecan	$C_{13}H_{28}$	91
84)	110.03	3,9-Dimethylundecan	$C_{13}H_{28}$	80
85)	111.24	1,2,3,4-Tetrahydro-5-methylnaphthalin	$C_{11}H_{14}$	96
86)	114.24	Tridecan	$C_{13}H_{28}$	93
87)	115.72	2-Methylnaphthalin	$C_{11}H_{10}$	96
88)	118.34	1-Methylnaphthalin	$C_{11}H_{10}$	97
89)	123.16	2-Methyltridecan	$C_{14}H_{30}$	87
90)	124.29	3-Methyltridecan	$C_{14}H_{30}$	53
91)	125.23	2,7,10-Trimethyldodecan	$C_{15}H_{32}$	86
92)	128.47	Tetradecan	$C_{14}H_{30}$	95
93)	129.96	1-Ethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	96
94)	131.59	2,6-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	97
95)	133.65	1,3-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	98
96)	134.02	1,6-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	97
97)	141.70	Pentadecan	$C_{15}H_{32}$	94
98)	144.51	2,6-Di-tert.-butyl-4-methylphenol	$C_{15}H_{24}O$	98
99)	154.17	Hexadecan	$C_{16}H_{34}$	93
100)	167.08	Heptadecan	$C_{17}H_{36}$	87

Die in der vorstehenden Tabelle 24 ermittelten Stoffe stellen eine Teilmenge der in Tabelle 25 wiedergegebenen Stoffe dar, aus der wiederum lediglich die in Tabelle 26 als sicher identifiziert angegebenen Stoffe auch bei den Hinterherfahrten als sicher identifiziert angesehen werden können.

Es hat sich somit gezeigt, daß die „Hinterherfahrt“ eine durchaus anwendbare Methode der Beprobung darstellt und sich durch die gewonnenen Proben zumindest qualitative Aussagen ableiten lassen. Für eine quantitative Betrachtung sind jedoch nach dieser Methode die erhaltenen Daten nicht in soweit vollständig, da insbesondere eine exakte Massenstromermittlung nicht möglich ist.

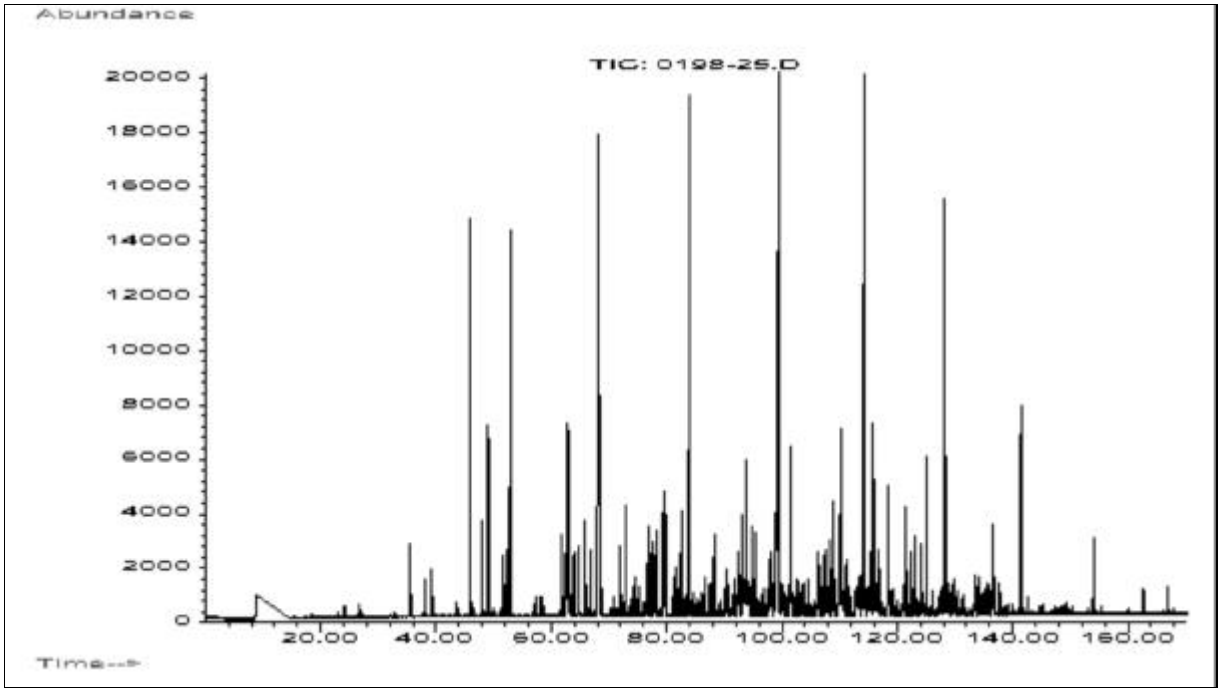


Abbildung 40: Massenspektrogramm einer durch „Hinterherfahrt“ gewonnenen Abgasprobe

Im nachfolgenden Abschnitt 18, Kap. 2 werden charakteristische „Verhältniskurven“ dargestellt, aus denen ersichtlich ist, daß die durch Hinterherfahrt gewonnenen Emissions-Stoffspektren den in Triebwerkstandlaufeinrichtungen gewonnenen Spektren ähnlich sind. Dies ist insofern bemerkenswert, da davon auszugehen ist, daß im Flughafen-Vorfeldbereich der „Bypass-Luftstrom“ der Triebwerke mit organisch-chemischen Stoffen aus den verschiedensten Triebwerktypen stärker angereichert ist als im Triebwerkprüfstand und somit deutlichere Unterschiede (durch die unterschiedlichen Triebwerktypen bedingt) in den Stoffspektren zu vermuten sind.
Diese Annahme wird durch die durchgeführten Untersuchungen nicht gestützt, so daß die die Vermutung naheliegt, daß die Emissionsspektren organisch-chemischer Verbindungen aus zivilen Flugzeugtriebwerken untereinander ähnlich sind.

18 ERGEBNISSE DER QUALITATIVEN UNTERSUCHUNGEN

Nach den in diesem Kapitel beschriebenen analytischen Verfahren wurden die in den nachstehenden Tabellen 25 und 26 angegebenen organischen Stoffe ermittelt. Die in Tabelle 25 angegebenen „vermuteten“ Stoffe stellen zunächst lediglich das von der GC/MS-Einrichtung nach statistischen Kriterien aus der angewendeten Wiley-Library® (John Wiley and Sons, Inc. 1986 Licensed to Hewlett-Packard Company, S/N: 2937A00584; Auswahl aus 130.544 organisch-chemischen Verbindungen) angebotene Stoffspektrum mit der jeweils dazu gehörenden Qualitätsaussage dar. Stoffe mit einer Qualitätsaussage < 85 wurden für eine weitere Betrachtung (siehe Tabelle 26) nicht berücksichtigt

Tabelle 25: Übersicht der „vermuteten“ organisch-chemischen Substanzen

Lfd. Nr.	RT [min.]	Substanz	Summenformel	Qualitäts-aussage
1)	8.90	3,4,4-Trimethyl-2-hexen	C_9H_{18}	64
2)	9.17	1-Methylethylbenzol	C_9H_{12}	70
3)	9.56	5,6-Dimethylundecan	$C_{13}H_{28}$	59
4)	10.03	1-Methyl-3-propyl-cyclohexan	$C_{10}H_{20}$	78
5)	10.64	3,8-Dimethyldecan	$C_{11}H_{24}$	72
6)	10.86	Citronella	$C_{10}H_{18}O$	64
7)	11.26	2-Methyl-1,4,-dimethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	95
8)	12.17	(Z)-(1-Methyl-1-propenyl)-benzol	$C_{10}H_{12}$	81
9)	12.22	2-Propanon	C_3H_6O	72
10)	12.37	cis-1,2-Dimethylcyclopropan	C_5H_{10}	50
11)	13.13	2-Methyl-6-propyldodecan	$C_{16}H_{34}$	72
12)	13.21	7-Methyltridecan	$C_{14}H_{30}$	90
13)	13.87	Octylcyclohexan	$C_{14}H_{28}$	64
14)	14.62	trans-1,2-Dimethylcyclopropan	C_5H_{10}	86
15)	14.64	Pentatriacontan	$C_{35}H_{72}$	80
16)	14.91	(E)-1,3-pentadien	C_5H_8	91
17)	15.83	Silicon-Polymer	$C_{14}H_{42}O_5Si_6$	64
18)	16.13	2-Methyl-1-buten	C_5H_{10}	72
19)	16.54	Cyclopenten	C_5H_8	64
20)	17.17	3-Buten-2-on	C_4H_6O	86
21)	17.38	Methylcyclopentan	C_6H_{12}	87
22)	17.73	1-Hepten	C_7H_{14}	97
23)	18.53	Hexan	C_6H_{14}	90
24)	18.70	Essigsäure	$C_2H_4O_2$	90
25)	19.60	2-Methyl-1-penten	C_6H_{12}	53
26)	19.60	3-Methylfuran	C_5H_6O	86
27)	19.97	2,3-Dimethyl-2-buten	C_6H_{12}	72
28)	20.11	(Z)-4-methyl-2-penten	C_6H_{12}	83
29)	20.19	2,6-Dichloro-N,N-dimethyl-benzamid	$C_9H_9Cl_2NO$	83
30)	20.29	3-Methyl-1,4-pentadien	C_6H_{10}	80
31)	20.96	1-Penten	C_5H_{10}	90
32)	21.21	3-Methyl-1-penten	C_6H_{12}	72
33)	21.97	(Z)-2-hexen	C_6H_{12}	64
34)	22.01	[(2-Fluorophenyl)methyl]-1-H-purin-6-amin	$C_{12}H_{10}FN_5$	50
35)	22.15	2-Hexen	C_6H_{12}	83
36)	22.29	2,3-Dimethyl-1-buten	C_6H_{12}	86
37)	22.57	2-Butenal	C_4H_6O	91
38)	22.57	1-Hexen	C_6H_{12}	96
39)	22.71	3-Methylcyclopenten	C_6H_{10}	91
40)	22.94	4-Methylcyclopenten	C_6H_{10}	86
41)	23.23	(E)-3-Methyl-2-penten	C_6H_{12}	76

Lfd. Nr.	RT [min.]	Substanz	Summenformel	Qualitäts-aussage
42)	25.38	Ethylcyclopentan	C_7H_{14}	96
43)	25.52	3-Methyl-1-hexen	C_7H_{14}	87
44)	26.00	Cyclohexen	C_6H_{10}	93
45)	26.03	5-Methyl-1-hexen	C_7H_{14}	78
46)	26.15	2-Pentanon	$C_5H_{10}O$	64
47)	26.44	2-Methyl-1-hexen	C_7H_{14}	59
48)	26.64	Benzol	C_6H_6	94
49)	26.77	1,2-Dimethylcyclopentan	C_7H_{14}	91
50)	26.87	3,3-Dimethyl-1,4-pentadien	C_7H_{12}	91
51)	27.31	trans-1,2-Dimethylcyclopentan	C_7H_{14}	87
52)	27.49	3-Methylhexan	C_7H_{12}	64
53)	27.50	Pentanal	$C_5H_{10}O$	90
54)	27.59	Heptan	C_7H_{16}	95
55)	28.26	2-Hepten	C_7H_{14}	95
56)	28.55	2-Methyl-2-hexen	C_7H_{14}	83
57)	28.74	1,3,5-Cycloheptatrien	C_7H_8	90
58)	28.85	Isopropylcyclobutan	C_7H_{14}	87
59)	30.26	Methylcyclohexan	C_7H_{14}	95
60)	30.96	1-Methylcyclohexan	C_7H_{12}	94
61)	31.72	3-Penten-2-on	C_5H_8O	80
62)	31.93	3-Ethylcyclopentan	C_7H_{12}	72
63)	32.66	1,2,3-Trimethylcyclopentan	C_8H_{16}	76
64)	33.01	2-Methyloctan	C_9H_{20}	94
65)	33.84	3-Methylcyclohexen	C_7H_{12}	83
66)	33.93	4-Methylcyclohexen	C_7H_{12}	91
67)	34.99	2-Methylheptan	C_8H_{18}	90
68)	35.05	4-Methylheptan	C_8H_{18}	72
69)	35.06	Toluol	C_7H_8	91
70)	35.22	1-Pentanol	C_5H_{12}	90
71)	35.91	2-Heptanon	$C_7H_{14}O$	87
72)	36.18	1-Nonen	C_9H_{18}	98
73)	36.20	3-Methylheptan	C_8H_{18}	90
74)	36.36	trans-1,2-Dimethylcyclohexan	C_8H_{16}	93
75)	36.72	cis-1,3-Dimethylcyclohexan	C_8H_{16}	91
76)	36.95	trans-1,4-Dimethylcyclohexan	C_8H_{16}	91
77)	37.19	4-Methylcyclohexan	C_7H_{12}	94
78)	37.20	cis-1,3-Dimethylbenzol	C_8H_{16}	91
79)	37.73	2-Methylhepten	C_8H_{16}	90
80)	37.75	2-Hexanon	$C_6H_{12}O$	90
81)	37.96	1-Ethyl-2-methylcyclopentan	C_8H_{16}	91
82)	38.16	Cyclopentanon	C_5H_8O	86
83)	38.24	1,1-Dimethylcyclohexan	C_8H_{16}	70
84)	38.25	1-Octen	C_8H_{16}	97
85)	38.35	Cyclooctan	C_8H_{16}	87
86)	39.11	cis-1-Ethyl-2-methylheptan	$C_{10}H_{22}$	55
87)	39.18	Hexanal	$C_6H_{12}O$	96
88)	39.61	trans-1,3-Dimethylcyclohexan	C_8H_{16}	91
89)	39.84	2,6-Dimethylheptan	C_9H_{20}	94
90)	39.94	trans-4-Octen	C_8H_{16}	60
91)	39.94	2-Octen	C_8H_{16}	93
92)	40.30	Octan	C_8H_{18}	97
93)	40.36	Essigsäurebutylester	$C_6H_{12}O_2$	83
94)	40.74	cis-1,4-Dimethylcyclohexan	C_8H_{16}	91
95)	41.25	Tetrachloroethen	C_2Cl_4	97
96)	41.78	Hexamethylcyclotrisiloxan	$C_6H_{18}O_3Si_3$	93
97)	42.35	2,4-Dimethylheptan	C_9H_{20}	93
98)	43.75	Propylcyclopentan	C_8H_{16}	91

Lfd. Nr.	RT [min.]	Substanz	Summenformel	Qualitäts-aussage
99)	43.77	2,5-Dimethylheptan	C_9H_{20}	91
100)	43.80	cis-1,2-Dimethylcyclohexan	C_8H_{16}	93
101)	44.11	Ethylcyclohexan	C_8H_{16}	95
102)	45.04	2-Ethyl-1,3-dimethylcyclohexan	$C_{10}H_{20}$	64
103)	45.35	4-Hydroxy-4-methyl-2-pentanon	$C_6H_{12}O$	83
104)	45.47	4-Methyloctan	C_9H_{20}	94
105)	45.81	3-Ethyl-2-methylhexan	C_9H_{20}	80
106)	45.84	2,6-Dimethyl-1-hepten	C_9H_{18}	87
107)	46.62	1,1,2-Trimethylcyclohexan	C_9H_{18}	91
108)	46.70	1-Ethylcyclohexen	C_8H_{14}	81
109)	46.75	1,3,5-Trimethylcyclohexan	C_9H_{18}	91
110)	46.84	1,2,4-Trimethylcyclohexan	C_9H_{18}	91
111)	46.87	3-Methyloctan	C_9H_{20}	76
112)	47.05	2,3-Dimethylheptan	C_9H_{20}	91
113)	47.61	Ethylbenzol	C_8H_{10}	93
114)	49.35	Octahydropentalen	C_8H_{14}	64
115)	49.38	m-Xylol	C_8H_{10}	97
116)	49.77	1,1,3-Trimethylcyclohexan	C_9H_{18}	94
117)	49.90	cis-Ocahydropentalen	C_8H_{14}	94
118)	49.91	1,2,3-Trimethylcyclohexan	C_9H_{18}	93
119)	49.99	Ethynylbenzol	C_8H_6	94
120)	51.34	1-Methyl-2-propylcyclopentan	C_9H_{18}	94
121)	51.75	1-Methyl-2-pentylcyclopropan	C_9H_{18}	87
122)	51.81	5-Methyl-4-hepten-3-on	$C_8H_{14}O$	80
123)	51.82	trans-1-Ethyl-4-methylcyclohexan	C_9H_{18}	91
124)	52.07	cis-1-Ethyl-4-methylcyclohexan	C_9H_{18}	91
125)	52.25	Styrol	C_8H_8	97
126)	52.36	o-Xylol	C_8H_{10}	97
127)	52.72	p-Xylol	C_8H_{10}	94
128)	53.46	Nonan	C_9H_{20}	98
129)	54.56	cis-1-Ethyl-2-methylcyclohexan	C_9H_{18}	91
130)	54.57	1,1,4,4-Tetramethylcyclohexan	$C_{10}H_{20}$	68
131)	55.44	1-Ethyl-1-methylcyclohexan	C_9H_{18}	78
132)	55.53	3,4-Dimethyloctan	$C_{10}H_{22}$	50
133)	56.74	Octahydro-2-methylpentalen	C_9H_{16}	52
134)	57.02	2,5-Dimethyloctan	$C_{10}H_{22}$	90
135)	57.28	Cumol	C_9H_{12}	94
136)	57.95	Propylcyclohexan	C_9H_{18}	91
137)	136-78	4,11-Dimethyltetradecan	$C_{16}H_{34}$	70
138)	58.00	Butylcyclopentan	C_9H_{18}	95
139)	58.10	2,3-Dimethylhexanon	$C_8H_{14}O$	50
140)	58.49	3,3-Dimethyloctan	$C_{10}H_{22}$	64
141)	59.39	3-Ethyl-2-methylheptan	$C_{10}H_{22}$	91
142)	59.43	2-(2-Methoxyethoxy)ethanol	$C_5H_{22}O_3$	74
143)	59.45	1-Ethyl-2,3-dimethylcyclohexan	$C_{10}H_{20}$	86
144)	59.61	4-Ethyl-2,3-dimethyl-2-hexen	$C_{10}H_{20}$	90
145)	60.00	trans-1,1,3,5-Tetramethylcyclohexan	$C_{10}H_{20}$	53
146)	60.32	1,2-Dimethylcyclooctan	$C_{10}H_{20}$	92
147)	61.12	Octahydro-1-methylpentalen	C_9H_{16}	72
148)	61.17	Propylbenzol	C_9H_{12}	91
149)	61.78	4-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	91
150)	62.21	5-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	91
151)	62.59	1,1,2,3-Tetramethylcyclohexan	$C_{10}H_{20}$	58
152)	62.70	Benzaldehyd	C_7H_6O	97
153)	62.89	2-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	93
154)	63.37	3-Ethyltoluol	C_9H_{12}	97
155)	63.39	4-Ethyltoluol	C_9H_{12}	95

Lfd. Nr.	RT [min.]	Substanz	Summenformel	Qualitäts-aussage
156)	63.50	3-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	94
157)	63.96	2,6-Dimethyloctan	$C_{10}H_{22}$	90
158)	63.97	Mesitylen	C_9H_{12}	97
159)	64.04	Hexansäure	$C_6H_{12}O_2$	86
160)	64.70	Phenol	C_6H_6O	95
161)	65.55	trans-1-Methyl-4-(1-methylethyl)cyclohexen	$C_{10}H_{20}$	72
162)	65.57	2-Ethyltoluol	C_9H_{12}	95
163)	66.15	6-Methyl-5-hepten-2-on	$C_8H_{14}O$	93
164)	66.36	Octamethylcyclotetrasiloxan	$C_8H_{24}O_4Si_4$	87
165)	66.45	Benzonitril	C_7H_5N	94
166)	66.54	3-Ethyl-2,5-dimethylbenzol	$C_{10}H_{20}$	52
167)	66.72	Methylcycloheptan	C_8H_{16}	81
168)	67.30	1-Decen	$C_{10}H_{20}$	76
169)	67.95	Pseudocumol	C_9H_{12}	95
170)	68.12	1-Ethenyl-3-methylbenzol	C_9H_{10}	80
171)	68.30	1-Ethenyl-2-methylbenzol	C_9H_{10}	92
172)	68.35	Benzofuran	C_8H_6O	81
173)	68.78	Octanal	$C_8H_{16}O$	90
174)	69.08	Decan	$C_{10}H_{22}$	98
175)	69.35	5-Decen	$C_{10}H_{20}$	70
176)	69.35	4-Decen	$C_{10}H_{20}$	91
177)	69.96	(2-Methylpropyl)benzol	$C_{10}H_{14}$	93
178)	70.03	cis-1-Methyl-4-(1-methylethyl)benzol	$C_{10}H_{20}$	64
179)	70.48	sec. Butylbenzol	$C_{10}H_{14}$	93
180)	71.21	2,6-Dimethylnonan	$C_{11}H_{24}$	83
181)	71.48	2,5-Dimethylnonan	$C_{11}H_{24}$	52
182)	71.98	4-Methyldecan	$C_{11}H_{24}$	91
183)	72.05	o-Cymol	$C_{10}H_{14}$	94
184)	72.48	1,2,3-Trimethylbenzol	C_9H_{12}	95
185)	72.70	2-Ethyl-1-hexanol	$C_8H_{18}O$	86
186)	72.70	1-Ethenyl-2-methylcyclohexan	C_9H_{10}	94
187)	72.71	p-Cymol	$C_{10}H_{14}$	95
188)	72.76	m-Cymol	$C_{10}H_{14}$	95
189)	73.51	Butylcyclohexan	$C_{10}H_{20}$	95
190)	73.56	Benzylalkohol	C_7H_8O	97
191)	73.64	Limonen	$C_{10}H_{16}$	97
192)	73.82	1-Propenylbenzol	C_9H_{10}	95
193)	73.85	Pentylcyclopentan	$C_{10}H_{20}$	96
194)	74.06	3,7-Dimethylnonan	$C_{11}H_{24}$	87
195)	74.58	trans-1-Methyl-4-(1-ethylethenyl)cyclohexan	$C_{10}H_{18}$	90
196)	75.37	Indan	C_9H_{10}	94
197)	75.58	2-Hydroxybenzaldehyd	$C_7H_6O_2$	97
198)	75.60	1-Butylcyclohexen	$C_{10}H_{18}$	93
199)	76.03	2-Methylphenol	C_7H_8O	94
200)	76.10	Inden	C_9H_8	93
201)	76.40	1,4-Diethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	95
202)	76.46	1,3-Diethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	97
203)	76.48	1-Methyl-3-propylcyclohexan	$C_{10}H_{14}$	94
204)	76.51	1,1-Dimethyl-2-propylcyclohexan	$C_{11}H_{22}$	86
205)	76.56	1-Ethyl-2,2,6-trimethylcyclohexan	$C_{11}H_{22}$	96
206)	76.63	5-Methyldecan	$C_{11}H_{24}$	91
207)	76.70	3-Methylphenol	C_7H_8O	94
208)	76.76	1-Methyl-3-propylbenzol	$C_{10}H_{14}$	97
209)	77.28	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin	$C_{10}H_{12}$	96
210)	77.47	1-Ethyl-2,3-dimethylbenzol	$C_{11}H_{24}$	91
211)	77.61	Butylbenzol	$C_{10}H_{14}$	94
212)	77.83	4-Ethyl-1,2-dimethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	95

Lfd. Nr.	RT [min.]	Substanz	Summenformel	Qualitäts-aussage
213)	78.05	1-Ethyl-3,5-dimethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	94
214)	78.17	trans-Decahydronaphthalin	$C_{10}H_{18}$	98
215)	78.44	1,2-Diethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	93
216)	78.51	4,5-Dimethylnonan	$C_{11}H_{24}$	80
217)	78.66	2-Methyldecan	$C_{11}H_{24}$	94
218)	79.34	1-Methyl-2-propylbenzol	$C_{10}H_{14}$	93
219)	79.39	2-Methylbenzaldehyd	C_8H_8O	96
220)	79.44	5-Butylnonan	$C_{13}H_{28}$	86
221)	79.47	1-Phenylethanon	C_8H_8O	93
222)	79.52	3-Methyldecan	$C_{11}H_{24}$	93
223)	79.94	4-Methylphenol	C_7H_8O	87
224)	79.94	2-Methylbenzaldehyd	C_8H_8O	93
225)	81.30	2-Ethyl-1,3-dimethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	95
226)	81.44	1-Methyl-2,3-dimethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	81
227)	81.46	1,2-Diethyl-1-methylcyclohexan	$C_{11}H_{22}$	68
228)	81.74	2,4-Diethyl-1-methylcyclohexan	$C_{11}H_{22}$	52
229)	81.94	1-Ethyl-2,4-dimethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	94
230)	82.18	5-Undecen	$C_{11}H_{22}$	70
231)	82.35	4-Methylbenzaldehyd	C_8H_8O	95
232)	82.54	1-Methylindan	$C_{10}H_{12}$	93
233)	82.90	2-Ethyl-1,4-dimethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	95
234)	82.92	1-Butyl-2-propylcyclopentan	$C_{12}H_{24}$	72
235)	83.20	1-Ethyl-2-propylcyclohexan	$C_{11}H_{22}$	76
236)	84.26	Decahydronaphthalin	$C_{10}H_{18}$	96
237)	84.53	Undecan	$C_{11}H_{24}$	98
238)	84.75	Nonanal	$C_9H_{18}O$	98
239)	85.91	1,1-Dimethylindan	$C_{11}H_{14}$	91
240)	87.04	3,6-Dimethyldecan	$C_{12}H_{26}$	87
241)	87.64	2-Methyldecahydronaphthalin	$C_{11}H_{20}$	98
242)	87.90	1,2,4,5-Tetramethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	90
243)	89.27	2-Ethynyl-1,4-dimethylbenzol	$C_{10}H_{12}$	95
244)	89.74	2-Ethynyl-1,3-dimethylbenzol	$C_{10}H_{12}$	93
245)	89.80	trans-anti-1-Methyldecahydronaphthalin	$C_{11}H_{20}$	95
246)	89.94	4-Methylbenzylalkohol	$C_8H_{10}O$	91
247)	90.14	Pentylcyclohexan	$C_{11}H_{22}$	93
248)	90.92	Diethylmethylbenzol	$C_{11}H_{16}$	96
249)	91.41	2-Methylbenzylalkohol	$C_8H_{10}O$	98
250)	91.47	2,3-Dihydro-5-methylnaphthalin	$C_{10}H_{12}$	94
251)	91.70	(1,1-Dimethylpropyl)benzol	$C_{11}H_{16}$	72
252)	91.84	1-Methyl-2-(2-propenyl)benzol	$C_{10}H_{12}$	60
253)	92.51	4-Methylundecan	$C_{12}H_{26}$	86
254)	92.82	5-Methylundecan	$C_{12}H_{26}$	97
255)	92.87	1,2,3,4-Tetramethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	90
256)	93.46	1,2,3,5-Tetramethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	94
257)	94.07	2-Methylundecan	$C_{12}H_{26}$	91
258)	94.16	Benzoesäure	$C_7H_6O_2$	93
259)	94.29	3-Methylundecan	$C_{12}H_{26}$	83
260)	94.62	3-Ethylphenol	$C_8H_{10}O$	76
261)	94.95	(1-Methylbutyl)benzol	$C_{11}H_{16}$	58
262)	95.73	1-(Methylpheyl)ethanon	$C_9H_{10}O$	91
263)	96.45	2,4-Dimethylbenzaldehyd	$C_9H_{10}O$	93
264)	96.90	Ethylbenzaldehyd	$C_9H_{10}O$	50
265)	97.28	1,3,5-Trichlorbenzol	$C_6H_3Cl_3$	95
266)	97.68	2-(2-Butoxyetoxy)ethanol	$C_8H_{18}O_3$	83
267)	97.88	cis-syn-1-Methyldecahydronaphthalin	$C_{11}H_{20}$	81
268)	98.36	Naphthalin	$C_{10}H_8$	95
269)	98.42	Decahydro-1,6-dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{22}$	93

Lfd. Nr.	RT [min.]	Substanz	Summenformel	Qualitäts-aussage
270)	98.46	Decahydro-2,6-dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{22}$	86
271)	99.92	1,2,3,4-Tetrahydro-1,5-dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{16}$	83
272)	100.36	Decanal	$C_{10}H_{20}O$	91
273)	100.50	Dodecan	$C_{12}H_{26}$	98
274)	100.99	1,3-Dimethylindan	$C_{11}H_{14}$	86
275)	101.14	1,6-Dimethylindan	$C_{11}H_{14}$	90
276)	101.14	2,6-Dimethylundecan	$C_{13}H_{28}$	96
277)	101.18	2,5-Dimethylundecan	$C_{13}H_{28}$	95
278)	101.92	2,5-Dimethylbenzaldehyd	$C_9H_{10}O$	76
279)	102.43	3,6-Dimethylundecan	$C_{13}H_{28}$	72
280)	102.60	1,1,4-Trimethylindan	$C_{12}H_{16}$	93
281)	102.63	1,1,5-Trimethylindan	$C_{12}H_{16}$	93
282)	102.89	3,4-Dimethylbenzaldehyd	$C_9H_{10}O$	93
283)	102.98	4,7-Dimethylundecan	$C_{13}H_{28}$	72
284)	103.34	1,2,3,4-Tetrahydro-2-methylnaphthalin	$C_{11}H_{14}$	95
285)	103.42	4-Ethylbenzaldehyd	$C_9H_{10}O$	90
286)	103.52	2-Methyl-1,2,3-4-tetrahydronaphthalin	$C_{11}H_{14}$	96
287)	104.27	2-Butyl-1,1,3-trimethylbenzol	$C_{13}H_{26}$	94
288)	104.31	1,2,3,4-Tetrahydro-1-methylnaphthalin	$C_{11}H_{14}$	96
289)	105.58	(4-Methylpentyl)cyclohexan	$C_{12}H_{24}$	86
290)	105.75	Hexylcyclohexan	$C_{12}H_{24}$	72
291)	106.63	Decahydro-2-ethylnaphthalin	$C_{12}H_{22}$	91
292)	106.85	5-Methyldodecan	$C_{13}H_{28}$	78
293)	106.89	6-Methyldodecan	$C_{13}H_{28}$	95
294)	108.42	4,7-Dimethylindan	$C_{11}H_{14}$	95
295)	108.62	Nonansäure	$C_9H_{18}O_2$	94
296)	108.77	4-Methyldodecan	$C_{13}H_{28}$	93
297)	109.08	5,6-Dimethylindan	$C_{11}H_{14}$	92
298)	109.71	3-Methyldodecan	$C_{13}H_{28}$	91
299)	109.88	2,9-Dimethylundecan	$C_{13}H_{28}$	91
300)	109.97	(1,3-Dimethylbutyl)benzol	$C_{12}H_{18}$	53
301)	110.12	1-Decanol	$C_{10}H_{22}O$	91
302)	110.37	1,2,3,4-Tetrahydro-5-methylnaphthalin	$C_{11}H_{14}$	98
303)	110.47	Decahydro-1,2-dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{22}$	70
304)	111.41	1-Ethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	96
305)	114.81	1,1,4,6-Tetramethylindan	$C_{13}H_{18}$	91
306)	115.23	Tridecan	$C_{13}H_{28}$	99
307)	115.34	2-Methylnaphthalin	$C_{11}H_{10}$	97
308)	116.15	6-Methyltridecan	$C_{14}H_{30}$	83
309)	118.07	1,3-Isobenzofurandion	$C_8H_4O_3$	94
310)	118.69	1-Methylnaphthalin	$C_{11}H_{10}$	97
311)	119.84	1,2,3,4-Tetrahydro-2,7-dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{16}$	96
312)	121.56	5-Methyltridecan	$C_{14}H_{30}$	72
313)	122.71	Decansäure	$C_{10}H_{20}O_2$	95
314)	122.81	4-Methyltridecan	$C_{14}H_{30}$	91
315)	123.54	2-Methyltridecan	$C_{14}H_{30}$	93
316)	124.20	1,2,3,4-Tetrahydro-1,1,6-trimethylnaphthalin	$C_{13}H_{18}$	96
317)	124.44	2,6,10-Trimethyldodecan	$C_{15}H_{32}$	64
318)	124.44	2,7,10-Trimethyldodecan	$C_{15}H_{32}$	78
319)	124.92	2,6,11-Trimethyldodecan	$C_{15}H_{32}$	86
320)	124.92	6-Ethyl-1,2,3,4-tetrahydronaphthalin	$C_{12}H_{16}$	90
321)	127.82	Biphenyl	$C_{12}H_{10}$	95
322)	128.87	Tetradecan	$C_{14}H_{30}$	98
323)	129.18	5,8-Dimethyltridecan	$C_{15}H_{32}$	83
324)	129.65	2-Methylbiphenyl	$C_{13}H_{12}$	96
325)	129.70	5,6-Dimethyl-1,2,3,4-tetrahydronaphthalin	$C_{12}H_{16}$	95
326)	129.75	1,1,3-Trimethylindan	$C_{12}H_{16}$	94

Lfd. Nr.	RT [min.]	Substanz	Summenformel	Qualitäts-aussage
327)	130.16	2-Ethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	94
328)	131.24	2,3-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	97
329)	133.20	1,7-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	96
330)	133.30	1,3-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	97
331)	133.81	1,5-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	98
332)	134.42	1,4-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	96
333)	134.43	1,6-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	98
334)	134.61	2,6-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	97
335)	137.04	2,3,7-Trimethyldecan	$C_{13}H_{28}$	72
336)	137.11	2,7-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	97
337)	137.53	3-Methyltetradecan	$C_{15}H_{32}$	97
338)	138.39	Cyclododecan	$C_{12}H_{24}$	94
339)	138.46	Nonylcycloproan	$C_{12}H_{24}$	94
340)	138.74	1,2-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	96
341)	140.86	Pentadecan	$C_{15}H_{32}$	96
342)	141.70	Phthalsäure-bis-(2-methylpropyl)ester	$C_{16}H_{22}O_4$	95
343)	144.12	2,6-Di-tetr.-butyl-4-methylphenol	$C_{15}H_{24}O$	94
344)	144.69	2-(1-Methylethyl)naphthalin	$C_{13}H_{14}$	91
345)	145.52	2-Naphthaldehyd	$C_{11}H_8O$	97
346)	146.36	1,1,4,5,6-Pentamethyl-2,3-dihydroinden	$C_{14}H_20$	94
347)	148.03	1,6,7-Trimethylnaphthalin	$C_{13}H_{14}$	96
348)	148.23	1,4,6-Trimethylnaphthalin	$C_{13}H_{14}$	98
349)	148.59	Dodecansäure	$C_{12}H_{24}O_2$	90
350)	154.70	Phthalsäurediethylester	$C_{12}H_{14}O_4$	97
351)	159.30	Hexadecan	$C_{16}H_{34}$	95
352)	166.60	Heptadecan	$C_{17}H_{36}$	98
353)	167.80	2,6,10,14-Tetramethylpentadecan	$C_{19}H_{40}$	96
354)	171.42	Phthalsäurebutyl-2-methylpropylester	$C_{16}H_{22}O_4$	97
355)	173.38	Phthalsäurdibutylester	$C_{16}H_{22}O_4$	94
356)	175.54	Tetradecansäure	$C_{14}H_{28}O_2$	99

Die grau unterlegten Substanzen wurden zu Beginn des Projektes mit einem anderem Temperaturprogramm analysiert, wodurch die niedrigen Retentionszeiten resultieren.

Stoffe mit einer Qualitätsaussage > 85 wurden in die nähere Untersuchung einbezogen.

Hierbei wurde zu jedem einzelnen Stoff die einschlägige Referenzsubstanz (Vergleichssubstanz als Reinstsubstanz, bezogen von einschlägigen Chemikalienlieferanten) massenspektrometrisch untersucht und die erhaltenen Massenspektren mit denen der Stoffe verglichen, deren Qualitätsaussage >85 lag. Als zweites Kriterium wurde die Retentionszeit bei gleichen gaschromatografischen Bedingungen herangezogen. Nach diesen Untersuchungen können die in Tabelle 26 angegebenen Stoffe als im Abgas der untersuchten Triebwerke sicher identifiziert angesehen werden. Die in Tabelle 26 angegebenen Stoffe wurden daraufhin auch in die quantitative Auswertung einbezogen.

Tabelle 26: Zusammenstellung der sicher identifizierten Substanzen

(durch Gegenspritzen von Standards in Bezug auf vergleichbare Massenspektren, sowie identische Retentionszeiten sichergestellt)

Sicher identifizierte Substanzen		
Lfd. Nr.	**Substanz**	**Ret.-Zeit [min.]**
1)	1-Hexen	17.8
2)	2-Methylfuran	18.6
3)	Methylcyclopentan	21.1
4)	Benzol	23.6
5)	Cyclohexen	25.4
6)	1-Hepten	26.5
7)	Heptan	27.3
8)	Toluol	35.2
9)	1-Octen	37.3
10)	Hexanal	38.2
11)	1,1,3-Trimethylcyclohexan	38.7
12)	Octan	38.9
13)	Mesityloxid	38.9
14)	Propylcyclopentan	42.6
15)	Ethylcyclohexan	43.6
16)	Ethylbenzol	47.8
17)	p-/ m-Xylol	48.9
18)	Ethynylbenzol	49.4
19)	1-Nonen	51.5
20)	Styrol	51.6
21)	o-Xylol	52.1
22)	Nonan	52.8
23)	2,6-Dimethyloctan	58.1
24)	Propylbenzol	61.1
25)	4-Methylnonan	62.2
26)	Benzaldehyd	62.3
27)	2-Methylnonan	62.4
28)	3-Ethyltoluol	62.6
29)	4-Ethyltoluol	62.9
30)	3-Methylnonan	63.1
31)	Mesitylen	63.4
32)	Phenol	64.5
33)	2-Ethyltoluol	65.8
34)	Pseudocumol	67.8
35)	Decan	67.9
36)	sec. Butylbenzol	70.7
37)	p-Cymol	72.6
38)	1,2,3-Trimethylbenzol	72.8
39)	Butylcyclohexan	74.1
40)	Indan	74.4
41)	Inden	76.5
42)	1,4-Diethylbenzol	76.5
43)	Butylbenzol	77.2
44)	trans-Decahydronaphthalin	77.9
45)	2-Methylbenzaldehyd	78.4
46)	1-Phenylethanol	78.5
47)	Acetophenon	78.5
48)	1,2-Diethylbenzol	78.9
49)	4-Methylbenzaldehyd	82.1
50)	Undecan	83.6
51)	1,2,3,5-Tetramethylbenzol	88.3

Sicher identifizierte Substanzen		
Lfd. Nr.	**Substanz**	**Ret.-Zeit [min.]**
52)	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin	94.2
53)	Naphthalin	98.8
54)	Dodecan	99.1
55)	Tridecan	113.9
56)	2-Methylnaphthalin	115.5
57)	1-Methylnaphthalin	117.6
58)	Biphenyl	127.3
59)	Tetradecan	128.1
60)	1-Ethylnaphthalin	131.1
61)	1,3-Dimethylnaphthalin	132.2
62)	1,6-Dimethylnaphthalin	132.6
63)	1,4-Dimethylnaphthalin	136.2
64)	Pentadecan	140.8
65)	Hexadecan	153.3
66)	Heptadecan	166.2
67)	Octadecan	180.7
68)	Nonadecan	205.0

Die vorstehende Tabelle 26 zeigt eine summarische Aufstellung der **sicher** identifizierten Substanzen unabhängig vom Triebwerkstyp. Bezogen auf die untersuchten Triebwerke (siehe Abschn. 10.2, Kap. 2) ergeben sich jedoch geringfügige Differenzen.

In den nachfolgenden Tabellen 27 und 28 sind die auf den jeweiligen Triebwerkstyp bezogenen, sicher identifizierten Stoffe dargestellt.

Tabelle 27 :Triebwerkstyp CF 6 -50E2/C2

-Übersicht der sicher identifizierten Substanzen-

Sicher identifizierte Substanzen (CF6-50E/C)				
Lfd. Nr.	**RT [min.]**	**Substanz**	**Summen-formel**	**Qualitäts-aussage**
1)	17.38	Methylcyclopentan	C_6H_{12}	87
2)	22.57	1-Hexen	C_6H_{12}	96
3)	24.06	Benzol	C_6H_6	91
4)	26.08	Cyclohexen	C_6H_{10}	90
5)	27.79	Heptan	C_7H_{16}	93
6)	31.57	1-Hepten	C_7H_{14}	97
7)	35.06	Toluol	C_7H_8	91
8)	38.25	1-Octen	C_8H_{16}	97
9)	38.84	Octan	C_8H_{18}	97
10)	39.18	Hexanal	$C_6H_{12}O$	96
11)	39.77	1,1,3-Trimethylcyclohexan	C_9H_{18}	94
12)	43.75	Propylcyclopentan	C_8H_{16}	91
13)	44.11	Ethylcyclohexan	C_8H_{16}	95
14)	47.46	Ethylbenzol	C_8H_{10}	90
15)	49.35	m-Xylol	C_8H_{10}	97
16)	49.35	p-Xylol	C_8H_{10}	97
17)	49.99	Ethynylbenzol	C_8H_6	94
18)	52.16	1-Nonen	C_9H_{18}	98
19)	52.18	o-Xylol	C_8H_{10}	97
20)	52.25	Styrol	C_8H_8	97
21)	53.46	Nonan	C_9H_{20}	98
22)	61.17	Propylbenzol	C_9H_{12}	91
23)	62.33	4-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	95

Sicher identifizierte Substanzen (CF6-50E/C)				
Lfd. Nr.	**RT [min.]**	**Substanz**	**Summen-formel**	**Qualitäts-aussage**
24)	62.70	Benzaldehyd	C_7H_6O	97
25)	62.89	2-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	93
26)	63.25	3-Ethyltoluol	C_9H_{12}	97
27)	63.44	4-Ethyltoluol	C_9H_{12}	95
28)	63.62	Pseudocumol	C_9H_{12}	97
29)	63.96	2,6-Dimethyloctan	$C_{10}H_{22}$	90
30)	64.03	3-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	94
31)	64.14	Mesitylen	C_9H_{12}	97
32)	64.19	Phenol	C_6H_6O	94
33)	65.83	2-Ethyltoluol	C_9H_{12}	97
34)	69.08	Decan	$C_{10}H_{22}$	98
35)	70.72	sec. Butylbenzol	$C_{10}H_{14}$	95
36)	72.52	p-Cymol	$C_{10}H_{14}$	96
37)	74.23	Butylcyclohexan	$C_{10}H_{20}$	97
38)	75.22	Indan	C_9H_{10}	94
39)	76.40	1,4-Diethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	95
40)	76.62	Inden	C_9H_{10}	94
41)	77.43	Butylbenzol	$C_{10}H_{14}$	94
42)	78.92	trans-Decahydronaphthalin	$C_{10}H_{18}$	97
43)	79.68	2-Methylbenzaldehyd	C_8H_8O	96
44)	82.14	4-Methylbenzaldehyd	C_8H_8O	96
45)	84.53	Undecan	$C_{11}H_{24}$	98
46)	88.74	1,2,3,5-Tetramethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	92
47)	98.36	Naphthalin	$C_{10}H_8$	95
48)	99.93	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin	$C_{10}H_{12}$	96
49)	100.50	Dodecan	$C_{12}H_{26}$	98
50)	115.23	Tridecan	$C_{13}H_{28}$	99
51)	116.44	2-Methylnaphthalin	$C_{11}H_{10}$	96
52)	118.69	1-Methylnaphthalin	$C_{11}H_{10}$	97
53)	127.03	Biphenyl	$C_{12}H_{10}$	95
54)	128.87	Tetradecan	$C_{14}H_{30}$	98
55)	133.76	1,3-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	97
56)	134.42	1,4-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	96
57)	134.43	1,6-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	98
58)	135.20	1-Ethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	96
59)	140.86	Pentadecan	$C_{15}H_{32}$	96
60)	159.30	Hexadecan	$C_{16}H_{34}$	95
61)	166.87	Heptadecan	$C_{17}H_{36}$	97

Tabelle 28 : Triebwerkstyp CFM 56 -3 B1/2, C1

-Übersicht der sicher identifizierten Substanzen-

Sicher identifizierten Substanzen CFM 56-3B1/2, C				
Lfd. Nr.	**RT [min.]**	**Substanz**	**Summen-formel**	**Qualitäts-aussage**
1)	17.51	1-Hexen	C_6H_{12}	95
2)	17.52	Methylcyclopentan	C_6H_{12}	87
3)	17.73	1-Hepten	C_7H_{14}	97
4)	23.91	Benzol	C_6H_6	91
5)	25.27	1-Octen	C_8H_{16}	97
6)	25.84	Cyclohexen	C_6H_{10}	87
7)	27.59	Heptan	C_7H_{16}	95
8)	34.23	m-Xylol	C_8H_{10}	97
9)	34.91	Ethynylbenzol	C_8H_6	94
10)	35.31	Toluol	C_7H_8	91
11)	36.18	1-Nonen	C_9H_{18}	98
12)	39.20	Octan	C_8H_{18}	95
13)	41.78	2,6-Dimethyloctan	$C_{10}H_{22}$	93
14)	44.17	Ethylcyclohexan	C_8H_{16}	90
15)	45.93	2-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	94
16)	46.91	3-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	95
17)	47.99	Ethylbenzol	C_8H_{10}	93
18)	49.09	p-Xylol	C_8H_{10}	97
19)	51.93	Styrol	C_8H_8	96
20)	52.36	o-Xylol	C_8H_{10}	97
21)	52.79	Nonan	C_9H_{20}	95
22)	61.49	Propylbenzol	C_9H_{12}	91
23)	62.33	4-Methylnonan	$C_{10}H_{22}$	91
24)	62.40	Benzaldehyd	C_7H_6O	96
25)	62.94	3-Ethyltoluol	C_9H_{12}	97
26)	63.21	4-Ethyltoluol	C_9H_{12}	95
27)	63.76	Mesitylen	C_9H_{12}	97
28)	64.38	Phenol	C_6H_6O	97
29)	65.57	2-Ethyltoluol	C_9H_{12}	95
30)	67.96	Pseudocumol	C_9H_{12}	94
31)	68.27	Decan	$C_{10}H_{22}$	95
32)	70.48	sec. Butylbenzol	$C_{10}H_{14}$	93
33)	72.73	1,2,3-Trimethylbenzol	C_9H_{12}	93
34)	74.07	Butylcyclohexan	$C_{10}H_{20}$	95
35)	74.84	Indan	C_9H_{10}	93
36)	76.36	1,4-Diethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	94
37)	76.46	Inden	C_9H_8	93
38)	77.28	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin	$C_{10}H_{12}$	96
39)	77.74	Butylbenzol	$C_{10}H_{14}$	93
40)	78.06	1,2,3,5-Tetramethylbenzol	$C_{10}H_{14}$	91
41)	78.17	trans-Decahydronaphthalin	$C_{10}H_{18}$	98
42)	79.10	Acetophenon	C_8H_8O	90
43)	79.49	2-Methylbenzaldehyd	C_8H_8O	96
44)	81.17	p-Cymol	$C_{10}H_{14}$	87
45)	81.91	4-Methylbenzaldehyd	C_8H_8O	96
46)	83.81	Undecan	$C_{11}H_{24}$	94
47)	98.78	Naphthalin	$C_{10}H_8$	94
48)	98.96	Dodecan	$C_{12}H_{26}$	94
49)	100.04	1-Methylnaphthalin	$C_{11}H_{10}$	97
50)	111.41	1-Ethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	96
51)	113.82	Tridecan	$C_{13}H_{28}$	95
52)	115.87	2-Methylnaphthalin	$C_{11}H_{10}$	97

Sicher identifizierten Substanzen CFM 56-3B1/2, C				
Lfd. Nr.	**RT [min.]**	**Substanz**	**Summen-formel**	**Qualitäts-aussage**
53)	127.26	Biphenyl	$C_{12}H_{10}$	93
54)	128.41	Tetradecan	$C_{14}H_{30}$	95
55)	133.30	1,3-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	97
56)	133.80	1,6-Dimethylnaphthalin	$C_{12}H_{12}$	98
57)	135.55	Hexadecan	$C_{16}H_{34}$	94
58)	141.65	Pentadecan	$C_{15}H_{32}$	94
59)	166.60	Heptadecan	$C_{17}H_{36}$	98

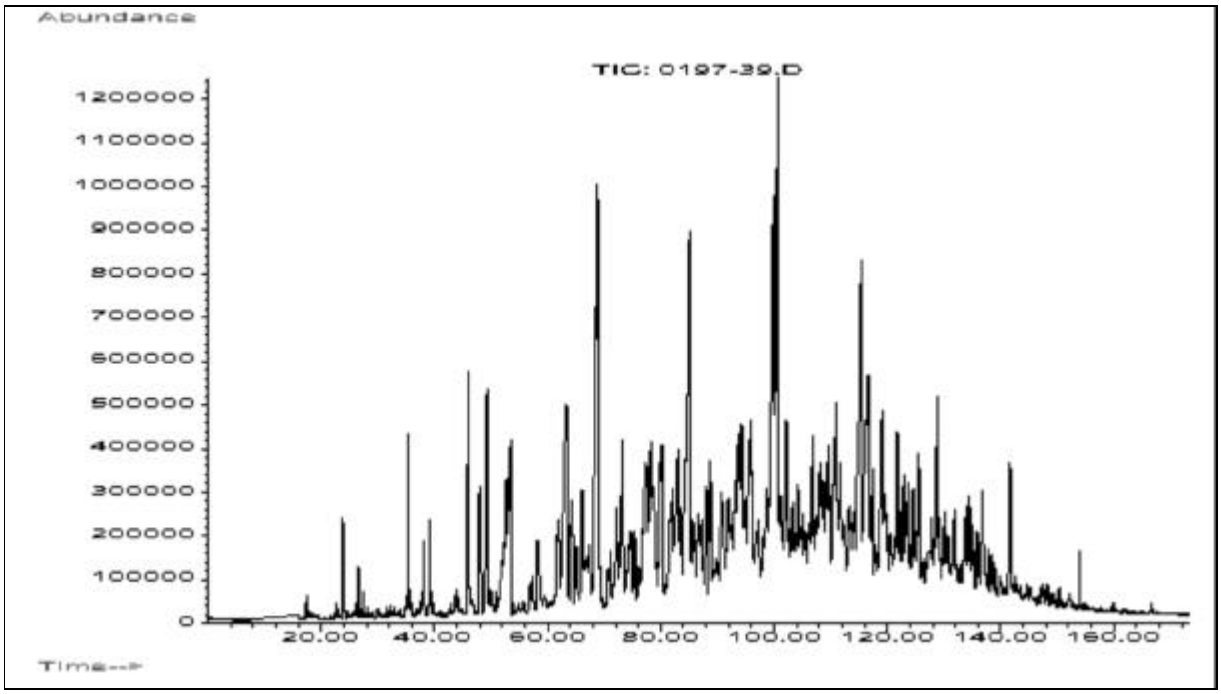


Abbildung 41: Massenspektrogramm einer Abgasprobe aus Triebwerktyp CF6-50E/C

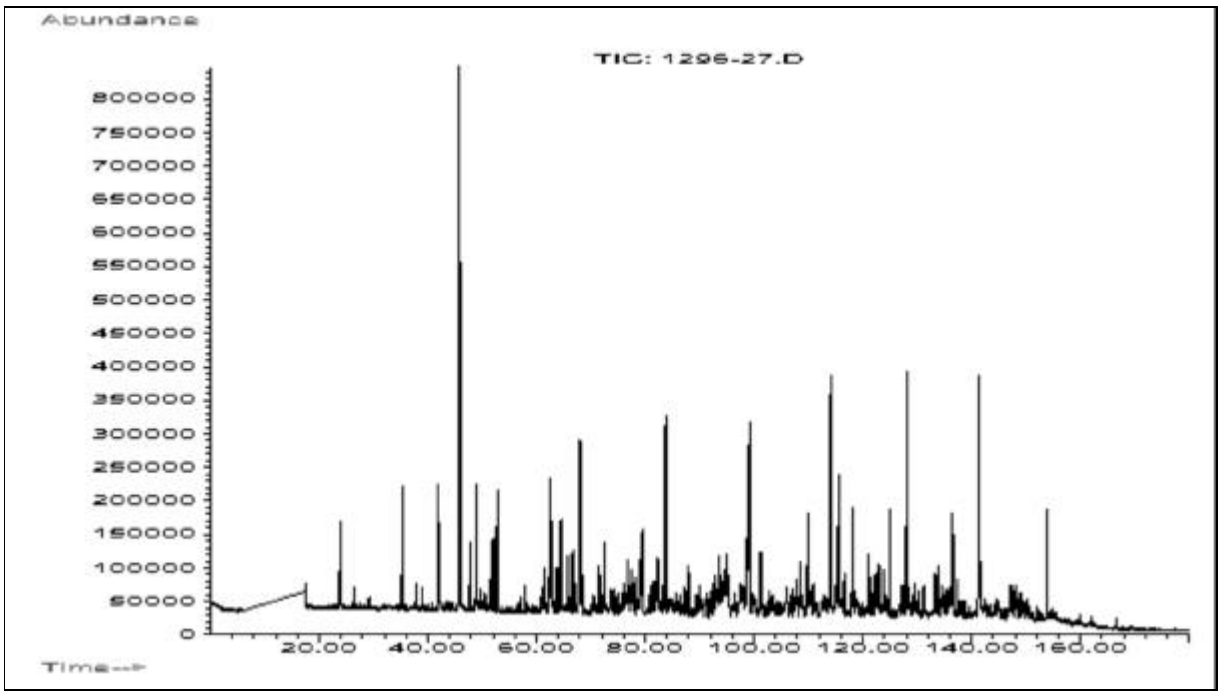


Abbildung 42: Massenspektrogramm einer Abgasprobe aus Triebwerktyp CFM56-3

Charakteristische Massenspektrogramme, die nach entsprechender Aufarbeitung und massenspektrometrischer Analyse von Abgasproben aus zivilen Flugzeugtriebwerken erhalten wurden zeigen die Abbildungen 41 und 42. Die Massenspektrogramme aller im Rahmen dieses Programmes erhaltenen Abgasproben finden sich im Materialienanhang auf der beigefügten CD-ROM.

In einem weiteren Schritt der qualitativen Auswertung der erhaltenen Meßdaten aus realen Abgasproben wurden die in Tabelle 26 als sicher identifizierten Stoffe untereinander ins Verhältnis gesetzt.
Als Bezugsstoff wurde der Komponente **Undecan** hierbei willkürlich der Wert **1** zugeordnet. Alle anderen Stoffe wurden auf diesen Wert bezogen. Zuvor wurden die Abgasproben nach Triebwerkstyp, den Lastzuständen
1. Gesamtprüflauf,
2. „(Ground) Idle“,
3. „Approach (Flight) Idle“,
4. „Maximum Continuous“, und
5. „Take off“ sowie
den unterschiedlichen Sorptionsmitteln geordnet.

Innerhalb dieser Lastzustands-Zuordnungen wurden sog. „Konzentrationsbereichskurven“ sowie sog. „Verhältniskurven“ erstellt.

Aus den Konzentrationsbereichskurven ist für die innerhalb einer Lastzustands-Zuordnungsgruppe meßtechnisch erfaßten Triebwerke der für jeden der in Tabelle 26 angegebenen Stoffe ermittelte Konzentrationsbereich ablesbar.

Eine ähnliche Aussage ist für die Verhältniskurven zu treffen.

Eine Analyse aller Verhältniskurven innerhalb einer Lastzustands-Zuordnungsgruppe läßt erkennen, daß die Kurven der untersuchten Triebwerke über weite Bereiche einen ähnlichen Verlauf aufweisen.

In gleicher Weise trifft dies auf die Verhältniskurven aus den „Hinterherfahrten“ (Abschn. 17, Kap. 2) zu. Dies läßt den Schluß zu, daß die Abgase aus Flugzeugtriebwerken, bezogen auf die in ihnen enthaltenen organischen Stoffe, charakteristische Merkmale aufweisen.

In den Abbildungen 43 bis 55 wird dieser Zusammenhang verdeutlicht.

Zunächst werden die **Konzentrationsbereiche** der Einzelsubstanzen angegeben. Die Kurven zeigen den Mittelwert, wie auch den maximalen und minimalen Konzentrationswert in mg/m³ eines Stoffes.

Das Auftragen der organischen Substanzen auf der x-Achse der Grafiken erfolgte nach dem Gesichtspunkt, daß die Substanzen bei denen im Vergleich der Kurven die häufigsten Übereinstimmungen oder „Ähnlichkeiten“ im Kurvenverlauf feststellbar war, auf der x-Achse am weitesten links angeordnet wurden.

Die **Konzentrationsbereiche** kommen vermutlich deshalb zustande, weil nicht jeder Prüflauf in seinem Gesamtablauf mit dem vorherigen und/oder dem nächst folgenden absolut identisch sein kann. Z.B. zwingen immer wieder zwischen die einzelnen Phasen des Prüflaufes einzuschiebende Tests oder auch bestimmte Imponderabilien wie z.B. Undichtigkeiten und damit ein Neustart des Tests zu Variationen, die sicherlich die Emissionen beeinträchtigen können. Ebenso ist auch davon auszugehen, daß die Betriebsweise der Triebwerke innerhalb bestimmter Toleranzgrenzen erfolgt, die sich dann auch auf die Emissionen auswirken.

Wesentlich erscheint allerdings bei der Betrachtung der nachstehenden Kurven die Feststellung, daß die Kurven ähnliche Verläufe aufweisen. Noch deutlicher sind die Ähnlichkeiten der Verläufe bei den sog. **Verhältniskurven**.

Hierbei sind z.T. Verhältniskurven aus Prüfläufen die zeitlich weit auseinanderliegen nahezu deckungsgleich. Für die Triebwerktypen CF6-50E2/C2 und CFM56-3 werden nachfolgend die Verhältnisse der organisch-chemischen Stoffe untereinander in sog. Verhältniskurven dargestellt. Hierbei ist zu beachten, daß im Rahmen dieser Darstellungen eine Gesamtwiedergabe aller Untersuchungen erfolgt. Die Verhältniskurven aller einzelnen meßtechnisch erfaßten Prüfläufe und „Hinterherfahrten“ befinden sich im Materialenteil auf der beiliegenden CD-ROM.

Bei den „Hinterherfahrten“ entsprechend der Beschreibung in Abschn. 17, Kap. 2 wurden ebenso sog. >Konzentrationskurven< und >Verhältniskurven< der einzelnen ermittelten organisch-chemischen Stoffe erstellt. Diese werden in den nachfolgenden Abbildungen 56 bis 57 dargestellt.

Bei der Betrachtung der Konzentrations- und Verhältniskurven wird auf den Unterschied des Konzentrationsniviaues zwischen den Triebwerken CF6-50 E2/C2 und CFM56-3 hingewiesen. Hierbei wurde ein Verhältnis von ca. 10:1 festgestellt. Hierdurch bedingt ist es erklärbar, daß im Kurvenverlauf für die Triebwerke vom Typ CFM56-3 nicht immer eine so signifikante Ausprägung festgestellt wird, wie dies beim Triebwerkstyp CF6-50 erkennbar ist.

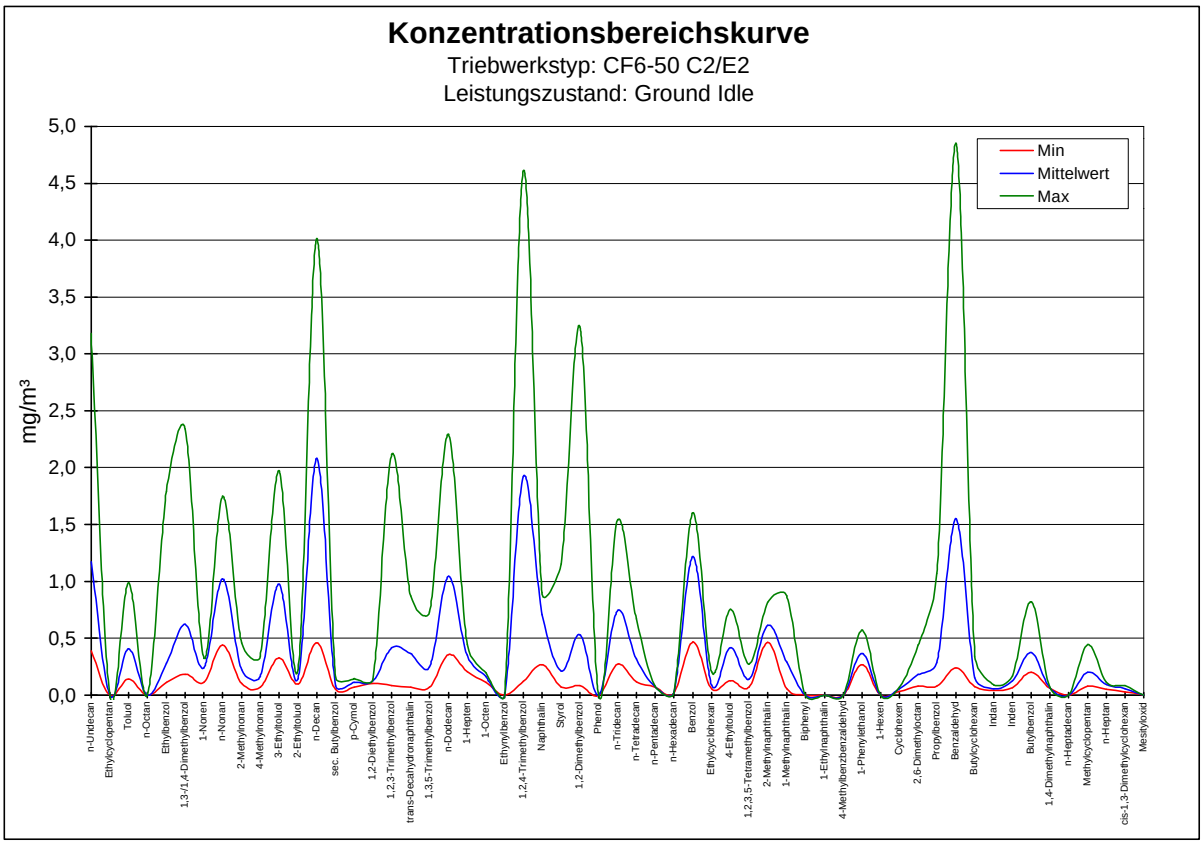


Abbildung 43: Konzentrationsbereichskurve CF6-50 C2/E2

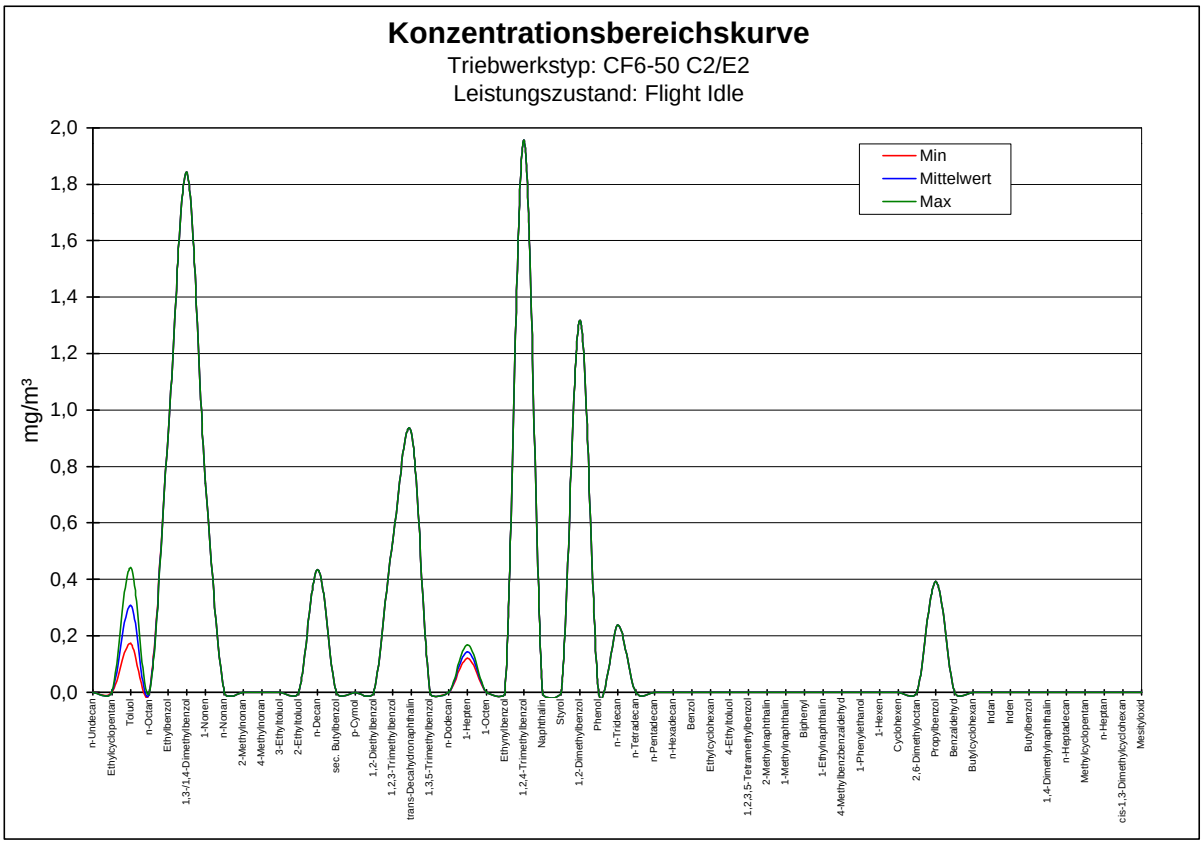


Abbildung 44: Konzentrationsbereichskurve CF6-50 C2/E2

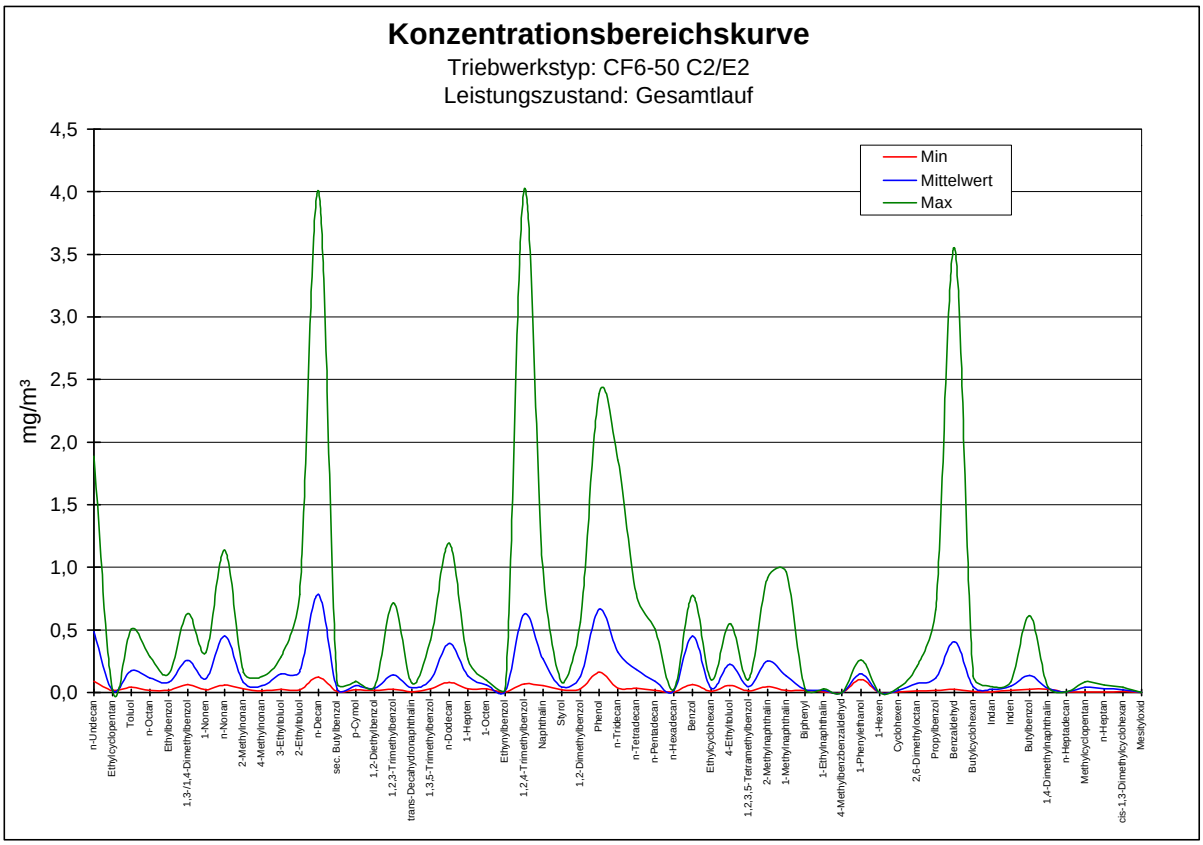


Abbildung 45: Konzentrationsbereichskurve CF6-50 C2/E2

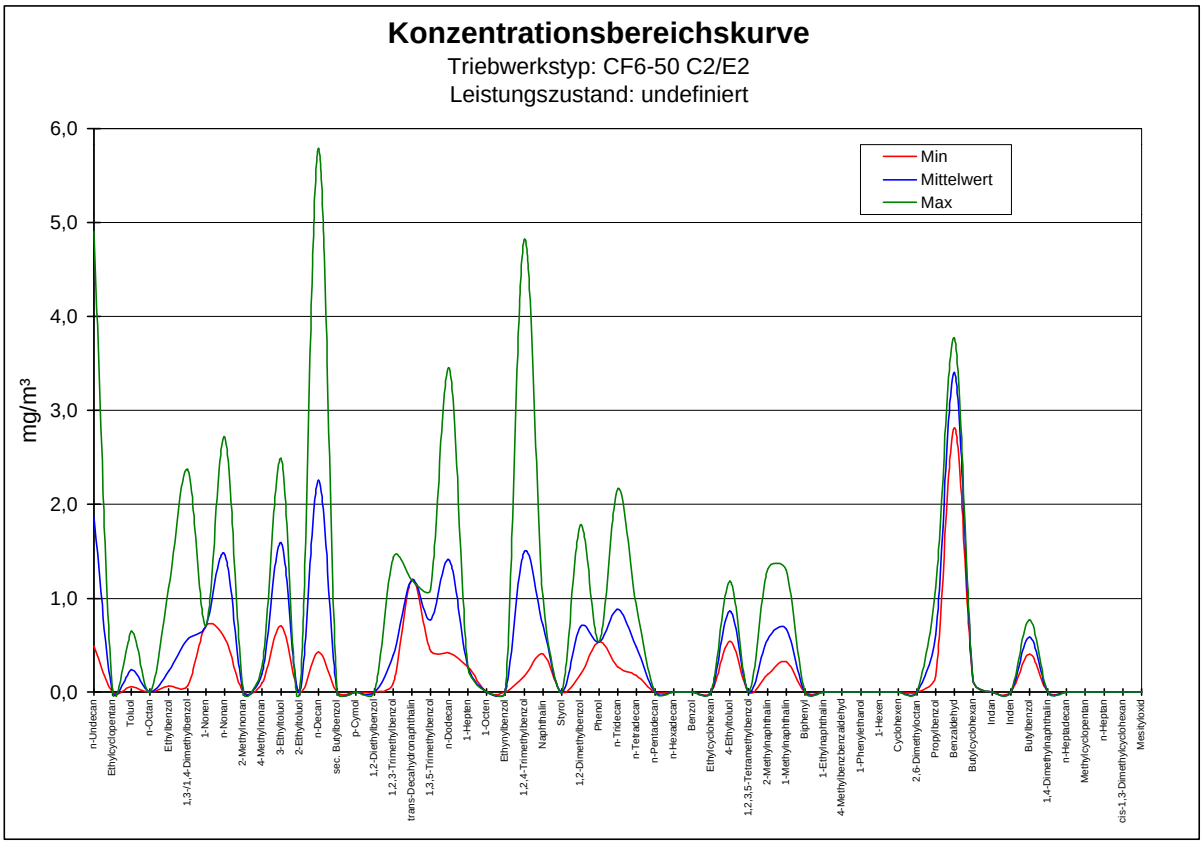


Abbildung 46: Konzentrationsbereichskurve CF6-50 C2/E2

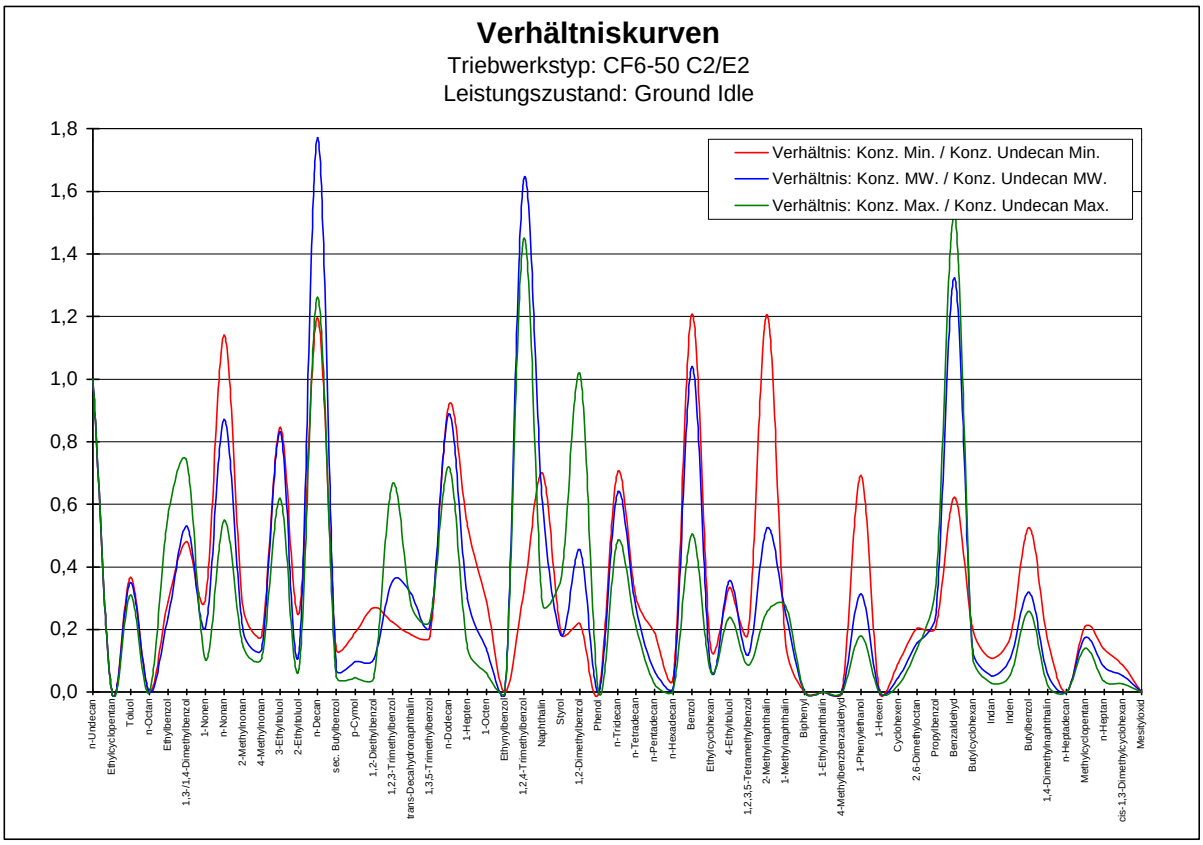


Abbildung 47: Verhältniskurve CF6-50 C2/E2

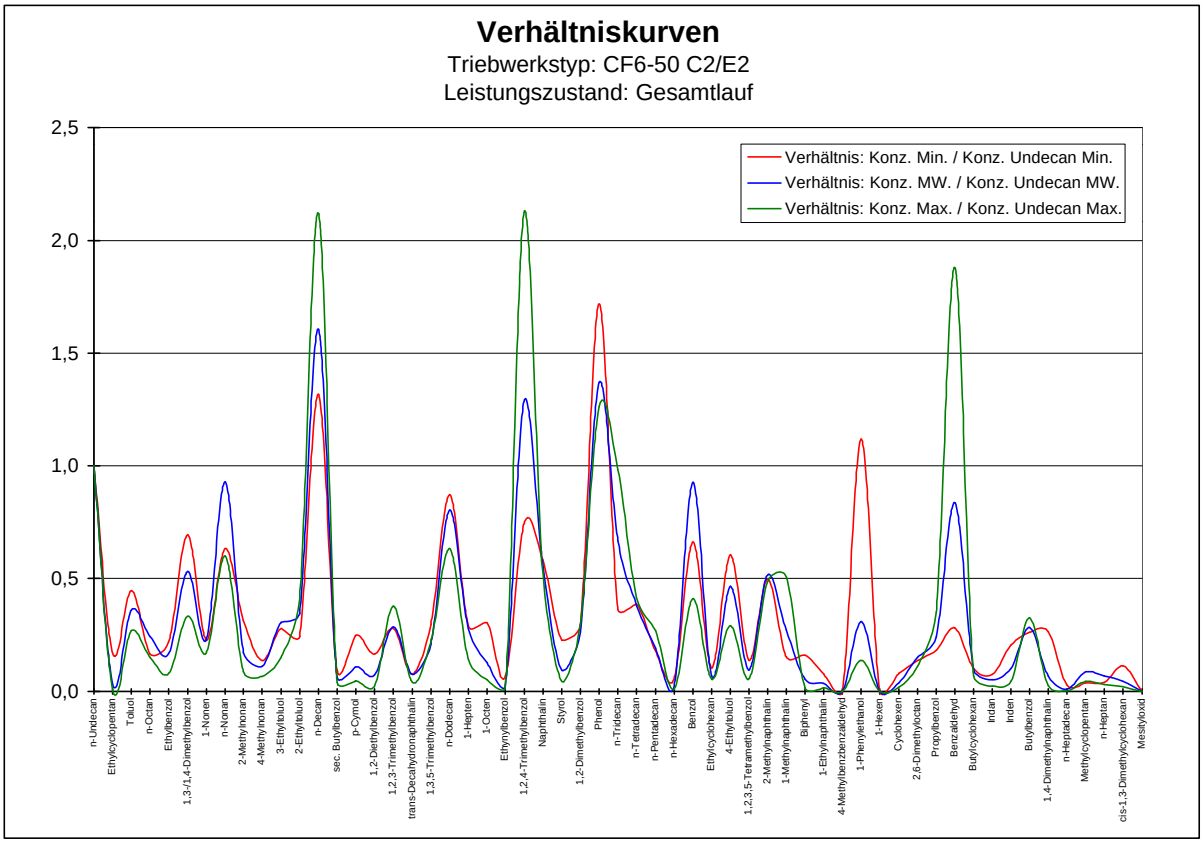


Abbildung 48: Verhältniskurve CF6-50 C2/E2

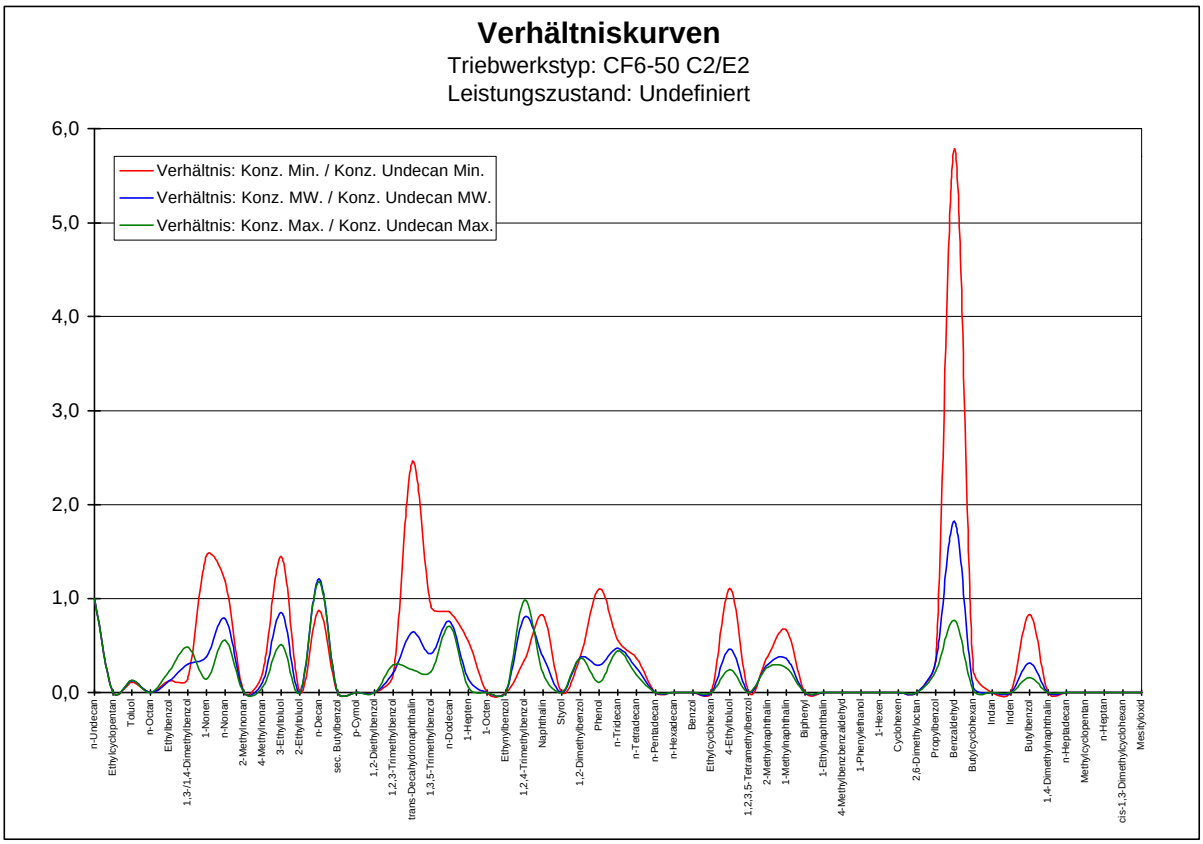


Abbildung 49: Verhältniskurve CF6-50 C2/E2

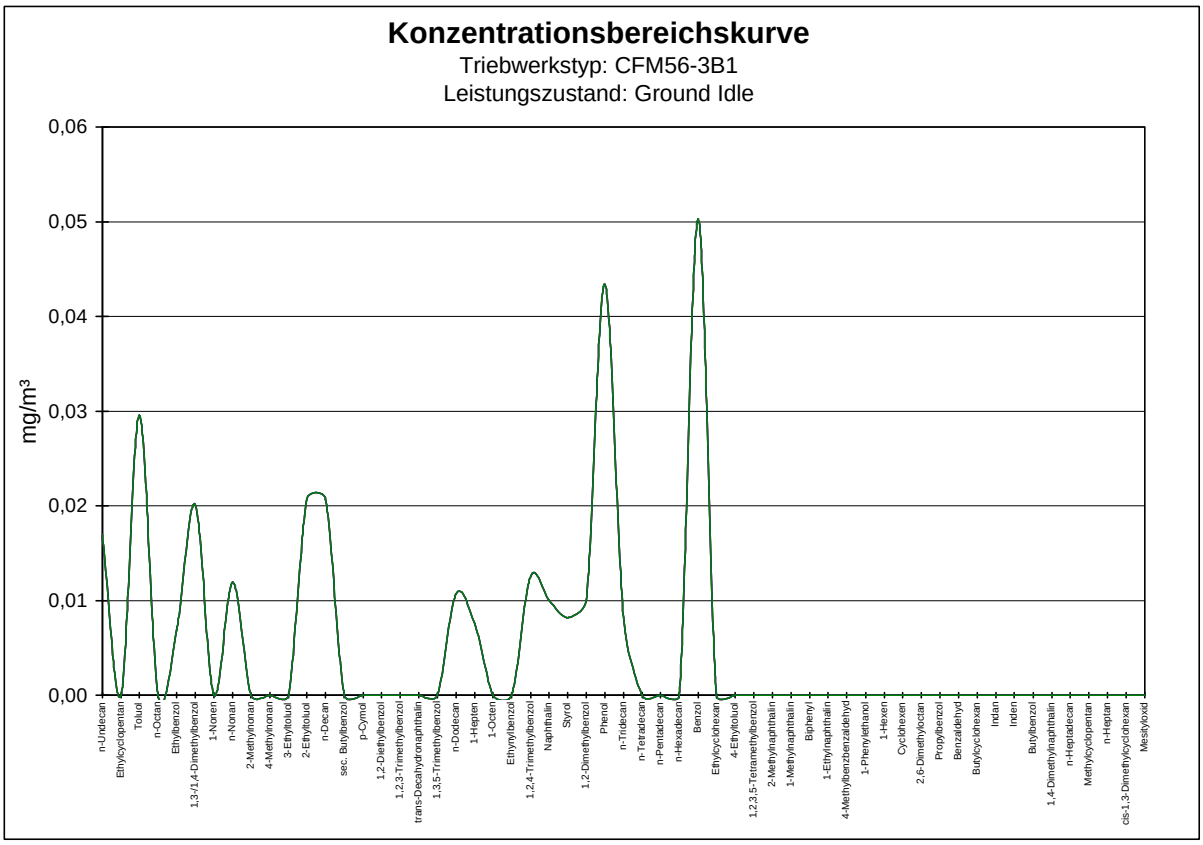


Abbildung 50: Konzentrationsbereichskurve CFM56-3B1

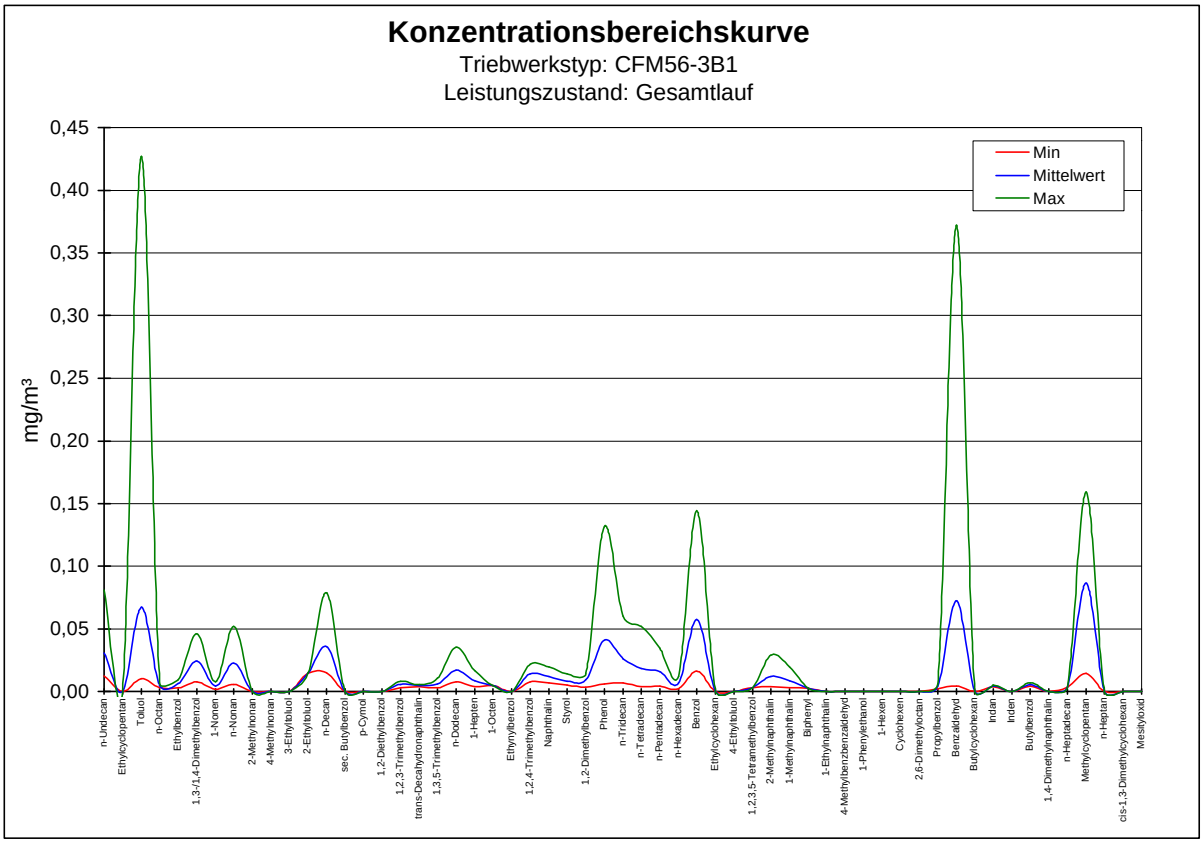


Abbildung 51: Konzentrationsbereichskurve CFM56-3B1

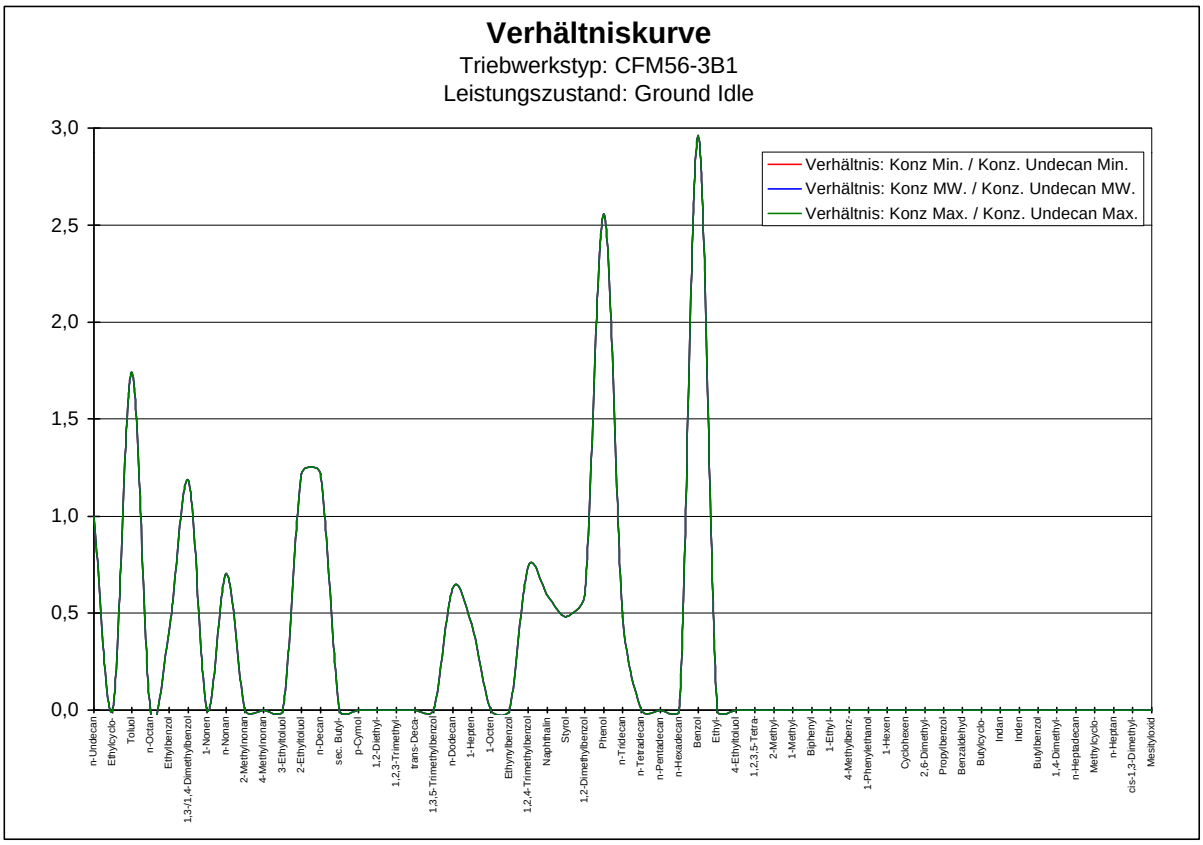


Abbildung 52: Verhältniskurve CFM56-3B1

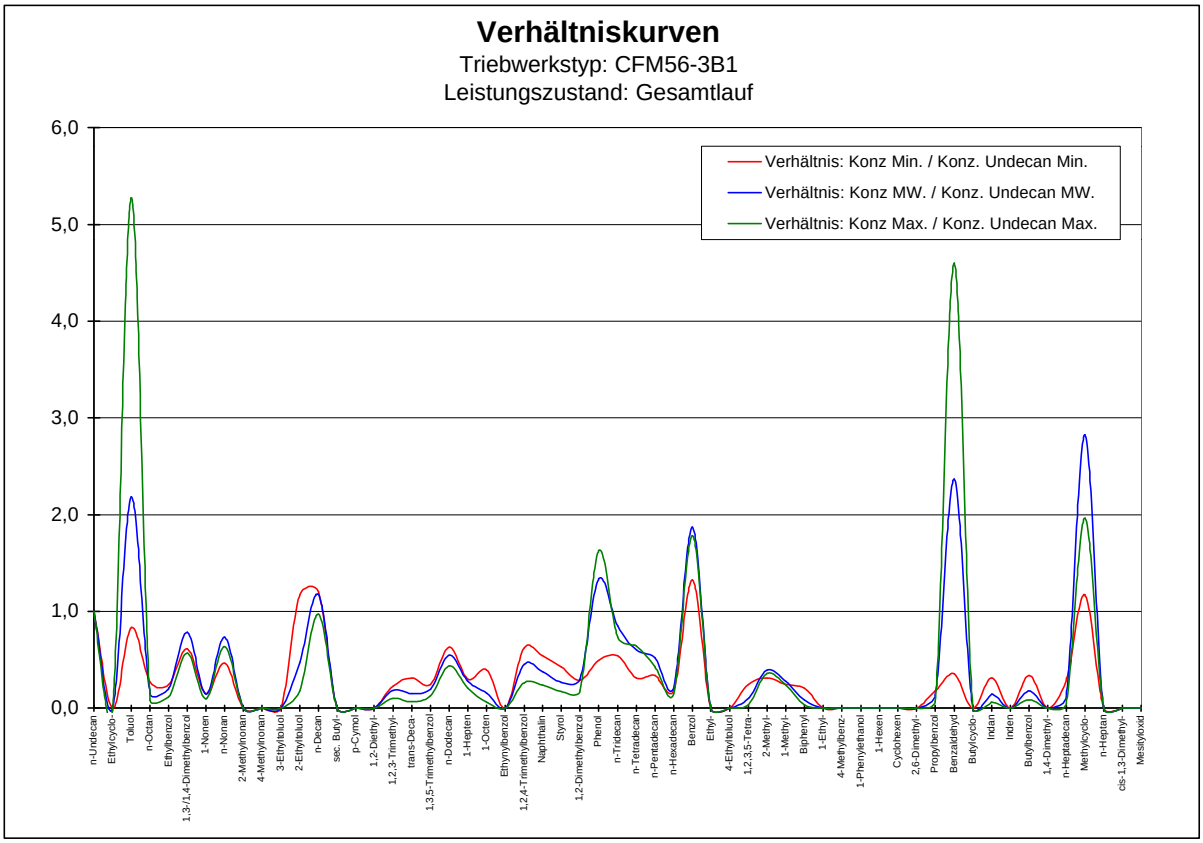


Abbildung 53: Verhältniskurve CFM56-3B1

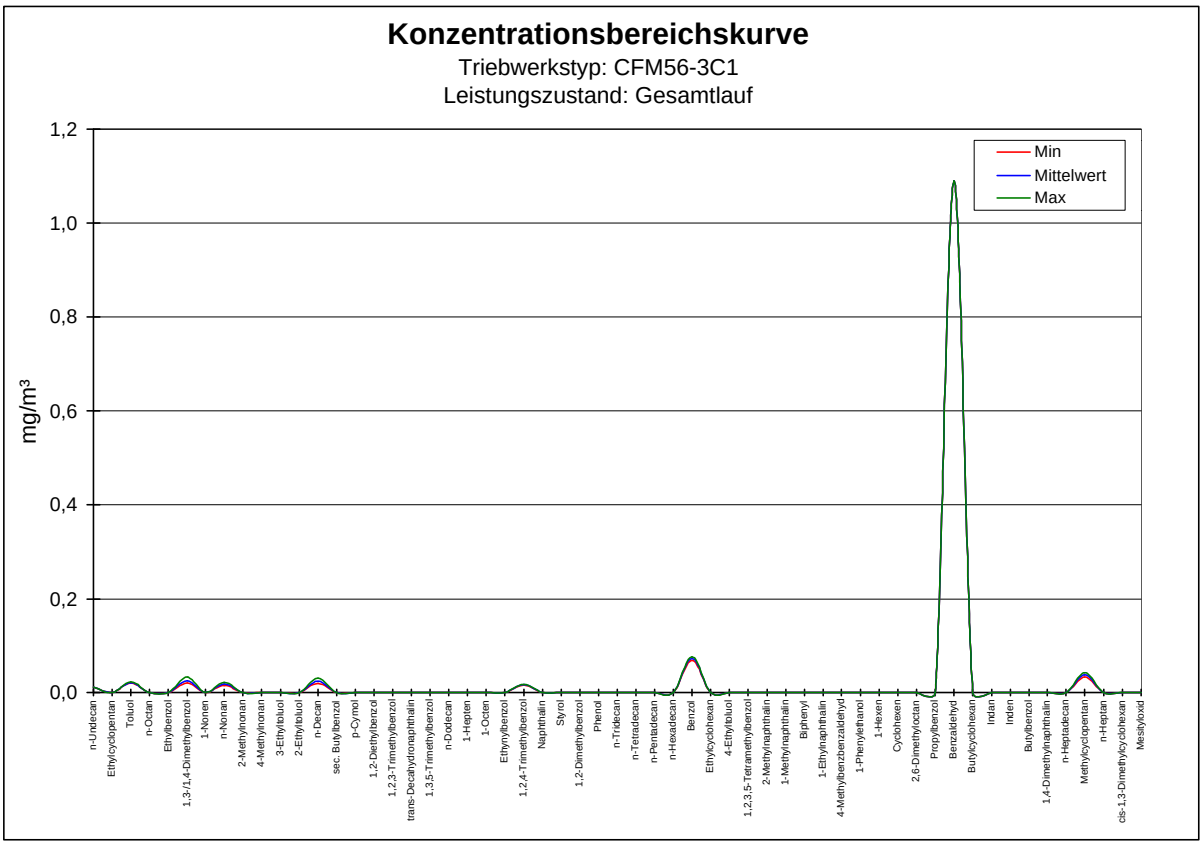


Abbildung 54: Konzentrationsbereichskurve CFM56-3C1

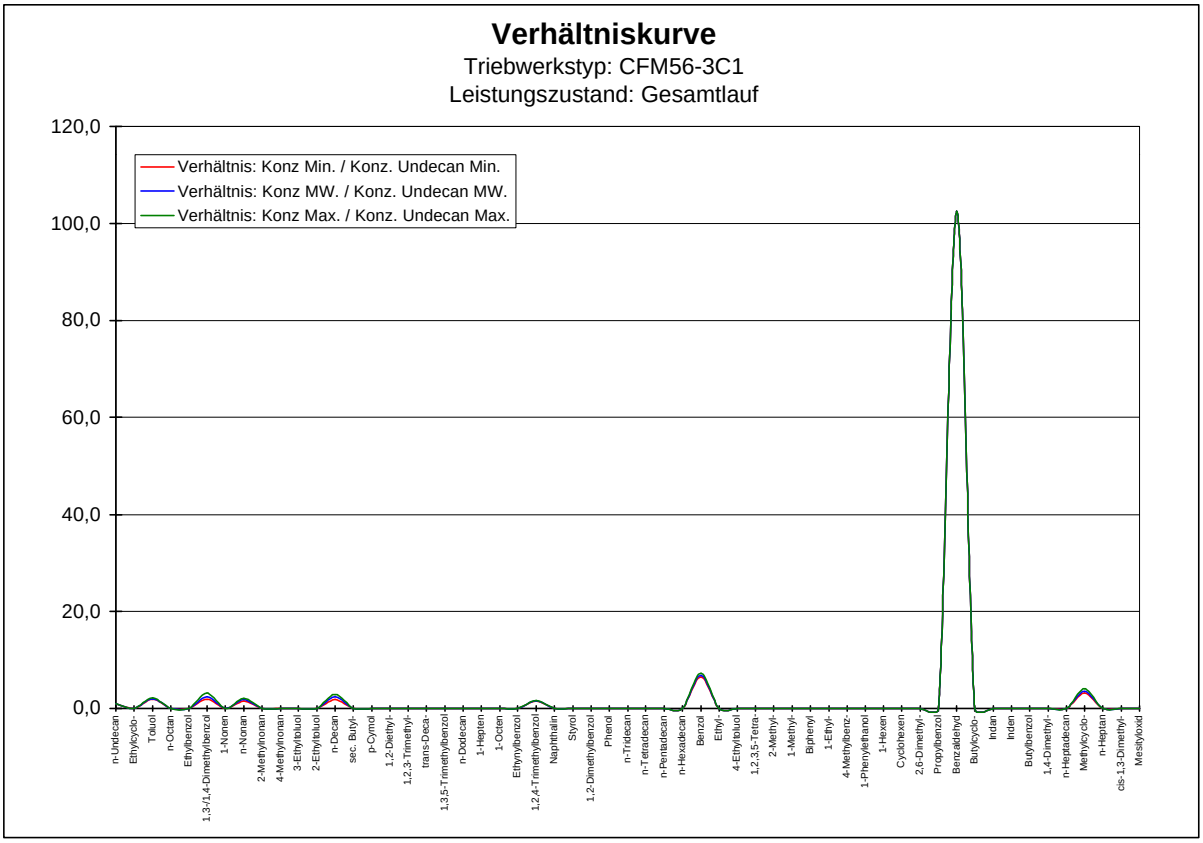


Abbildung 55: Verhältniskurve CFM56-3C1

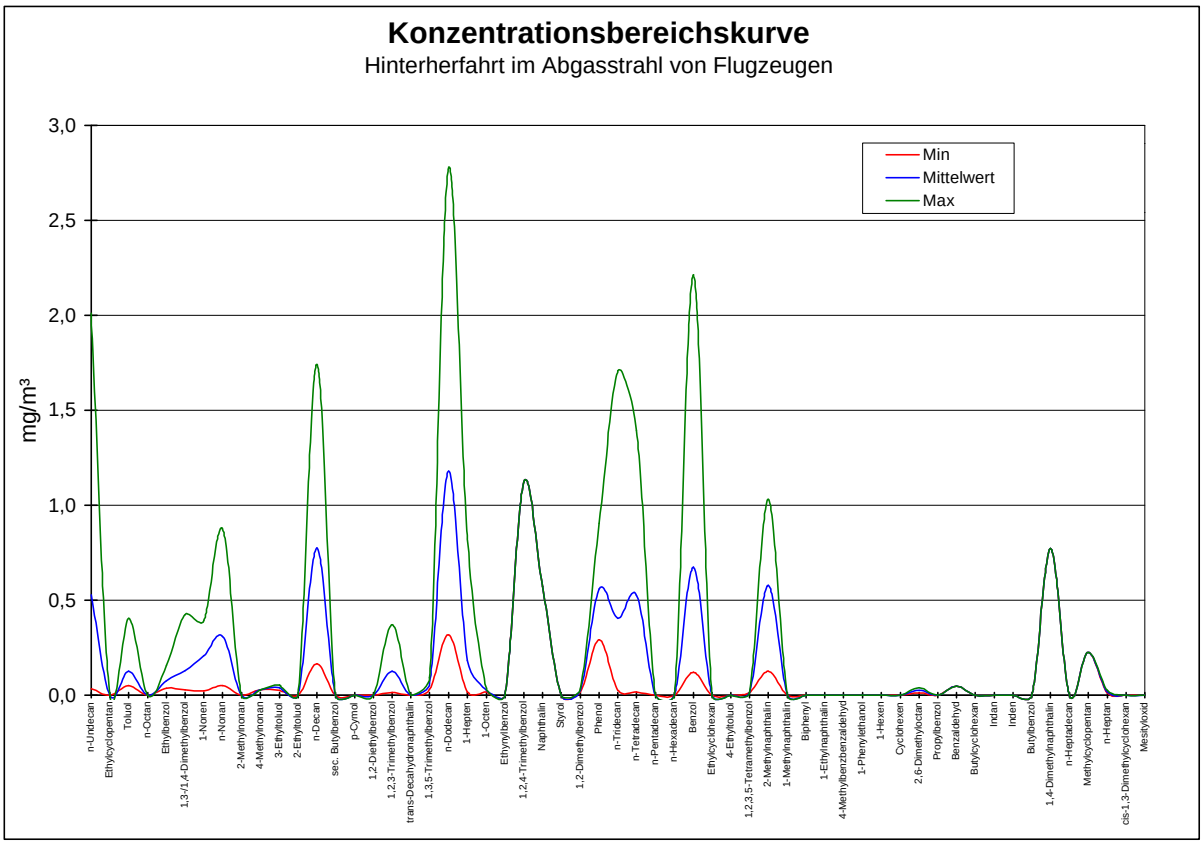


Abbildung 56: Konzentrationsbereiche Hinterherfahrt

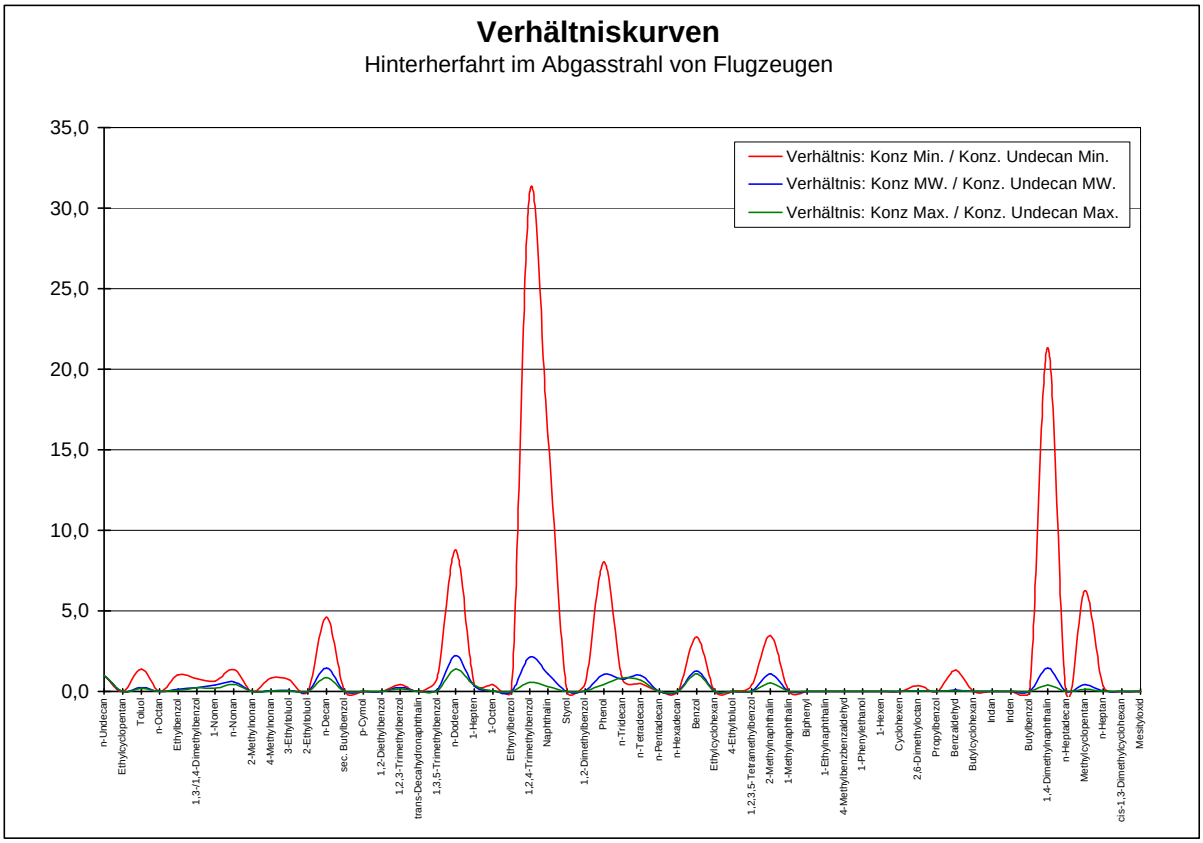


Abbildung 57: Verhältnisbereiche Hinterherfahrt

Bereits in Abschn. 10.3, Kap. 2 wurde darauf hingewiesen, daß es bei unterschiedlichen Lastzuständen der Triebwerke zu veränderten Emissionsniveaus kommt. Um hier die Unterschiede aufzuzeigen wurden jeweils, sofern eine scharfe Trennung zwischen den Lastzuständen während der Prüfläufe in der Triebwerkstandlaufeinrichtung überhaupt möglich war, Konzentrationsbereichskurven und Verhältniskurven für die unterschiedlichen Lastzustände erstellt. Wesentlich erscheint hierbei, darauf hinzuweisen, daß die Kurven einen ähnlichen Verlauf aufzeigen oder z.T. Kurvenabschnitte innerhalb eines Diagrammes einen ähnlichen Verlauf aufweisen.

Bei der tabellarischen Darstellung der Ergebnisse in Abschn. 19.2, Kap. 3 hingegen wird nicht zwischen einzelnen Lastzuständen unterschieden. Die lastabhängigen Einzelergebnisse finden sich hier im Materialenanhang auf CD-ROM.

18.1 Aufklärungsquote bezogen auf VOC

Parallel zu allen diskontinuierlichen Beprobungen zur Ermittlung organisch-chemischer Stoffe wurde unabhängig vom eingesetzten Sorptionsmittel der Gehalt an organischen Stoffen als Gesamt-Kohlenstoff (VOC) mittels Flammenionisationsdetektor (FID) bestimmt. Aus der Massenkonzentrationssumme der qantitativ bestimmten organischen Einzelstoffe und dem dazu parallel bestimmten VOC-Massenkonzentrationswert wurde die Aufklärungsquote berechnet. Hierbei wurde der VOC-Wert auf Oktan berechnet.

Da bei einer Reihe von Emissionsspektren, insbesondere bei gleichzeitig niedrig bestimmten VOC-Werten, die Einzelkonzentrationen an organischen Stoffen unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen, die Verhältniskurven andererseits jedoch lediglich parallel zu denen verschoben waren, bei denen entsprechend höhere Konzentrationswerte an Einzelstoffen bestimmt wurden, wurde bei der Angabe des Aufklärungsgrades der Wert aus dem Emissionsspektrum angegeben, welches den höchsten sicher quantitativ erfaßten Anteil an Einzelkomponenten aufwies.

Bei diesem Emissionsspektrum lag der Aufklärungsgrad bei ca. 90 %.

D.h. die Summe der Massen der in Tabelle 26 angegebenen Stoffe sowie die quantitativ erfaßten Einzelstoffe gemäß Abschn. 14, Kap. 2 betrug, bezogen auf den zeitgleich ermittelten VOC-Wert, ca. 90 % des VOC-Wertes.

In der nachfolgenden Tabelle 29 ist <u>beispielhaft</u> die quantitative Auswertung einer Einzelprobe angeführt und die ermittelten Einzelsubstanzen (z.Ztpkt. dieser Auswertung waren 45 Einzelsubstanzen sicher identifiziert) mit dem zeitgleich kontinuierlich erfaßten VOC-Wert korreliert. In den am Ende der Tabelle angegebenen Wert von 87,1 % **nicht** berücksichtigt wurden die restlichen organischen Verbindungen aus Tabelle 26 sowie die oben erwähnten Einzelstoffe gem. Abschn. 14, Kap. 2 (PAH, PCDD/F, Aldehyde, Ketone). Diese Stoffe finden sich in der nachfolgenden Tabelle nicht wieder, weil sie mit Hilfe selektiver Bestimmungsverfahren ermittelt wurden und entweder mit dem verwendeten Summenverfahren nicht bestimmbar wären oder die Bestimmungsgrenzen nach diesem Verfahren zu hoch liegen.

Rechnet man diese Stoffe ebenfalls in diese Betrachtung ein, so dürfte der Aufklärungsgrad >> 90 % betragen.

Tabelle 29: Quantitative Auswertung einer Einzelprobe (Probenr. 33/7; 02.05.1997)

Meßstelle: Triebwerksprüfstand, Triebwerkstyp: CF6-50E2							
lfd. Nr.	**Komponente**		**Massenkonz.**				
			[mg/m³]*				
1	Benzol		<0,57				
2	Cyclohexen		<0,31		Probe Nr.:	33/7	
3	1-Hepten		<0,01		Sorptionsmittel:	Tenax TA	
4	n-Heptan		<0,32		Desorption:	TDS	
5	Toluol		<0,05		Labor:	HLFU	
6	n-Octan		<0,24				
7	Ethylcyclohexan		<0,09		* Normalzustand, trocken		
8	Ethylbenzol		0,12		273,16 K; 1013,25 hPa		
9	1,3-/1,4-Dimethylbenzol (m-/p-Xylol)		0,24				
10	Ethynylbenzol		<0,30				
11	1-Nonen		<0,22				
12	Styrol		<0,46				
13	1,2-Dimethylbenzol (o-Xylol)		0,39				
14	n-Nonan		0,68				
15	Propylbenzol		0,38				
16	Benzaldehyd						
17	3-Ethyltoluol		0,70				
18	4-Ethyltoluol		0,54				
19	2-Ethyltoluol						
20	3-/4-Ethyltoluol		1,24				
21	1,3,5-Trimethylbenzol (Mesitylen)		0,45				
22	Phenol		0,54				
23	1,2,4-Trimethylbenzol (Pseudocum.)		2,11				
24	n-Decan		2,53				
25	1,2,3-Trimethylbenzol		0,49				
26	Indan		<0,93				
27	Butylbenzol		0,41				
28	trans-Decahydronaphthalin		<0,17				
29	n-Undecan		2,01				
30	Naphthalin		1,02				
31	n-Dodecan		1,62				
32	n-Tridecan		1,33				
33	2-Methylnaphthalin		<0,19				
34	1-Methylnaphthalin		1,02				
35	Biphenyl		<0,32				
36	n-Tetradecan		0,55	Summe aller Komponenten			17,12 mg/m3*
37	1,4-Dimethylnaphthalin		<0,35	(<-Werte wurden nicht berücksichtigt!)			
38	n-Pentadecan		<0,50	Gesamt-C (FID), angegeben als C1 (M=12,011g/mol)			
39	n-Hexadecan		<0,48	(Mittelwert über den Beprobungszeitraum) :			16,54 mg/m3*
40	n-Heptadecan		<0,29	Gesamt-C (FID), angegeben als C8H18 (M=114,230g/mol)			
41	1,2,3,5-Tetramethylbenzol			(Mittelwert über den Beprobungszeitraum) :			19,66 mg/m3*
42	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin			**Anteil aller quantifizierter Komponenten** an dem als C_8H_{18}			
43	1,3-Dimethylnaphthalin			angegebenen Gesamt-C-Wert (FID) [%] :			**87,1 %**
44	1,6-Dimethylnaphthalin						
45	Methylcyclopentan						

18.2 Diskussion

Im vorstehenden Kapitel 2 wurden die Bedingungen (Probenahme und analytische Auswertung) erläutert unter denen die meßtechnischen Ermittlungen im Rahmen des beschriebenen Projektes erfolgten. Es wurde deutlich gemacht, daß die probenahmetechnischen Bedingungen einen Kompromiß darstellten. Andererseits konnte durch die Probenahme durch sog. „Hinterherfahrt“ im Taxibetrieb von Flugzeugen nachgewiesen werden, daß der eingegangene probenahmetechnische Kompromiß in der zu Verfügung gestellten Triebwerkstandlaufeinrichtung zu durchaus vertretbaren Ergebnissen führte.

Die beprobten Triebwerkstypen stellen eindeutig nur eine beschränkte Auswahl der insgesamt geflogenen Triebwerkstypen dar. Es darf zudem unterstellt werden, daß der Wartungszustand der beprobten Triebwerke eher einem optimalen Zustand entsprechen, der sicherlich nicht bei allen geflogenen Triebwerken vorherrscht.

Die Auswahl der analytischen Methoden war nicht angelegt, die Bestimmungsgrenzen der jeweiligen Einzelstoffe unverhältnismäßig herabzusetzen. Bei der Vielzahl der qualitativ als sicher nachgewiesenen organisch-chemischen Stoffe wäre hierzu ein deutlich höherer Aufwand erforderlich gewesen. Andererseits stellen die angewendeten Methoden, sowohl probenahmetechnisch als auch analytisch einen Weg dar, die Emissionen organisch-chemischer Stoffe aus zvilen Flugzeugtriebwerken mit zufriedenstellender Genauigkeit zu bestimmen.

In den Tabellen 25 bis 28 werden die qualitativ ermittelten organisch-chemischen Stoffe zusammengestellt. Sicher identifiziert wurden dabei 68 organisch-chemische Einzelstoffe. Hinzu kommen aus der Gruppe der polyzyklischen Aromaten (PAH) 9 Einzelstoffe aus dem sog. EPA-Spektrum[50] , 6 Einzelstoffe aus der Stoffgruppe der Aldehyde, 3 Einzelstoffe aus der Stoffgruppe der Ketone sowie 17 Einzelstoffe aus der Stoffgruppe der PCDD/F.

Insgesamt konnten somit 103 organische Einzelverbindungen **qualitativ** ermittelt werden. Die quantitativen Ermittlungen erstreckten sich ebenso auf dieses Spektrum der identifizierten organisch-chemischen Verbindungen.

Durch Korrelation des identifizierten Stoffgemisches mit dem parallel ermittelten VOC-Wert ergab sich, auf die Summe der Massenanteile bezogen, ein Aufklärungsgrad von > 90 %.

Ergebnis:

Damit kann die in Abschn. 9, Kap. 1 umrissene Aufgabenstellung, das aus zivilen Flugzeugtriebwerken emittierte **Spektrum organisch-chemischer Verbindungen qualitativ aufzuklären**, *als erfüllt angesehen werden. Im Abgas von zivilen Flugzeugtriebwerken wurden neben anorganischen Gasen u.a. 68 organisch-chemische Stoffe als Hauptkomponenten nachgewiesen, die ca. 90 % der Masse organisch-chemischer Stoffe darstellen.*

Durch Verhältnisbildung der ermittelten Stoffe untereinander und Auftragen der in die Verhältnisbildung einbezogenen Stoffe nach einer bestimmten Reihenfolge gegen den Verhältniswert bezogen auf Undecan, ergeben sich sog. Verhältniskurven. Diese Verhältniskurven weisen bei den meisten Abgasproben -sowohl bei Abgasproben aus Triebwerksprüfstandläufen als auch bei Hinterherfahrten- über weite Kurvenabschnitte signifikante Ähnlichkeiten auf. Einige Kurven sind nahezu deckungsgleich, obwohl die Beprobungen zeitlich weit (mehrere Monate) auseinander liegen.

Ergebnis:

Es darf daher angenommen werden, daß das Spektrum organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von Flugzeugtriebwerken in einem bestimmten Verhältnis zueinander steht. **Die Emissionen organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von Flugzeugtriebwerken sind insofern charakteristisch.**

Wie aus den Emissionsspektren der untersuchten Triebwerkstypen zu erkennen ist, findet sich in allen untersuchten Proben ein geringer Anteil an Phenylethylen (Styrol). Wie bei im Rahmen dieses Meßprogrammes ebenfalls durchgeführten Untersuchungen an ausgewählten Dieselmotoren eines LKW und zwei PKW fesgestellt wurde, war im Abgas dieser Motoren Styrol nicht einheitlich nachzuweisen. Hier könnte ein weiterer Untersuchungsbedarf gesehen werden.

19 QUANTITATIVE UNTERSUCHUNG VON TRIEBWERKSABGASEN

19.1 Kontinuierlich ermittelte Abgaskomponenten

In Abschnitt 13, Kap. 2 wurde die kontinuierliche Ermittlung verschiedener Meßgrößen beschrieben. Diese Messungen wurden in erster Linie durchgeführt um die Plausibilität der Meßergebnisse organisch-chemischer Stoffe zu belegen, d.h. festzustellen, ob die vorgefundenen Betriebszustände und Bedingungen denen entsprechen, die bei entsprechenden Prüfläufen eingehalten werden müssen. Zum Vergleich wurden die in der ICAO-Datenbank[1] angegebenen Datensätze für die Betriebszustände Take Off, Climb Out, Approach und Idle denen während der Prüfung der Triebwerke im Prüfstand angefahrenen Betriebszuständen Take Off, Max. Continuous, Approach (Flight)Idle und Idle, die ihrerseits nicht zwangsläufig mit den Leistungsdaten der ICAO-Datenbank vergleichbar sein müssen, gegenübergestellt. Hierbei wird ausdrücklich auf die Ausführungen in Abschnitt 10.3 hingewiesen.

Um die näherungsweise Vergleichbarkeit der ermittelten Daten mit den Angaben der ICAO-Datenbank zu ermöglichen, wurden die Datensätze aus den kontinuierlichen Messungen auf die sog. ISA-Standardtag-Bedingungen[51] umgerechnet. Hierbei werden folgende Bezugsgrößen zugrunde gelegt:

Luftdruck: 1013,25 hPa
Temperatur: 15 °C
Feuchtigkeit: 6,25 g/m³

In den nachfolgenden Grafiken werden die im Rahmen des Meßprogrammes erhaltenen Meßdaten den ICAO-Daten gegenübergestellt. Hierbei werden jeweils Kollektive unterschiedlichen Umfanges des gleichen Triebwerktyps zusammengefaßt.

In den nachfolgenden Grafiken wird die Emission auf die durchgesetzte Kerosinmenge bezogen [g Schadstoff/kg verbranntes Kerosin]. In der Tabelle 30 werden die bei den Prüfläufen durchgesetzten Treibstoffmengen angegeben.

Tabelle 30: Durchsätze an Kerosin

Durchsätze an Kerosin in verschiedenen Zuständen der Triebwerke des									
Types CF-6-50E2[C2] und den Typen CFM56-3B1,[B2],[3C1]									
hier: Werte v. Triebwerksprüfstand (LH-Ffm) und Werte aus ICAO-Datenbank gegenüber gestellt.									
	Leistung [%] bez. auf Take Off	**LH-Ffm**	**ICAO-Wert**	**LH-Ffm**	**ICAO-Wert**	**LH-Ffm**	**ICAO-Wert**	**LH-Ffm**	**ICAO-Wert**
Typ:		**CF6-50**	**-E2[C2]**	**CFM56-**	**3B1**	**CFM56-**	**3B2**	**CFM56-**	**3C1**
Verbrauch:		**kg/h**	**kg/h**	**kg/h**	**kg/h**	**kg/h**	**kg/h**	**kg/h**	**kg/h**
Idle	**7**		774,00		410,40		428,40		446,40
Ground Idle **)	**3...4**	698,4*)		363,6*)		381,6*)		367,2*)	
Approach	**30**		2376,00		1044,00		1130,40		1209,60
Flight Idle)**	**6,5....10**	1090,8*)		435,6*)		471,6*)		450,0*)	
ClimbOut.	**85**		7110,00		2851,20		3160,80		3434,40
Max.Cont.)**	**90...95,5**	7812.00*)		3409,20*)		3697,20*)		3924.00*)	
Take Off	**100**	9169.20	8953,20	3664,00	3405,60	4035.60	3801,60	4327.20	4155,40

*) = nicht direkt mit ICAO-Datenbank vergleichbar ! **) = Herstellerbezeichnung

Prüfläufe des Triebwerktyps CF6-50-C2 [E2], (69 Triebwerke)
(bezogen auf ISA-Standardtag-Bedingungen)

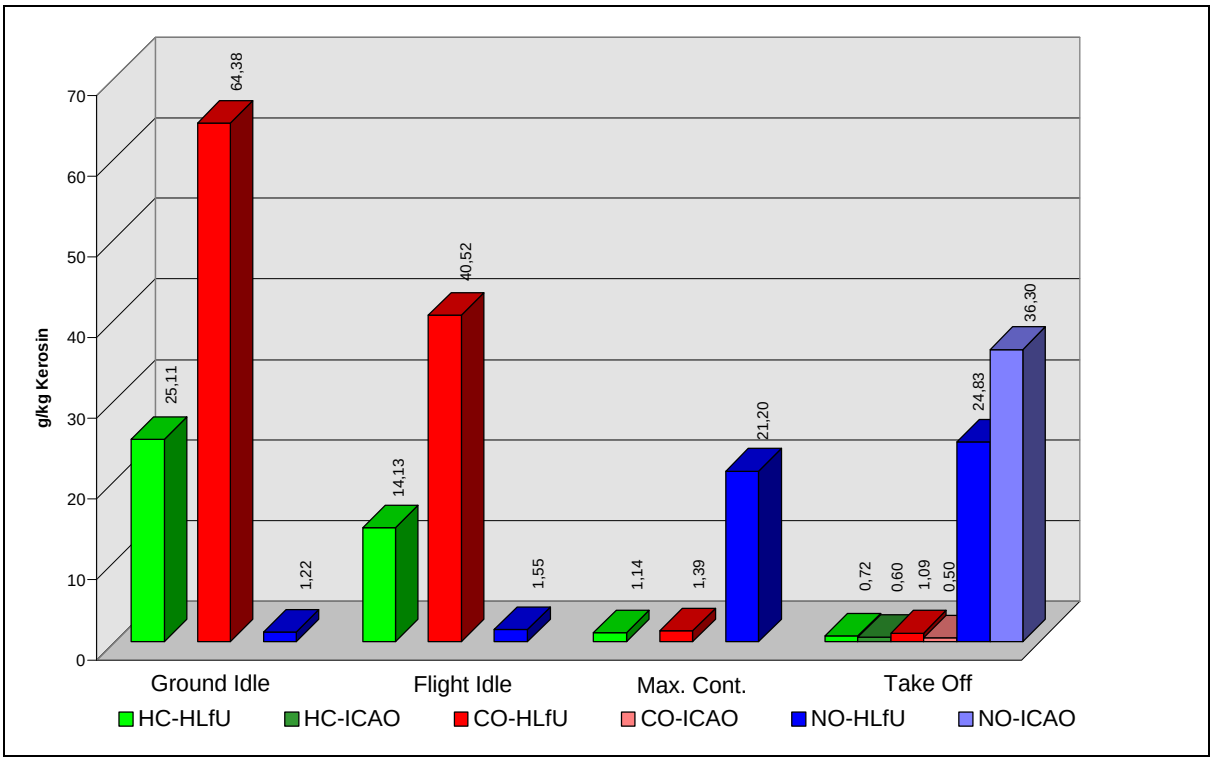


Abbildung 58: Kontinuierlich ermittelte Abgasbestandteile beim Triebwerkstyp CF6-50, Vergleich mit ICAO-Daten

Im Rahmen der kontinuierlich registrierenden quantitativen Ermittlung der Komponenten HC, CO und NO im Abgas ziviler Flugzeugtriebwerke vom Typ CF6-50E2/C2 wurden die Ergebnisse zu einem Kollektiv zusammengefaßt und bewertet (Die Daten der einzelnen Triebwerke befinden sich im Materialenanhang auf der beiliegenden CD-ROM). Hierbei wurde nach verschiedenen Lastzuständen und in die Jahre 1996 und 1997 getrennt, sowie eine Summenübersicht betrachtet.

Hiernach ergibt sich vom Trend her folgendes Bild:

Direkt miteinander vergleichbar sind die im Zustand „Take Off“ ermittelten Daten. Hierbei liegen die gemessenen Daten für die Komponenten HC und CO geringfügig über den Werten der ICAO-Datenbank. Die für Stickoxid gemessenen Daten liegen signifikant unter den Werten der ICAO-Datenbank. Für die Zustände „Ground Idle“, „Flight Idle“ und „Max.Cont.“ existieren keine vergleichbaren Werte in der ICAO-Datenbank. Vergleicht man die gemessenen Daten mit der Grafik in Abb. 62, so sind die Meßwerte als plausibel anzusehen.

Prüfläufe des Triebwerktyps CFM 56-3C1, (17 Triebwerke)
(bezogen auf ISA-Standardtag-Bedingungen)

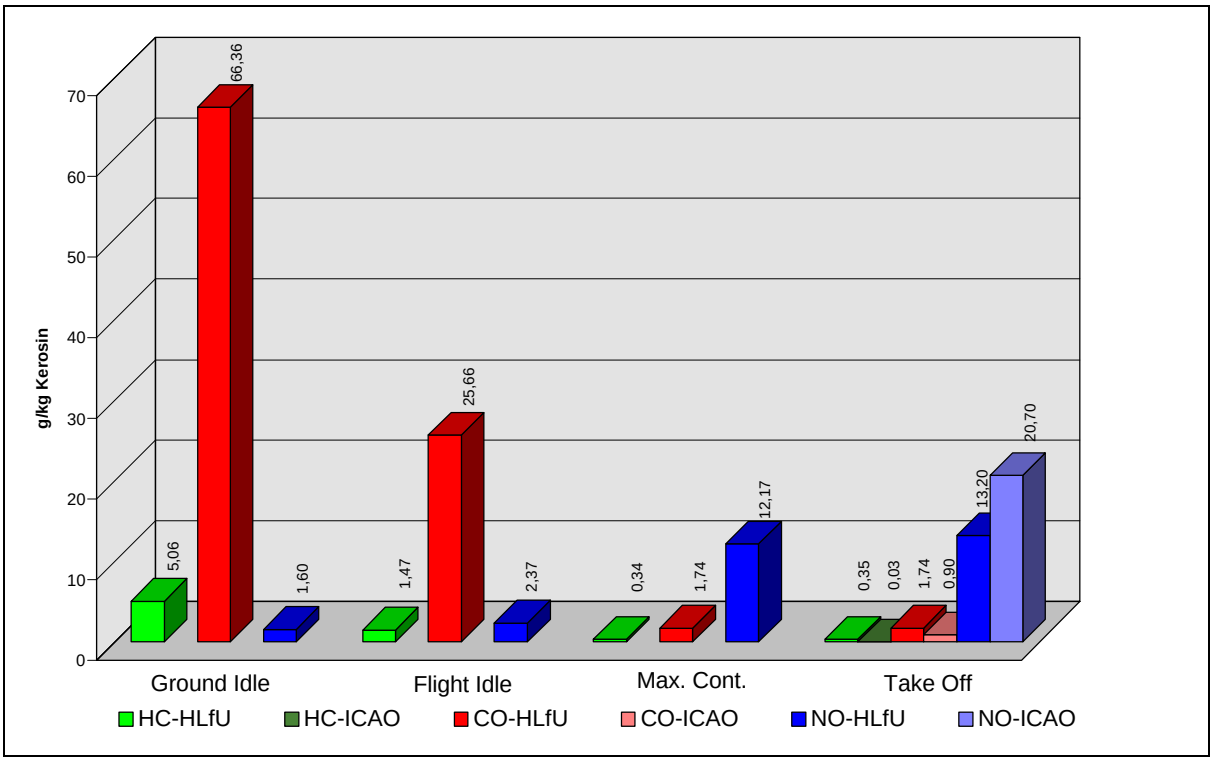


Abbildung 59: Kontinuierlich ermittelte Abgasbestandteile beim Triebwerkstyp CFM 56-3C1, Vergleich mit ICAO-Daten

Prüfläufe des Triebwerktyps CFM 56-3B1, (15 Triebwerke)
(bezogen auf ISA-Standardtag-Bedingungen)

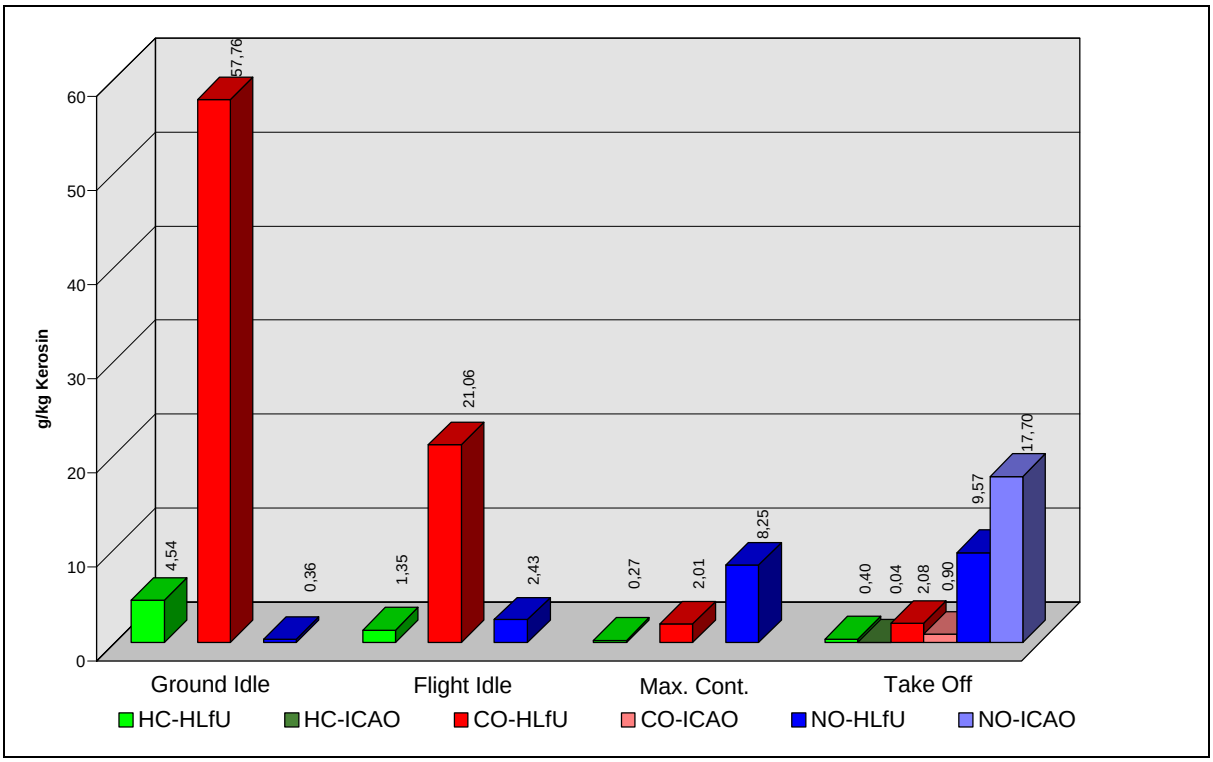


Abbildung 60: Kontinuierlich ermittelte Abgasbestandteile beim Triebwerkstyp CFM56-3B1, Vergleich mit ICAO-Daten

Prüfläufe des Triebwerktyps CFM 56-3B2, (8 Triebwerke)
(bezogen auf ISA-Standardtag-Bedingungen)

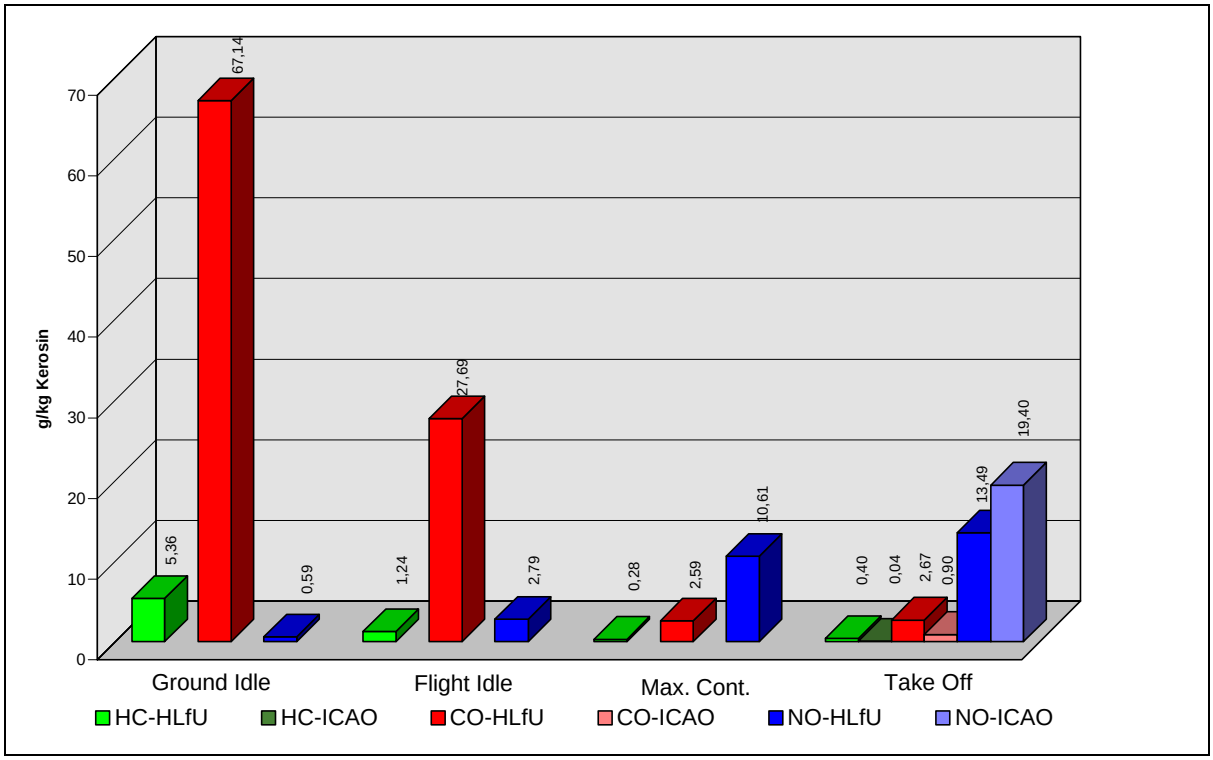
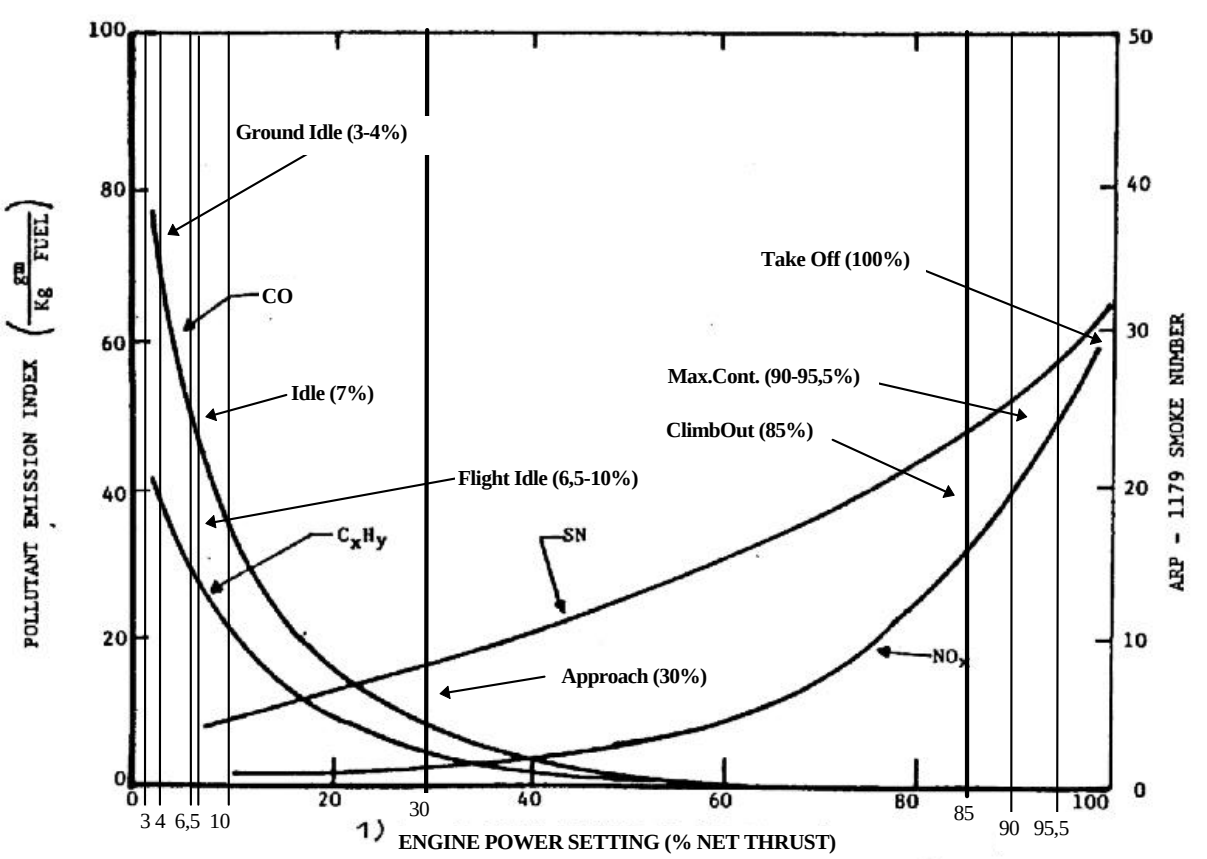


Abbildung 61: Kontinuierlich ermittelte Abgasbestandteile beim Triebwerkstyp CFM 56-3B2, Vergleich mit ICAO-Daten

Für den Triebwerkstyp CFM56-3 ergeben sich ähnliche Verhältnisse wie bei dem zuvor dargestellten Triebwerkstyp CF6-50. Die Beurteilung eines umfangreicheren Datenkollektivs ist für diesen Triebwerkstyp nicht möglich.

Wie bereits in anderen Abschnitten dieser Arbeit erwähnt ist ein Vergleich der gemessenen Daten der Triebwerke mit den ICAO-Daten nicht uneingeschränkt möglich.. Die in der ICAO-Datenbank angegebenen Power-Settings sind nicht zwangsläufig mit den in den Manuals der Triebwerkshersteller für die jeweiligen Triebwerke angegebenen Einstelldaten am Prüfstand identisch. Bei einer Bewertung der Meßergebnisse, wie sie in den Abbildungen 58 bis 61 dargestellt sind, ist dies zu berücksichtigen.

In Abbildung 62 wird der Zusammenhang zwischen der Emission verschiedener Luftschadstoffe in Abhängigkeit vom Lastzustand dargestellt:[52]



Typischer Schadstoffverlauf bei Flugzeugtriebwerken ohne Nachbrennerbetrieb
nach USAF aus: MIL-E87231 /9/

Abbildung 62: Lastabhängige Emissionen verschiedener luftverunreinigende Stoffe im Abgas von Flugzeugtriebwerken

19.2 Diskontinuierlich ermittelte organisch-chemische Stoffe

19.2.1 Triebwerke CF6-50 E2/C2 und CFM56-3

In den nachfolgend angegebenen Tabellen 31 bis 33 werden die als sicher identifizierten organisch-chemischen Stoffe (siehe Tabelle 26, Abschn. 18 Kap. 2) als Massenkonzentrationen (mg/m³) im Abgas der meßtechnisch erfaßten Triebwerke vom Typ CF6-50; CFM56-3B1 und CFM56-3C1 quantitativ angegeben. Aus allen bestimmten Proben werden für jede Komponente der minimal bestimmte Konzentrationswert, der maximal bestimmte Konzentrationswert sowie der als arithmetischer Mittelwert bestimmte Konzentrationswert angegeben. Sofern es statistisch vertretbar erscheint, wurde auch die Standardabweichung für das jeweilige Wertekollektiv berechnet.

Auf die Massenkonzentration an Benzol von bis zu ca. 1,6 mg/m³ im Abgas des Triebwerktypes CF6-50E/C wird aufmerksam gemacht.

Für BTX (Benzol/Toluol/*o/m/p*-Xylol) ergibt sich, ermittelt aus allen Werten für den Triebwerkstyp **CF6-50 E2/C2** ein Verhältnis von ca.

1 : 0,4 : 1,2.

Für den Triebwerkstyp **CFM56-3B1** ergibt sich, ermittelt aus allen Werten ein Verhältnis für BTX (Benzol/Toluol/*o/m/p*-Xylol) von ca.

1 : 1,2 : 0,6

Beim Vergleich dieser Verhältnisse mit entsprechenden Daten, die aus dem **Straßenverkehr** ermittelt wurden, ergibt sich dort ein Verhältnis für BTX von

1 : 2,8 : 1,5

Hinsichtlich der Verhältnisse der Einzelkomponenten untereinander wird auf die in Abschn. 18, Kap 2 angegebenen, auf **Undecan** bezogenen Verhältniskurven verwiesen.

Wie aus den Tabellen ersichtlich, sind für eine Reihe von organisch-chemischen Einzelstoffen relativ weite Spannweiten der Meßwerte erkennbar. Dies ist jedoch im wesentlichen dadurch zu erklären, daß in den Tabellen alle ermittelten Einzelwerte, unabhängig vom Lastzustand der geprüften Triebwerke, zusammengefaßt wurden, d.h. die Betriebsbedingungen zu denen die Meßwerte ermittelt wurden unterliegen Schwankungen, die ihrerseits neben den möglicherweise vorliegenden Triebwerk- bzw. Brennkammer bedingten Unterschieden verantwortlich für die unterschiedlichen Emissionsniveaus sein können. Eine Darstellung aller lastabhängigen Emissionswerte befindet sich im Materialienanhang auf CD-ROM.

Tabelle 31: Massenkonzentration gasförmiger Abgasinhaltsstoffe CF6-50C2/E2

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL — MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE — Blatt Nr.: 1

Triebwerkstyp: CF6-50C2/E2

Meßstelle: Triebwerksprüfstand — Sorptionsmittel: Carbosieve S-III/ Tenax Ta

Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen

lfd. Nr.	Komponente	Anzahl	kleinster Wert	Mittelwert	größter Wert	Stabw.(n-1)
1	Benzol	39	0,06	0,69	1,61	0,43
2	Cyclohexen	31	0,01	0,03	0,07	0,02
3	1-Hepten	45	0,03	0,20	0,44	0,12
4	n-Heptan	35	0,00	0,05	0,11	0,03
5	Toluol	73	0,04	0,26	0,99	0,18
6	n-Octan	10	0,02	0,12	0,29	0,09
7	Ethylcyclohexan	31	0,01	0,05	0,21	0,04
8	Ethylbenzol	69	0,02	0,18	1,80	0,26
9	1,3-/1,4-Dimethylbenzol (m-/p-Xylol)	76	0,07	0,45	2,37	0,46
10	Ethynylbenzol	8	0,01	0,01	0,04	0,01
11	1-Nonen	42	0,02	0,18	0,74	0,15
12	Styrol	35	0,02	0,09	1,16	0,19
13	1,2-Dimethylbenzol (o-Xylol)	54	0,03	0,35	3,23	0,55
14	n-Nonan	47	0,06	0,76	2,72	0,59
15	Propylbenzol	56	0,02	0,22	1,12	0,24
16	Benzaldehyd	33	0,03	1,10	4,85	1,49
17	3-Ethyltoluol	17	0,03	0,68	2,49	0,80
18	4-Ethyltoluol	20	0,06	0,36	1,18	0,30
19	2-Ethyltoluol	33	0,02	0,16	0,78	0,18
20	3-/4-Ethyltoluol	42	0,05	0,69	3,63	0,83
21	1,3,5-Trimethylbenzol (Mesitylen)	51	0,03	0,18	1,09	0,19
22	Phenol	15	0,16	0,66	2,38	0,67
23	1,2,4-Trimethylbenzol (Pseudocumol)	51	0,07	1,14	4,82	1,22
24	n-Decan	56	0,12	1,48	5,79	1,39
25	1,2,3-Trimethylbenzol	61	0,03	0,27	2,12	0,34
26	Indan	26	0,01	0,04	0,09	0,02
27	Butylbenzol	32	0,02	0,23	0,82	0,21
28	trans-Decahydronaphthalin	19	0,01	0,20	1,19	0,36
29	n-Undecan	72	0,09	1,01	4,90	1,04
30	Naphthalin	24	0,05	0,42	1,02	0,33
31	n-Dodecan	56	0,08	0,85	3,45	0,81
32	n-Tridecan	75	0,03	0,57	2,17	0,50
33	2-Methylnaphthalin	27	0,05	0,38	1,31	0,32
34	1-Methylnaphthalin	48	0,01	0,24	1,29	0,32
35	Biphenyl	5	0,02	0,03	0,03	0,01
36	n-Tetradecan	60	0,04	0,27	0,92	0,21
37	1,4-Dimethylnaphthalin	12	0,03	0,04	0,07	0,01
38	n-Pentadecan	22	0,02	0,09	0,51	0,13
39	n-Hexadecan	15	0,01	0,01	0,02	0,01
40	n-Heptadecan	3	0,00	0,01	0,01	0,00
41	1,2,3,5-Tetramethylbenzol	32	0,01	0,07	0,27	0,06
42	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin	7	0,04	0,09	0,11	0,02
43	1,3-Dimethylnaphthalin	7	0,01	0,01	0,02	0,00
44	1,6-Dimethylnaphthalin	7	0,01	0,01	0,02	0,00

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL — MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE — Blatt Nr.: 1

Triebwerkstyp: CF6-50C2/E2

Meßstelle: Triebwerksprüfstand — Sorptionsmittel: Carbosieve S-III/ Tenax Ta

Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen

lfd. Nr.	Komponente	Anzahl	kleinster Wert	Mittelwert	größter Wert	Stabw.(n-1)
45	Methylcyclopentan	32	0,00	0,09	0,44	0,10
46	1-Octen	33	0,03	0,10	0,20	0,05
47	4-Methylnonan	36	0,01	0,10	0,34	0,08
48	sec. Butylbenzol	28	0,01	0,05	0,16	0,03
49	Butylcyclohexan	29	0,01	0,08	0,34	0,07
50	Inden	23	0,02	0,07	0,17	0,04
51	2-Methylbenzaldehyd	5	0,02	0,04	0,05	0,01
52	1-Ethylnaphthalin	7	0,01	0,02	0,03	0,01
53	3-Ethyltoluol + Benzaldehyd	8	0,24	0,41	0,66	0,16
54	n-Decan + 1,2,4-Trimethylbenzol (Pseudocumol)	19	0,25	0,87	2,22	0,54
55	3-/4-Ethyltoluol + Benzaldehyd	1	0,24	0,24	0,24	
56	1-Hexen					
57	Methylcyclohexan	8	0,02	0,05	0,11	0,03
58	Ethylcyclopentan	1	0,02	0,02	0,02	
59	cis-1,3-Dimethylcyclohexan	10	0,01	0,03	0,08	0,02
60	Mesityloxid					
61	2,6-Dimethyloctan	28	0,01	0,11	0,44	0,09
62	2-Methylnonan	28	0,03	0,14	0,46	0,10
63	p-Cymol	17	0,02	0,07	0,15	0,04
64	1,2-Diethylbenzol	8	0,02	0,06	0,14	0,04
65	1-Phenylethanol	13	0,11	0,23	0,57	0,14
66	4-Methylbenzaldehyd					
67	n-Octan + Mesityloxid (a-, ß-Isom.)	27	0,08	0,24	0,47	0,12
68	p-Cymol +1,2,3-Trimethylbenzol	12	0,03	0,12	0,35	0,09
69	trans-Decahydronaphthalin + 1,2-Diethylbenzol	14	0,01	0,06	0,14	0,03
70	2-Methylnonan + Benzaldehyd	1	0,34	0,34	0,34	
71	Nonan + 1,2-Dimethylbenzol (o-Xylol)	9	0,20	0,56	1,03	0,33
72	Butylbenzol + 1-Phenylethanol	11	0,06	0,20	0,38	0,10
73	n-Dodecan + Naphthalin	6	0,22	0,41	0,77	0,22

*) die angegebenen Nachkommastellen ergeben sich aus der PC-gestützten Berechnung und sind kein absolutes Maß für die Genauigkeit der Zahlenangabe.

Tabelle 32: Massenkonzentration gasförmiger Abgasinhaltsstoffe CFM56-3B1

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL	MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE	Blatt Nr.:	1
	Triebwerkstyp:	CFM56-3B1	
Meßstelle: Triebwerksprüfstand	Sorptionsmittel:	Carbosieve S-III/ Tenax Ta	

Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen

lfd. Nr.	Komponente	Anzahl	kleinster Wert	Mittelwert	größter Wert	Stabw.(n-1)
1	Benzol	13	0,02	0,06	0,14	0,04
2	Cyclohexen					
3	1-Hepten	13	0,00	0,01	0,02	0,01
4	n-Heptan					
5	Toluol	17	0,01	0,07	0,43	0,10
6	n-Octan	4	0,00	0,00	0,01	0,00
7	Ethylcyclohexan					
8	Ethylbenzol	9	0,00	0,01	0,01	0,00
9	1,3-/1,4-Dimethylbenzol (m-/p-Xylol)	14	0,01	0,02	0,05	0,01
10	Ethynylbenzol					
11	1-Nonen	6	0,00	0,00	0,01	0,00
12	Styrol	8	0,01	0,01	0,01	0,00
13	1,2-Dimethylbenzol (o-Xylol)	9	0,00	0,01	0,01	0,00
14	n-Nonan	14	0,01	0,02	0,05	0,01
15	Propylbenzol	4	0,00	0,00	0,01	0,00
16	Benzaldehyd	6	0,00	0,07	0,37	0,15
17	3-Ethyltoluol					
18	4-Ethyltoluol					
19	2-Ethyltoluol	2	0,01	0,02	0,02	0,00
20	3-/4-Ethyltoluol	9	0,01	0,01	0,02	0,00
21	1,3,5-Trimethylbenzol (Mesitylen)	7	0,00	0,01	0,01	0,00
22	Phenol	5	0,01	0,04	0,13	0,05
23	1,2,4-Trimethylbenzol (Pseudocumol)	9	0,01	0,01	0,02	0,00
24	n-Decan	7	0,01	0,03	0,08	0,02
25	1,2,3-Trimethylbenzol	7	0,00	0,01	0,01	0,00
26	Indan	2	0,00	0,00	0,01	0,00
27	Butylbenzol	2	0,00	0,01	0,01	0,00
28	trans-Decahydronaphthalin	2	0,00	0,00	0,01	0,00
29	n-Undecan	11	0,01	0,03	0,08	0,02
30	Naphthalin	8	0,01	0,01	0,02	0,00
31	n-Dodecan	9	0,01	0,02	0,04	0,01
32	n-Tridecan	10	0,01	0,02	0,06	0,02
33	2-Methylnaphthalin	7	0,00	0,01	0,03	0,01
34	1-Methylnaphthalin	7	0,00	0,01	0,02	0,01
35	Biphenyl	1				
36	n-Tetradecan	8	0,00	0,02	0,05	0,02
37	1,4-Dimethylnaphthalin					
38	n-Pentadecan	10	0,00	0,02	0,03	0,01
39	n-Hexadecan	6	0,00	0,01	0,01	0,00
40	n-Heptadecan	1				

*) die angegebenen Nachkommastellen ergeben sich aus der PC-gestützten Berechnung und sind kein absolutes Maß für die Genauigkeit der Zahlenangabe.

Tabelle 33: Massenkonzentration gasförmiger Abgasinhaltsstoffe CFM56-3C1

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL		MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE		Blatt Nr.:	1	
		Triebwerkstyp:		CFM56-3C1		
Meßstelle:	Triebwerksprüfstand	Sorptionsmittel:		Carbosieve S-III/ Tenax Ta		
Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen						
lfd. Nr.	**Komponente**	**Anzahl**	**kleinster Wert**	**Mittelwert**	**größter Wert**	**Stabw.(n-1)**
1	Benzol	2	0,07	0,07	0,08	
2	Cyclohexen					
3	1-Hepten					
4	n-Heptan					
5	Toluol	2	0,02	0,02	0,02	
6	n-Octan					
7	Ethylcyclohexan					
8	Ethylbenzol	1	0,05	0,05	0,05	
9	1,3-/1,4-Dimethylbenzol (m-/p-Xylol)	4	0,02	0,09	0,30	0,14
10	Ethynylbenzol					
11	1-Nonen					
12	Styrol					
13	1,2-Dimethylbenzol (o-Xylol)	1	0,24	0,24	0,24	
14	n-Nonan	2	0,02	0,02	0,02	
15	Propylbenzol					
16	Benzaldehyd	1	1,09	1,09	1,09	
17	3-Ethyltoluol					
18	4-Ethyltoluol					
19	2-Ethyltoluol					
20	3-/4-Ethyltoluol					
21	1,3,5-Trimethylbenzol (Mesitylen)					
22	Phenol					
23	1,2,4-Trimethylbenzol (Pseudocumol)	2	0,02	0,02	0,02	
24	n-Decan	2	0,02	0,03	0,03	0,01
25	1,2,3-Trimethylbenzol					
26	Indan					
27	Butylbenzol					
28	trans-Decahydronaphthalin					
29	n-Undecan	1	0,01	0,01	0,01	
30	Naphthalin					
31	n-Dodecan					
32	n-Tridecan					
33	2-Methylnaphthalin					
34	1-Methylnaphthalin					
35	Biphenyl					
36	n-Tetradecan					
37	1,4-Dimethylnaphthalin					
38	n-Pentadecan					
39	n-Hexadecan					
40	n-Heptadecan					
41	1,2,3,5-Tetramethylbenzol					
42	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin					
43	1,3-Dimethylnaphthalin					
44	1,6-Dimethylnaphthalin					
45	Methylcyclopentan	2	0,04	0,04	0,05	0,01
46	1-Octen					

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL	MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE	Blatt Nr.: 1
	Triebwerkstyp:	CFM56-3C1
Meßstelle: Triebwerksprüfstand	Sorptionsmittel:	Carbosieve S-III/ Tenax Ta

Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen

lfd. Nr.	Komponente	Anzahl	kleinster Wert	Mittelwert	größter Wert	Stabw.(n-1)
47	4-Methylnonan					
48	sec. Butylbenzol					
49	Butylcyclohexan					
50	Inden					
51	2-Methylbenzaldehyd					
52	1-Ethylnaphthalin					
53	3-Ethyltoluol	2	0,01	0,01	0,01	

*) die angegebenen Nachkommastellen ergeben sich aus der PC-gestützten Berechnung und sind kein absolutes Maß für die Genauigkeit der Zahlenangabe.

19.2.2 Massenstrombetrachtung

Aus den in den Tabellen 31 bis 33 angegebenen Massenkonzentrationswerten und den während der Prüfläufe lastabhängig ermittelten Abgasvolumenströme lassen sich Emissionsmassenströme für die betreffenden Triebwerkstypen und die jeweiligen organisch-chemischen Einzelstoffe berechnen.

Der Berechnungsweg wird nachfolgend angegeben:

$$C_{TO} \cdot \dot{V}_{TO} + C_{MC} \cdot \dot{V}_{MC} + C_{FI} \cdot \dot{V}_{FI} + C_{GI} \cdot \dot{V}_{GI} = M \qquad (1)$$

$$\overline{C} = \frac{\sum_{i}^{n} (c_i \cdot \dot{V}_i)}{\sum_{i}^{n} \dot{V}_i} \qquad (2)$$

$$\overline{C} \cdot \sum_{i}^{n} \dot{V}_i = \dot{M} = \sum_{i}^{n} (c_i \cdot \dot{V}_i) \qquad (3)$$

C = Massenkonzentration in mg/m³
V_i = Volumenstrom während eines bestimmten Lastzustandes
TO = Lastzustand Take off
MC = Lastzustand Maximum Continous
FI = Lastzustand Flight Idle
GI = Lastzustand Ground Idle
M = Massenstrom in mg/h

Beispiel einer Abschätzung:

Für den Stoff *Benzol* wird nachfolgend eine exemplarische Massenstromberechnung durchgeführt. Hiernach ergibt sich für ein Flugzeug vom Typ Boeing 747-230B mit vierTriebwerken vom Typ CF6-50E2 stoffbezogen folgendes Emissionsverhalten im Flughafennahbereich nach LTO-Zyklus

A1. Approach 30% Last, 1.068.000 m³/h *), 4 Min,	=	71.200 m³
B1. Ground Idle, 7% Last , 645.000 m³/h*), 26 Min,	=	279.500 m³
C1. Take off, 100% Last , 4.906.000 m³/h*), 0,4 Min,	=	32.710 m³
D1. Climb out (Max. Cont.), 85% Last , 4.442.000 m³/h*), 2,2 Min,	=	162.880 m³

*) die gemessenen Abgasmengen ergeben sich beim Betrieb der Triebwerke in der in Abschn. 10.1, Kap. 2 beschriebenen Triebwerkstandlaufeinrichtung. Die Abgasmengen resultieren aus der in Tabelle 1 in der Rubrik „Air Flow“ genannten Abgasstrom und einem „Hallennebenstrom“ im Verhältnis 1:2,6.

Aus den Konzentrationskurven in Abschn. 18, Kap. 2 lassen sich z.B. für *Benzol* folgende lastabhängigen mittleren Massenkonzentrationen ablesen:

A2. Flight Idle (aus Kurve gesamter Prüflauf, Mittelwert):	ca. 0,45 mg/m³
B2. Ground Idle (aus Kurve Ground Idle, Max):	ca. 1,5 mg/m³
C2. Take off (aus Kurve gesamter Prüflauf, Min.):	ca. 0,01 mg/m³
D2. Max. Cont.,(aus Kurve gesamter Prüflauf):	ca. 0,2 mg/m³

$$A1 \cdot A2 + B1 \cdot B2 + C1 \cdot C2 + D1 \cdot D2 = M \qquad (4)$$

Der sich aus Gl. 4 errechnende Massenstromwert von 484 g ist in dem v.g. Beispiel zu vervierfachen, da es sich bei dem gen. Flugzeugtyp um eine viermotorige Maschine handelt. Es ergibt sich demnach ein Massenstromwert von ca. 1,81 kg**).

**)Anmerkung: Der angegebene Wert stellt einen Rechenwert auf der Basis der verwendeten Ausgangsdaten dar. Wie aus den Schwankungsbereichen der Meßwerte für die jeweiligen Stoffe aus den Tabellen 31 bis 33 hervorgeht, kann der errechnete mittlere Wert im individuellen Fall deutlich über- oder unterschritten werden. Aus den einschlägigen Daten im Materialienanhang (CD-ROM) lassen sich entsprechende Berechnungen durchführen.

19.3 Diskret ermittelte Abgaskomponenten

Wie in Abschn. 14, Kap. 2 erwähnt, wurden verschiedene Stoffgruppen mit Hilfe von im Techn. Regelwerk festgelegten Bestimmungsverfahren beprobt und analysiert. Die Ergebnisse dieser Bestimmungen finden sich in den nachfolgenden Tabellen 34 bis 41. Hierbei sei darauf hingewiesen, daß die betreffenden Stoffgruppen nicht an allen beprobten Triebwerken des jeweiligen Typs bestimmt wurden. Die in Rede stehenden Stoffgruppen wurden lediglich exemplarisch quantitativ bestimmt. Die Entscheidung hierzu wurde insbesondere bei den Stoffgruppen der polychlorierten Dibenzo-p-dioxine und -furane sowie den polyzyklichen aromatischen Kohlenwasserstoffe anhand der ermittelten Ergebnisse getroffen.

Tabelle 34 Bestimmung der Massenkonzentration von PAH, CF6-50E2

HESSISCHE LANDESANSTALT
FÜR UMWELT, KASSEL

MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE

Blatt Nr.: 1
zu Prob.-Gruppe 12

Probenahmezeitraum:

Datum: 23.05.96

Uhrzeit: 09:29 - 09:31
09:45 - 10:32

Meßstelle: Triebwerksprüfstand

Lauf / Vorgang: Prüflauf
Triebwerkstyp CF6-50-E2
Probe Nr.: 12/1 und 12/2+3+4
Sorptionsmittel: XAD-2
Desorption: LM-Desorption
Labor: GFA

Massenkonzentration im Abgas *(273,16 K; 1013,25 hPa; trocken)

lfd. Nr.	Komponente PAH	12/1 [µg/m³]*	12/2+3+4 [µg/m³]*	
1	Naphthalin	37,50	24,60	
2	Acenaphthylen	1,58	1,98	
3	Acenaphthen	0,46	0,49	
4	Fluoren	0,87	0,96	
5	Phenanthren	0,78	0,70	
6	Anthracen	0,13	0,11	
7	Fluoranthen	0,23	0,20	
8	Pyren	0,30	0,28	
9	Benz(a)anthracen	0,03	0,02	
10	Chrysen	0,03	0,03	
11	Benzo(b/j)fluoranthen	0,02	0,02	
12	Benzo(k/j)fluoranthen	0,02	0,02	
13	Benzo(a)pyren	0,03	0,03	
14	Dibenz(a,h)anthracen	0,00	0,00	
15	Benzo(ghi)perylen	0,03	0,02	
16	Indeno(1,2,3-cd)pyren	0,03	0,03	
17	Summe nach EPA exkl. NWG	42,00	29,50	
18	Summe nach EPA incl. NWG	42,00	29,50	

Tabelle 35 Bestimmung der Massenkonzentration an PCDD/F, CF6-50E2

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL

MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE

Blatt Nr.: 2
zu Probengruppe 12

Probenahmezeitraum: Datum: 23.05.96
Uhrzeit: 09:29 - 09:31
09:45 - 10:32

Meßstelle: Triebwerksprüfstand
Lauf / Vorgang: Prüflauf
Triebwerkstyp: CF6-50-E2
Probe Nr.: 12/1 und 12/2+3+4
Sorptionsmittel: XAD-2
Desorption: LM-Desorption
Labor: GFA

*Massenkonzentration im Abgas (273,16 K; 1013,25 hPa; trocken)

lfd. Nr.	Komponente PCDF	12/1 [ng/m³]*	12/2+3+4 [ng/m³]*	
1	Summe TetraCDF	<0,0019	<0,0039	
2	Summe PentaCDF	<0,0019	<0,0039	
3	Summe HexaCDF	0,08	<0,0039	
4	Summe HeptaCDF	0,40	<0,0039	
5	OctaCDF	0,89	<0,017	
6	Summe Tetra- bis OctaCDF	1,38	<	
7	2378-TetraCDF	<0,0019	<0,0039	
8	12378-/12348-PentaCDF	<0,0057	<0,0017	
9	23478-PentaCDF	<0,0019	0,00	
10	123478-/123479-HexaCDF	0,01	<0,0017	
11	123678-HexaCDF	0,01	<0,0017	
12	123789-HexaCDF	<0,0025	<0,0017	
13	234678-HexaCDF	0,01	<0,0037	
14	1234678-HeptaCDF	0,19	<0,0025	
15	1234789-HeptaCDF	0,10	<0,0023	
	PCDD			
16	Summe TetraCDD	<0,0006	<0,0031	
17	Summe PentaCDD	<0,0006	<0,0031	
18	Summe HexaCDD	<0,0006	<0,0031	
19	Summe HeptaCDD	<0,0006	<0,0031	
20	OctaCDD	<0,0126	<0,0058	
21	Summe Tetra- bis OctaCDD		-	
22	2378-TetraCDD	<0,0006	<0,0031	
23	12378-PentaCDD	<0,0006	<0,0006	
24	123478-HexaCDD	<0,0013	<0,0015	
25	123678-HexaCDD	<0,0006	<0,0014	
26	123789-HexaCDD	<0,0013	<0,0017	
27	1234678-HeptaCDD	<0,0019	<0,0015	
28	Summe Tetra- bis OctaCDF/D	1,38	-	
29	TE (BGA) exkl. NWG	0,01	-	
30	ITE (NATO/CCMS) exkl. NWG	0,01		
31	ITE (NATO/CCMS) inkl. NWG	0,01	-	

Tabelle 36 Bestimmung der Massenkonzentration von PAH; CFM56-3B1

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL

MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE

Blatt Nr.: 1
zu Probengruppe 15

Probenahmezeitraum: Datum: 04.07.96
Uhrzeit: 13:53 - 14:46

Meßstelle: Triebwerksprüfstand
Lauf / Vorgang: Prüflauf - 2. Teil
Triebwerkstyp: CFM56-3B1 (not inc. SB 72-437)
Probe Nr.: 15/9+10 und 15/11+12
Sorptionsmittel: XAD-2
Desorption: LM-Desorption
Labor: HLfU

*Massenkonzentration im Abgas (273,16 K; 1013,25 hPa; trocken)

lfd. Nr.	Komponente		15/9+10 [ng/m³]*	15/11+12 [ng/m³]*	
1	Benzo(b)naphto(2,1-d)thiophen		<13,7	<13,1	
2	Benzo(c)acridin		n.b.*)	n.b.*)	
3	Benz(a)anthracen		<13,7	<13,1	
4	Chrysen + Triphenylen		<13,7	<13,1	
5	Summe 1- bis 6-Methylchrysen		<13,7	<13,1	
6	Benzo(b)fluoranthen		<13,7	<13,1	
7	Benzo(j)fluoranthen + Benzo(k)fluoranthen		<13,7	<13,1	
8	Benzo(e)pyren		<13,7	<13,1	
9	Benzo(a)pyren		<41,0**)	<249**)	
10	Indeno(1,2,3-cd)fluoranthen		ISTD	ISTD	
11	Dibenz(a,h)acridin		n.b.*)	n.b.*)	
12	Dibenz(a,i)acridin		n.b.*)	n.b.*)	
13	Dibenz(a,j)anthracen		<13,7	<13,1	
14	Indeno(1,2,3-cd)pyen		<13,7	<13,1	
15	Dibenz(a,h)anthracen + Dibenz(a,c)anthracen		<13,7	<13,1	
16	Picen		<13,7	<13,1	
17	Benzo(g,h,i)perylen		<13,7	<13,1	
18	Anthanthren		<13,7	<13,1	
19	Dibenzo(a,l)pyren		<13,7	<13,1	
20	Dibenzo(a,e)fluoranthen		<13,7	<13,1	
21	Dibenzo(a,e)pyren		<13,7	<13,1	
22	Dibenzo(a,i)pyren		<13,7	<13,1	
*)	Mit der angewandten Methode nicht bestimmbar (nur massenspektrometrisch quantifizierbar)				
**)	Überlagerung durch Störkomponente				

Tabelle 37 Bestimmung der Massenkonzentration an PCDD/F, CFM56-3B1

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL	MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE	Blatt Nr.: 2	zu Probengruppe 15

Meßstelle: Triebwerksprüfstand

Lauf / Vorgang: Prüflauf - 1. Teil ("seal break in")

Probenahmezeitraum: Datum: 04.07.96
Uhrzeit: 12:37 - 13:26

Triebwerkstyp: CFM56-3B1 (not inc. SB 72-437)

Probe Nr.: 15/1+2+3+4

Sorptionsmittel: XAD-2

Desorption: LM-Desorption

Labor: GFA

*Massenkonzentration im Abgas (273,16 K; 1013,25 hPa; trocken)

lfd. Nr.	Komponente PCDF	15/1+2+3+4 [ng/m^3]*	
1	Summe TetraCDF	0,0446	
2	Summe PentaCDF	0,0341	
3	Summe HexaCDF	0,0015	
4	Summe HeptaCDF	0,0015	
5	OctaCDF	<0,015	
6	Summe Tetra- bis OctaCDF	0,0610	
7	2378-TetraCDF	0,0021	
8	12378-/12348-PentaCDF	0,0016	
9	23478-PentaCDF	0,0009	
10	123478-/123479-HexaCDF	<0,0012	
11	123678-HexaCDF	<0,0009	
12	123789-HexaCDF	<0,0001	
13	234678-HexaCDF	0,0010	
14	1234678-HeptaCDF	0,0018	
15	1234789-HeptaCDF	<0,0030	
	PCDD		
16	Summe TetraCDD	<0,0004	
17	Summe PentaCDD	<0,0004	
18	Summe HexaCDD	<0,0004	
19	Summe HeptaCDD	0,0030	
20	OctaCDD	0,0074	
21	Summe Tetra- bis OctaCDD	0,0104	
22	2378-TetraCDD	<0,0004	
23	12378-PentaCDD	<0,0003	
24	123478-HexaCDD	<0,0004	
25	123678-HexaCDD	<0,0003	
26	123789-HexaCDD	<0,0003	
27	1234678-HeptaCDD	0,0015	
28	Summe Tetra- bis OctaCDF/D	0,0714	
29	TE (BGA) exkl. NWG	0,0012	
30	ITE (NATO/CCMS) exkl. NWG	0,0009	
31	ITE (NATO/CCMS) inkl. NWG	0,0018	
32	WF $^{13}C_{12}$-1234-TetraCDD	104%	

Tabelle 38 : Bestimmung der Massenkonzentration von Aldehyden und Ketonen, CF6-50E2

HESSISCHE LANDESANSTALT
FÜR UMWELT KASSEL

MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER
ABGASINHALTSSTOFFE
- ALDEHYDE / KETONE -
Blatt Nr.: 1 von 3 (Aldedyde)

Anlage: Triebwerksprüfstand
Vorgang: gesamter Prüflauf — Uhrzeit: 12:18 - 13:09
Triebwerkstyp: CF6-50E2
Sorptionsmittel: 2 Röhrchen für Aldehydprobenahme SUPELCO Kat.-Nr. 2-1024 1mg 2,4-DNPH auf 350mg Kieselgel (150-250µm)
Desorption: mit Acetonitril
Sorptionsmittel: 3 Waschflachen mit je 50ml Lösung von 2,4-DNPH (0,05 %) in Acetonitril, angesäuert mit HCl
*Massenkonzentration im Abgas (273,16K; 1013,25hPa; trocken)

lfd. Nr.	Komponente			Waschflaschen		Röhrchen	
				Pr.-Nr.:24/1 [mg/m³]*	Pr.-Nr.:24/2 [mg/m³]*	Pr.-Nr.:24/3 [mg/m³]*	Pr.-Nr.:24/4 [mg/m³]*
1	Formaldehyd			1,71	1,85	1,13	0,66
2	Acetaldehyd			0,55	0,53	Ausfall	Ausfall
3	Benzaldehyd			<0,53	<0,50	<0,021	<0,013
4	Propionaldehyd						
	+ Furfurol						
	+ Acrolein			0,52	0,71	Ausfall	Ausfall
5	Heptanon			-	-	-	-
6	Ethylmethylketon			<0,21	<0,20	<0,011	<0,007
7	Cyclohexanon			-	-	-	-
		Bestimmungsgrenzen *(273,16 K; 1013,25 hPa; trocken)					
		Probe Nr.:		24/1	24/2	24/3	24/4
		Sorptionsmittel:		Waschflaschen		Röhrchen	
		Probevolumen [l]*:		168,6	178,5	70,1	118,4
lfd. Nr.	Komponente	[µg/Probe]		[mg/m³]*	[mg/m³]*	[mg/m³]*	[mg/m³]*
		Waschflasche	Röhrchen				
1	Formaldehyd	25	0,80	0,15	0,14	0,01	0,01
2	Acetaldehyd	35	0,80	0,21	0,20	0,01	0,01
3	Benzaldehyd	90	1,50	0,53	0,50	0,02	0,01
4	Propionaldehyd						
	+ Furfurol						
	+ Acrolein	40	0,80	0,24	0,22	0,01	0,01
5	Heptanon	-	-	-	-	-	-
6	Ethylmethylketon	35	0,80	0,21	0,20	0,01	0,01
7	Cyclohexanon	-	-	-	-	-	-

Tabelle 39 : Bestimmung der Massenkonzentration von Aldehyden und Ketonen während der Hinterherfahrt

HESSISCHE LANDESANSTALT
FÜR UMWELT
KASSEL

MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER
ABGASINHALTSSTOFFE
- ALDEHYDE / KETONE -
Blatt Nr.: 2 von 3 (Aldedyde)

Anlage: Vorfeld
Triebwerkstyp: CF6-80C2 CFM56-3 CF6-50C2 oder E2
Probenummer: 28/1 28/3: 28/5:
Vorgang: Fahrt im Abgasstrahl von Flugzeugen
Sorptionsmittel: Röhrchen für Aldehydprobenahme SUPELCO Kat.-Nr. 2-1024 1mg 2,4-DNPH auf 350 mg Kieselgel (150-250µm)
Desorption: mit Acetonitril
Datum: 04.03.1997
*Massenkonzentration im Abgas (273,16 K; 1013,25 hPa; trocken)

lfd. Nr.	**Komponente**	**Probe Nr.: Uhrzeit:**	**28/1 12:08 - 12:13 [mg/m³]***	**28/3 12:33 - 12:41 12:44 - 12:47 [mg/m³]***	**28/5 13:02 - 13:10 [mg/m³]***	
1	Formaldehyd		0,26	0,17	0,70	
2	Acetaldehyd		0,08	0,05	0,25	
3	Benzaldehyd		<0,057	<0,03	<0,04	
4	Propionaldehyd					
	+ Furfurol					
	+ Acrolein		0,10	0,062	0,19	
5	Heptanon		-	-	-	
6	Ethylmethylketon		<0,06	<0,03	<0,04	
7	Cyclohexanon		-	-	-	
		Bestimmungsgrenzen *(273,16K; 1013,25hPa; trocken)				
		Probe Nr.:	28/1	28/3	28/5	
		Sorptionsmittel:	Röhrchen	Röhrchen	Röhrchen	
		Probevolumen [l]*:	14,1	28,5	22,6	
lfd. Nr.	Komponente	[µg/Probe]	[mg/m³]*	[mg/m³]*	[mg/m³]*	
		(Röhrchen)				
1	Formaldehyd	0,80	0,06	0,03	0,04	
2	Acetaldehyd	0,80	0,06	0,03	0,04	
3	Benzaldehyd	0,80	0,06	0,03	0,04	
4	Propionaldehyd					
	+ Furfurol					
	+ Acrolein	0,80	0,06	0,03	0,04	
5	Heptanon	-	-	-	-	
6	Ethylmethylketon	0,80	0,06	0,03	0,04	
7	Cyclohexanon	-	-	-	-	

Tabelle 40: Bestimmung der Massenkonzentration von Aldehyden und Ketonen CFM56

HESSISCHE LANDESANSTALT
FÜR UMWELT
KASSEL

MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER
ABGASINHALTSSTOFFE
- ALDEHYDE / KETONE -
Blatt Nr.: 3 von 3 (Aldedyde)

Anlage: Triebwerksprüfstand
Triebwerkstyp: CFM56-3B1 (not inc. SB 72-437)
Probenummer
Vorgang: Prüflauf (Beprobung teilweise)

Sorptionsmittel: Röhrchen für Aldehydprobenahme SUPELCO Kat.-Nr. 2-1024 1mg 2,4-DNPH auf 350mg Kieselgel (150-250µm)
Desorption: mit Acetonitril
Datum: 20.02.1997
*Massenkonzentration im Abgas (273,16K; 1013,25hPa; trocken)

lfd. Nr.	**Komponente**	**Probe Nr.:** **Uhrzeit:**	**29/7** **11:10 - 11:37** **[mg/m³]***	**29/14** **13:23 - 13:39** **[mg/m³]***	**29/15** **13:41 - 13:57** **[mg/m³]***	**29/16** **13:58 - 14:13** **[mg/m³]***	**29/17** **14:14 - 14:22** **[mg/m³]***
1	Formaldehyd		0,33	0,36	0,18	<0,08	0,42
2	Acetaldehyd		0,12	0,14	<0,08	<0,08	0,17
3	Benzaldehyd		<0,05	<0,08	<0,08	<0,08	<0,16
4	Propionaldehyd						
	+ Furfurol						
	+ Acrolein		0,10	0,15	0,23	1,83	<0,16
5	Heptanon		<0,05	<0,08	<0,08	<0,08	<0,16
6	Ethylmethylketon		<0,05	<0,08	<0,08	<0,08	<0,16
7	Cyclohexanon		<0,05	<0,08	<0,08	<0,08	<0,16
		Bestimmungsgrenzen *(273,16K; 1013,25hPa; trocken					
		Probe Nr.:	29/7	29/14	29/15	29/16	29/17
		Sorptionsm.:	Röhrchen	Röhrchen	Röhrchen	Röhrchen	Röhrchen
		Probevol.[l]*:	16,00	10,30	10,30	10,30	5,00
lfd. Nr.	Komponente	[µg/Probe]	[mg/m³]*	[mg/m³]*	[mg/m³]*	[mg/m³]*	[mg/m³]*
		(Röhrchen)					
1	Formaldehyd	0,80	0,05	0,08	0,08	0,08	0,16
2	Acetaldehyd	0,80	0,05	0,08	0,08	0,08	0,16
3	Benzaldehyd	0,80	0,05	0,08	0,08	0,08	0,16
4	Propionaldehyd						
	+ Furfurol						
	+ Acrolein	0,80	0,05	0,08	0,08	0,08	0,16
5	Heptanon	0,80	0,05	0,08	0,08	0,08	0,16
6	Ethylmethylketon	0,80	0,05	0,08	0,08	0,08	0,16
7	Cyclohexanon	0,80	0,05	0,08	0,08	0,08	0,16

Tabelle 41: Hinterherfahrten bei Flugzeugen

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL — MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE — Blatt Nr.: 1

Meßstelle: Hinterherfahrt im Abgasstrahl von Flugzeugen

Sorptionsmittel: Carbosieve S-III/ Tenax TA

Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen

lfd. Nr.	Komponente	Anzahl	kleinster Wert	Mittelwert	größter Wert	Stdabw. (n-1)
1	Benzol	4	0,12	0,67	2,21	1,03
2	Cyclohexen					
3	1-Hepten	5	0,02	0,18	0,82	0,36
4	n-Heptan	2	0,01	0,02	0,03	0,01
5	Toluol	8	0,05	0,13	0,40	0,12
6	n-Octan					
7	Ethylcyclohexan					
8	Ethylbenzol	5	0,04	0,08	0,16	0,05
9	1,3-/1,4-Dimethylbenzol	8	0,03	0,13	0,43	0,13
	(m-/p-Xylol)					
10	Ethynylbenzol					
11	1-Nonen	2	0,02	0,21	0,39	0,26
12	Styrol					
13	1,2-Dimethylbenzol	2	0,02	0,03	0,04	0,01
	(o-Xylol)					
14	n-Nonan	5	0,05	0,31	0,88	0,35
15	Propylbenzol					
16	Benzaldehyd	1	0,05	0,05	0,05	
17	3-Ethyltoluol	2	0,03	0,04	0,06	0,02
18	4-Ethyltoluol					
19	2-Ethyltoluol					
20	3-/4-Ethyltoluol					
21	1,3,5-Trimethylbenzol	2	0,03	0,06	0,09	0,04
	(Mesitylen)					
22	Phenol	3	0,29	0,56	0,90	0,31
23	1,2,4-Trimethylbenzol	1	1,12	1,12	1,12	
	(Pseudocumol)					
24	n-Decan	4	0,17	0,77	1,74	0,68
25	1,2,3-Trimethylbenzol	4	0,01	0,13	0,37	0,17
26	Indan					
27	Butylbenzol					
28	trans-Decahydronaphthalin					
29	n-Undecan	6	0,04	0,53	2,01	0,76
30	Naphthalin	1	0,57	0,57	0,57	
31	n-Dodecan	3	0,32	1,18	2,78	1,38
32	n-Tridecan	6	0,03	0,41	1,71	0,65
33	2-Methylnaphthalin	2	0,13	0,58	1,03	0,64
34	1-Methylnaphthalin					
35	Biphenyl					
36	n-Tetradecan	3	0,02	0,53	1,39	0,75
37	1,4-Dimethylnaphthalin	1	0,77	0,77	0,77	
38	n-Pentadecan					
39	n-Hexadecan					
40	n-Heptadecan					

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL

MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE

Blatt Nr.: 1

Meßstelle: Hinterherfahrt im Abgasstrahl von Flugzeugen

Sorptionsmittel: Carbosieve S-III/ Tenax TA

Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen

lfd. Nr.	Komponente	Anzahl	kleinster Wert	Mittelwert	größter Wert	Stdabw. (n-1)
41	1,2,3,5-Tetramethylbenzol	1	0,01	0,01	0,01	
42	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin					
43	1,3-Dimethylnaphthalin					
44	1,6-Dimethylnaphthalin					
45	Methylcyclopentan	1	0,23	0,23	0,23	
46	1-Octen	2	0,02	0,03	0,04	0,01
47	4-Methylnonan	1	0,03	0,03	0,03	
48	sec. Butylbenzol					
49	Butylcyclohexan					
50	Inden					
51	2-Methylbenzaldehyd					
52	1-Ethylnaphthalin					
53	3-Ethyltoluol					
	+ Benzaldehyd					
54	n-Decan	3	0,07	0,08	0,09	0,01
	+ 1,2,4-Trimethylbenzol					
	(Pseudocumol)					
55	3-/4-Ethyltoluol					
	+ Benzaldehyd					
56	1-Hexen					
57	Methylcyclohexan					
58	Ethylcyclopentan					
59	cis-1,3-Dimethylcyclohexan					
60	Mesityloxid					
61	2,6-Dimethyloctan	2	0,01	0,03	0,04	0,02
62	2-Methylnonan					
63	p-Cymol					
64	1,2-Diethylbenzol					
65	1-Phenylethanol					
66	4-Methylbenzaldehyd					
67	n-Octan					
	+ Mesityloxid (a-, ß-Isom.)					
68	p-Cymol					
	+1,2,3-Trimethylbenzol					
69	trans-Decahydronaphthalin					
	+ 1,2-Diethylbenzol					
70	2-Methylnonan	2	0,04	0,04	0,05	
	+ Benzaldehyd					
71	Nonan					
	+ 1,2-Dimethylbenzol (o-Xylol)					
72	Butylbenzol					
	+ 1-Phenylethanol					
73	n-Dodecan					
	+ Naphthalin					

Die in den Tabellen 34 bis 40 dargestellten Ergebnisse werden in den nachfolgenden Grafiken wiedergegeben.

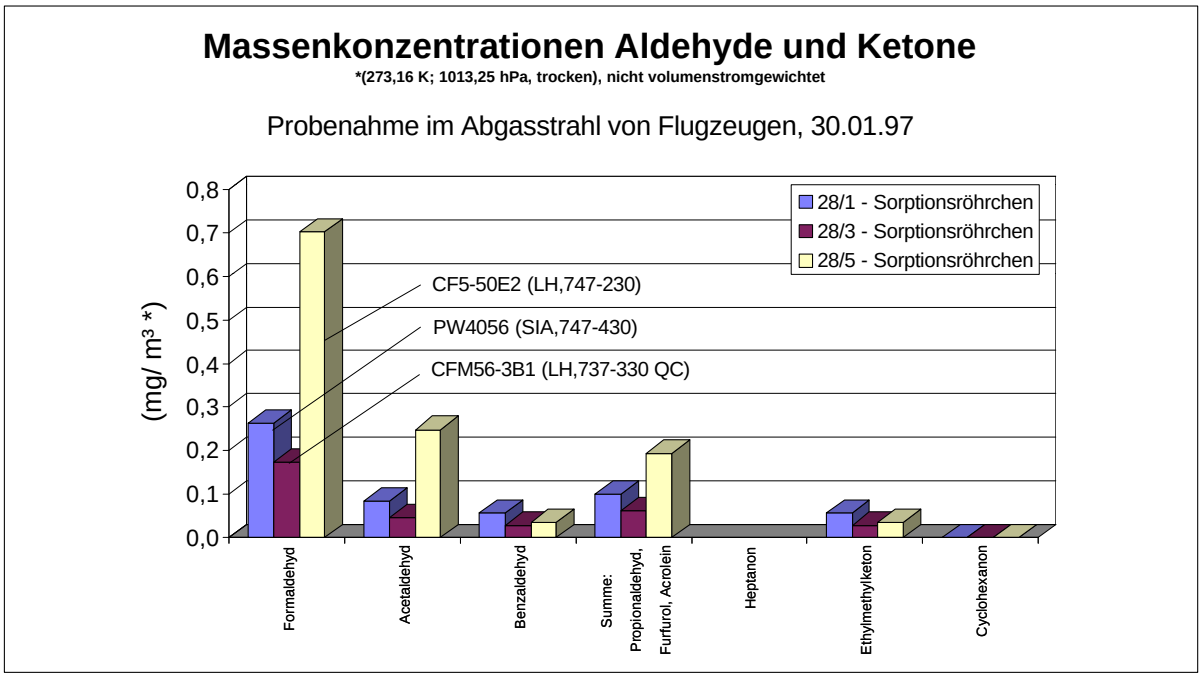


Abbildung 63: Massenkonzentration von Aldehyden und Ketonen, gemessen im Abgasstrahl durch Hinterherfahrt

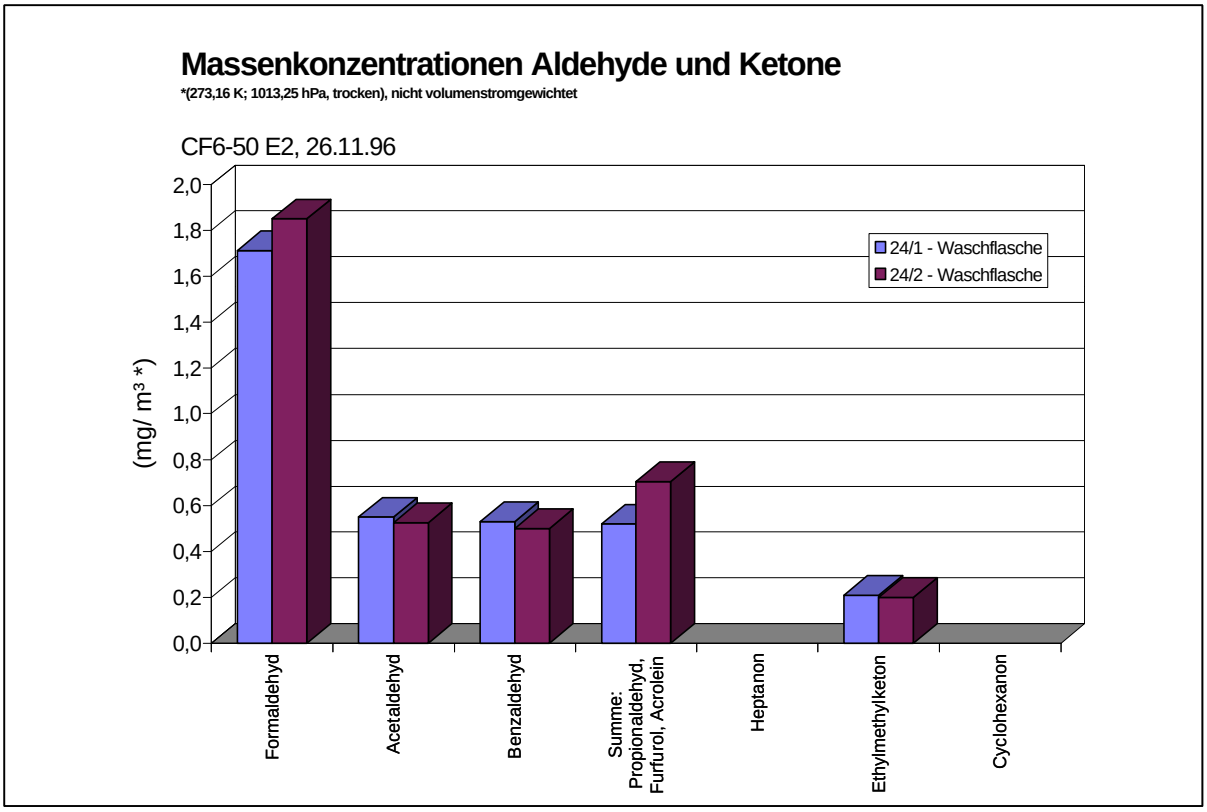


Abbildung 64: Massenkonzentration von Aldehyden und Ketonen im Abgas eines Triebwerkes von Typ CF6-50

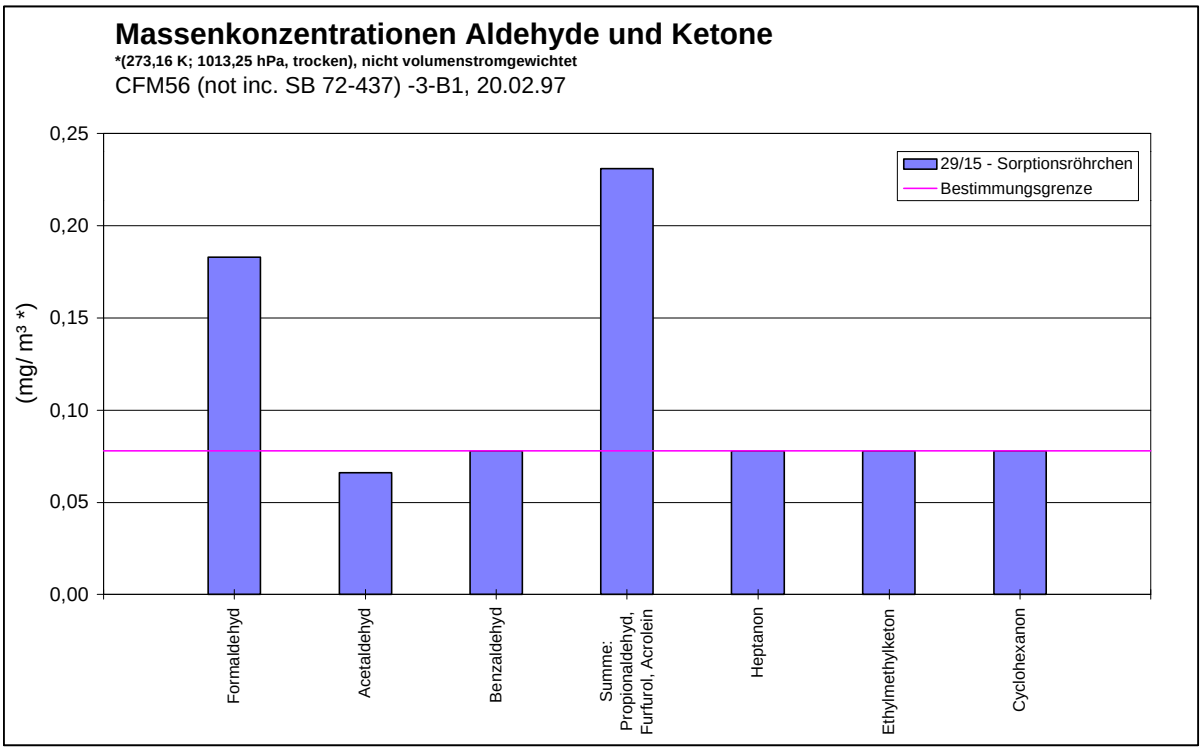


Abbildung 65: Massenkonzentration von Aldehyden und Ketonen im Abgas eines Triebwerkes von Typ CFM56-3

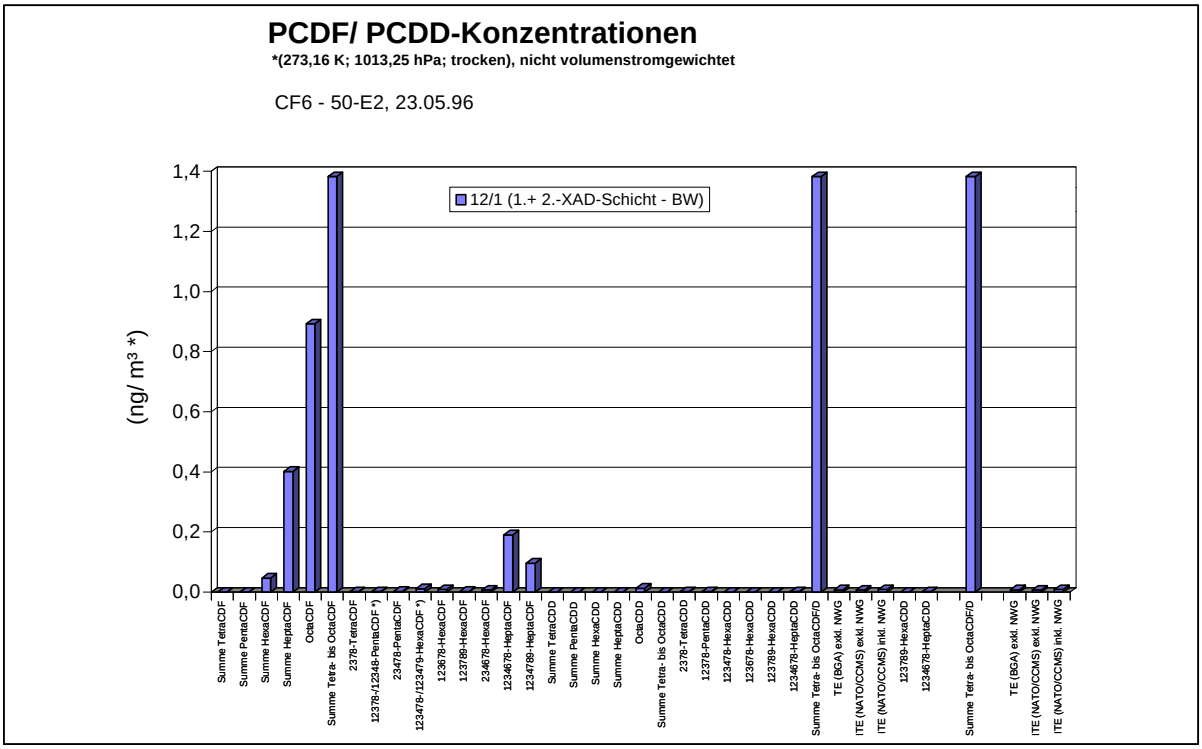


Abbildung 66: Massenkonzentration von PCDD/F im Abgas eines Triebwerkes von Typ CF6-50

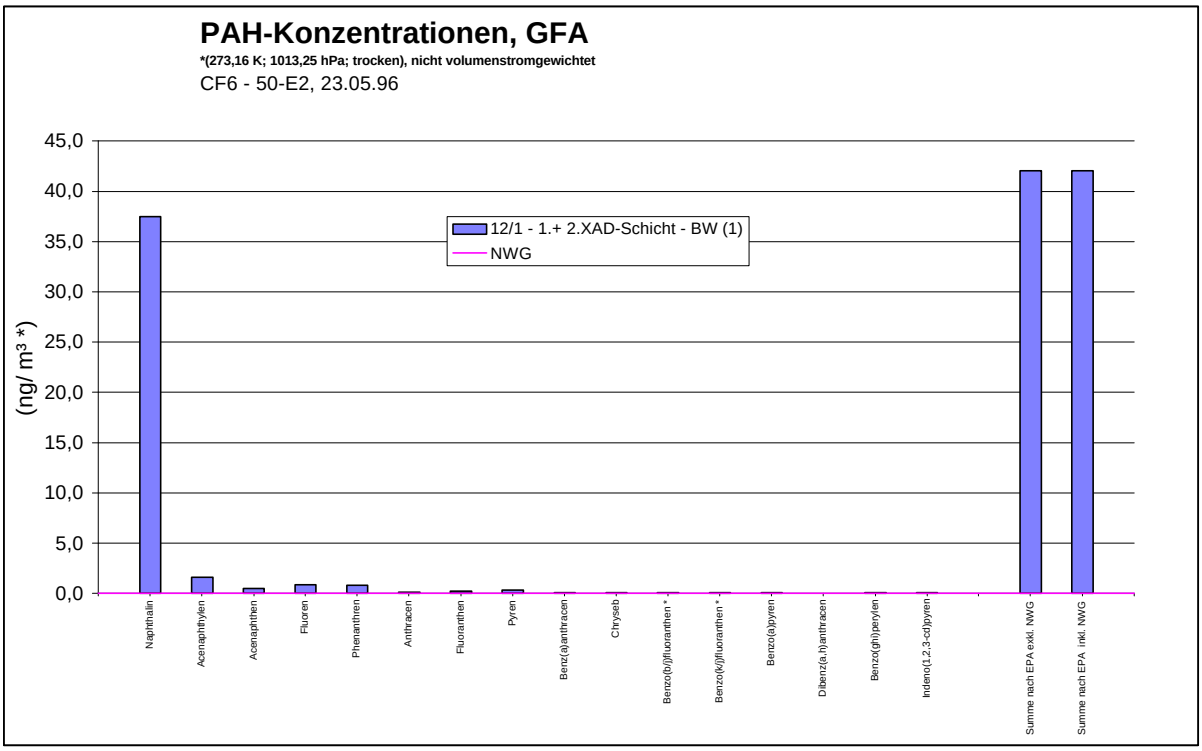


Abbildung 67: Massenkonzentration von PAH im Abgas eines Triebwerkes von Typ CF6-50

20 ANALYSE DES EINGESETZTEN KEROSINS

In Kapitel 2, Abschnitt 12.1.7 wurde die Methode der Kerosinanalyse mittels Festphasenextraktion und anschließender gaschromatographischer Untersuchung beschrieben.

Hiernach wurde der jeweils zu untersuchende Flugzeugkraftstoff (Kerosin Jet A1) mittels Festphasenextraktion unter Verwendung einer Silika-Cyanopropylsilika-Mischphase in zwei Fraktionen aufgetrennt. In der ersten Fraktion befinden sich aliphatische Kohlenwasserstoffe und in der zweiten Fraktion mono- und diaromatische Kohlenwasserstoffe.

Während des gesamten Untersuchungsprogrammes wurden dem in Abschnitt 10.1 beschriebenen Kraftstoffversorgungssystem der Triebwerkstandlaufeinrichtung regelmäßig Kerosinproben zur Analyse entnommen. Da während eines einzigen Prüflaufes ca. 5000 l Kerosin verbraucht werden und der Vorratstankinhalt mit zwei 40.000 l-Tanks ausreichend bemessen ist um bis zu 16 Prüfläufe zu bearbeiten, erschien es wenig sinnvoll, jede Kerosinprobe zu analysieren, da hierduch Unterschiede in der Zusammensetzung nur sehr schwer festzustellen gewesen wären.

In den nachfolgenden Tabellen werden die Ergebnisse der Kerosinanalysen getrennt nach den Fraktionen 1 und 2 der Festphasenextraktion dargestellt.

Hessische Landesanstalt für Umwelt		**Quantifizierte Bestandteile des Kerosin**		
Firma: Meßstelle:		**Kerosin mittels Festphasenextraktion** **Fraktion 1**		
lfd. Nr.	Komponente	Wert Probe 1	Wert Probe 2	Mittelwert
		mg/g Kerosin	mg/g Kerosin	mg/g Kerosin
1	1-HEPTEN			
2	n-HEPTAN	1,2	2,3	1,8
3	n-OCTAN	7,7	7,3	7,5
4	1-NONEN	3,5	3,4	3,4
5	n-NONAN	20,5	19,7	20,1
6	n-DECAN	25,7	25,1	25,4
7	n-UNDECAN	37,7	36,3	37,0
8	n-DODECAN	30,0	29,7	29,9
9	n-TRIDECAN	22,9	21,4	22,1
10	n-TETRADECAN	18,4	17,0	17,7
11	n-PENTADECAN	9,0	9,0	9,0
12	n-HEXADECAN	0,4	1,2	0,8
13	n-HEPTADECAN	1,3	1,3	1,3

Hessische Landesanstalt für Umwelt		**Quantifizierte Bestandteile des Kerosin**		
Firma:		**Kerosin mittels Festphasenextraktion**		
Meßstelle:		**Fraktion 2**		
lfd. Nr.	Komponente	Wert Probe 1	Wert Probe 2	Mittelwert
		mg/g Kerosin	mg/g Kerosin	mg/g Kerosin
1	BENZOL			
2	TOLUOL			
3	ETHYLBENZOL	0,2	0,1	0,1
4	m-/p-XYLOL	9,4	6,4	7,9
5	STYROL			
6	o-XYLOL	3,5	3,8	3,6
7	PROPYLBENZOL	2,4	1,5	2,0
8	3-ETHYLTOLUOL	7,4	5,7	6,6
9	1.3.5-TRIMETHYLBENZOL	2,8	2,6	2,7
10	1.2.4-TRIMETHYLBENZOL	16,9	15,5	16,2
11	1.2.3-TRIMETHYLBENZOL	6,4	6,5	6,5
12	BUTYLBENZOL/	16,8	15,5	16,1
	trans-DECAHYDRONAPHTHALIN			
13	1-METHYLNAPHTHALIN			

Über den Untersuchungszeitraum wurde keine wesentliche Schwankung in der Zusammensetzung des eingesetzten Kerosins festgestellt. Nicht untersucht wurden in diesem Zusammenhang die physikalischen Spezifikationen wie sie in Tabelle 7 angegeben wurden. Hier wird unterstellt, daß sich diese innerhalb des Untersuchungszeitraumes nicht verändert haben.

21 EMISSIONEN ORGANISCHER VERBINDUNGEN AUS DIESEL-MOTOREN

Zur Differenzierung der Emissonsspektren organisch-chemischer Stoffe aus zivilen Flugzeugtriebwerken und dem Kraftfahrzeugverkehr wurden nach den gleichen Kriterien, wie sie in Kapitel 2 beschrieben wurden, die Emissionen aus unterschiedlichen Dieselmotoren bestimmt. Hierzu wurden die Motoren allerdings im realen Betrieb und nicht auf einem Prüfstand untersucht.

Die jeweiligen Dieselkraftfahrzeuge (PKW und LKW) wurden im Leerlauf, mittlerer Last (Stadtverkehr) und maximaler Last (Autobahnverkehr) betrieben. Die Probenahme erfolgte jeweils durch Adaption der Probenahmesonde im Auspuff und Verbindung dieser mit den Sorptionsröhrchen im Kofferraum bzw. Laderaum der untersuchten Fahrzeuge.

Die folgenden Motorentypen wurden in die Untersuchungen einbezogen:

Nr.	Fabrikat	Typ	Baujahr
1	Mercedes-Benz	5917cm, Typ OM 366LA	1987
2	Mercedes-Benz	2997cm³,Typ 606910 mit Oxikat	1994
3	Mitsubishi	2835cm³, Typ 4M40BK8064	1996

Ebenso wie bei den untersuchten Triebwerken wurden die Ergebnisse aus den Messungen an Dieselmotoren zu sog. Konzentrationsbereichskurven und Verhältniskurven verarbeitet. Diese werden im folgenden dargestellt.

Tabelle 42: Massenkonzentrationen organischer Stoffe in Abgasen aus Dieselmotoren.

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL — MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE — Blatt Nr.: 1

Firma: HLfU
Meßstelle: Dieselmotor, alle Fahrzeuge, Fahrt
Sorptionsmittel: Carbosieve S-III/ Tenax TA

Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen

lfd. Nr.	Komponente	Anzahl	kleinster Wert	Mittelwert	größter Wert	Stdabw. (n-1).
1	Benzol	17	0,48	2,12	5,73	1,33
2	Cyclohexen					
3	1-Hepten	4	0,01	0,13	0,28	0,14
4	n-Heptan	3	0,05	0,09	0,12	0,04
5	Toluol	20	0,16	0,53	1,19	0,30
6	n-Octan	3	0,09	0,26	0,35	0,14
7	Ethylcyclohexan					
8	Ethylbenzol	6	0,14	0,64	1,57	0,50
9	1,3-/1,4-Dimethylbenzol	9	0,12	1,16	2,91	1,13
	(m-/p-Xylol)					
10	Ethynylbenzol					
11	1-Nonen	5	0,09	0,39	0,69	0,23
12	Styrol					
13	1,2-Dimethylbenzol	6	0,08	0,79	1,46	0,64

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL — MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE — Blatt Nr.: 1

Firma: HLfU
Meßstelle: Dieselmotor, alle Fahrzeuge, Fahrt
Sorptionsmittel: Carbosieve S-III/ Tenax TA

Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen

lfd. Nr.	Komponente	Anzahl	kleinster Wert	Mittelwert	größter Wert	Stdabw. (n-1).
	(o-Xylol)					
14	n-Nonan	7	0,07	2,36	4,85	2,09
15	Propylbenzol	5	0,06	0,40	0,74	0,32
16	Benzaldehyd	7	0,11	0,87	2,19	0,78
17	3-Ethyltoluol	4	0,16	0,87	2,19	0,90
18	4-Ethyltoluol	1	0,40	0,40	0,40	
19	2-Ethyltoluol	2	0,57	0,62	0,66	0,07
20	3-/4-Ethyltoluol	5	0,31	1,24	2,48	0,80
21	1,3,5-Trimethylbenzol (Mesitylen)	6	0,06	0,59	1,09	0,4921
22	Phenol	4	0,44	1,12	2,22	0,76
23	1,2,4-Trimethylbenzol (Pseudocumol)	3	1,09	1,31	1,51	0,21
24	n-Decan	4	0,12	4,90	9,64	4,68
25	1,2,3-Trimethylbenzol	6	0,08	0,95	1,92	0,85
26	Indan	3	0,05	0,09	0,12	0,04
27	Butylbenzol	3	0,09	0,21	0,30	0,11
28	trans-Decahydronaphthalin					
29	n-Undecan	9	0,07	3,60	11,09	4,18
30	Naphthalin	4	1,01	1,98	2,62	0,75
31	n-Dodecan	7	0,12	2,95	8,56	3,27
32	n-Tridecan	7	0,08	2,51	6,78	2,63
33	2-Methylnaphthalin	6	0,95	2,26	3,51	1,00
34	1-Methylnaphthalin	6	0,09	1,29	2,86	1,32
35	Biphenyl	1	0,71	0,71	0,71	
36	n-Tetradecan	6	0,98	2,38	4,08	1,32
37	1,4-Dimethylnaphthalin	7	0,11	0,38	0,95	0,32
38	n-Pentadecan	9	0,04	1,30	5,58	1,89
39	n-Hexadecan	8	0,04	0,44	2,62	0,89
40	n-Heptadecan	3	0,05	0,07	0,10	0,02
41	1,2,3,5-Tetramethylbenzol	3	0,10	0,22	0,33	0,11
42	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin					
43	1,3-Dimethylnaphthalin					
44	1,6-Dimethylnaphthalin					
45	Methylcyclopentan					
46	1-Octen	3	0,08	0,21	0,30	0,12
47	4-Methylnonan	3	0,48	0,60	0,68	0,11
48	sec. Butylbenzol					
49	Butylcyclohexan	3	0,44	0,53	0,61	0,09
50	Inden	2	0,14	0,17	0,20	0,04
51	2-Methylbenzaldehyd					
52	1-Ethylnaphthalin					
53	3-Ethyltoluol					

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL

MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE

Blatt Nr.: 1

Firma: HLfU

Meßstelle: Dieselmotor, alle Fahrzeuge, Fahrt

Sorptionsmittel: Carbosieve S-III/ Tenax TA

Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen

lfd. Nr.	Komponente	Anzahl	kleinster Wert	Mittelwert	größter Wert	Stdabw. (n-1).
	+ Benzaldehyd					
54	n-Decan + 1,2,4-Trimethylbenzol (Pseudocumol)	4	0,17	1,72	2,95	1,44
55	3-/4-Ethyltoluol + Benzaldehyd					
56	1-Hexen					
57	Methylcyclohexan					
58	Ethylcyclopentan					
59	cis-1,3-Dimethylcyclohexan					
60	Mesityloxid					
61	2,6-Dimethyloctan	1	0,11	0,11	0,11	
62	2-Methylnonan					
63	p-Cymol	3	0,05	0,10	0,16	0,06
64	1,2-Diethylbenzol					
65	1-Phenylethanol					
66	4-Methylbenzaldehyd	2	0,94	0,98	1,02	0,05
67	n-Octan + Mesityloxid (a-, ß-Isom.)					
68	p-Cymol +1,2,3-Trimethylbenzol					
69	trans-Decahydronaphthalin + 1,2-Diethylbenzol					
70	2-Methylnonan + Benzaldehyd					
71	Nonan 1,2-Dimethylbenzol (o-Xylol)					
72	Butylbenzol + 1-Phenylethanol					
73	n-Dodecan + Naphthalin					

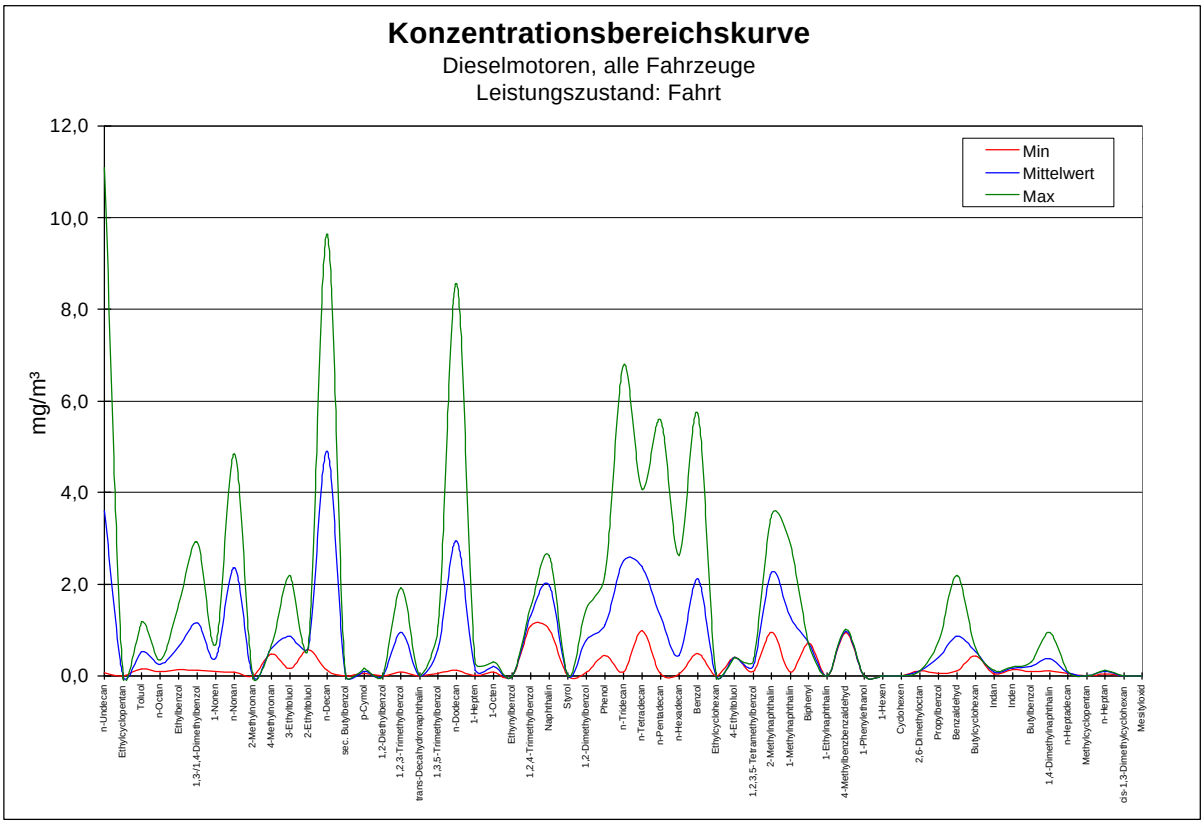


Abbildung 68: Konzentrationsbereichskurve Abgas Dieselmotor

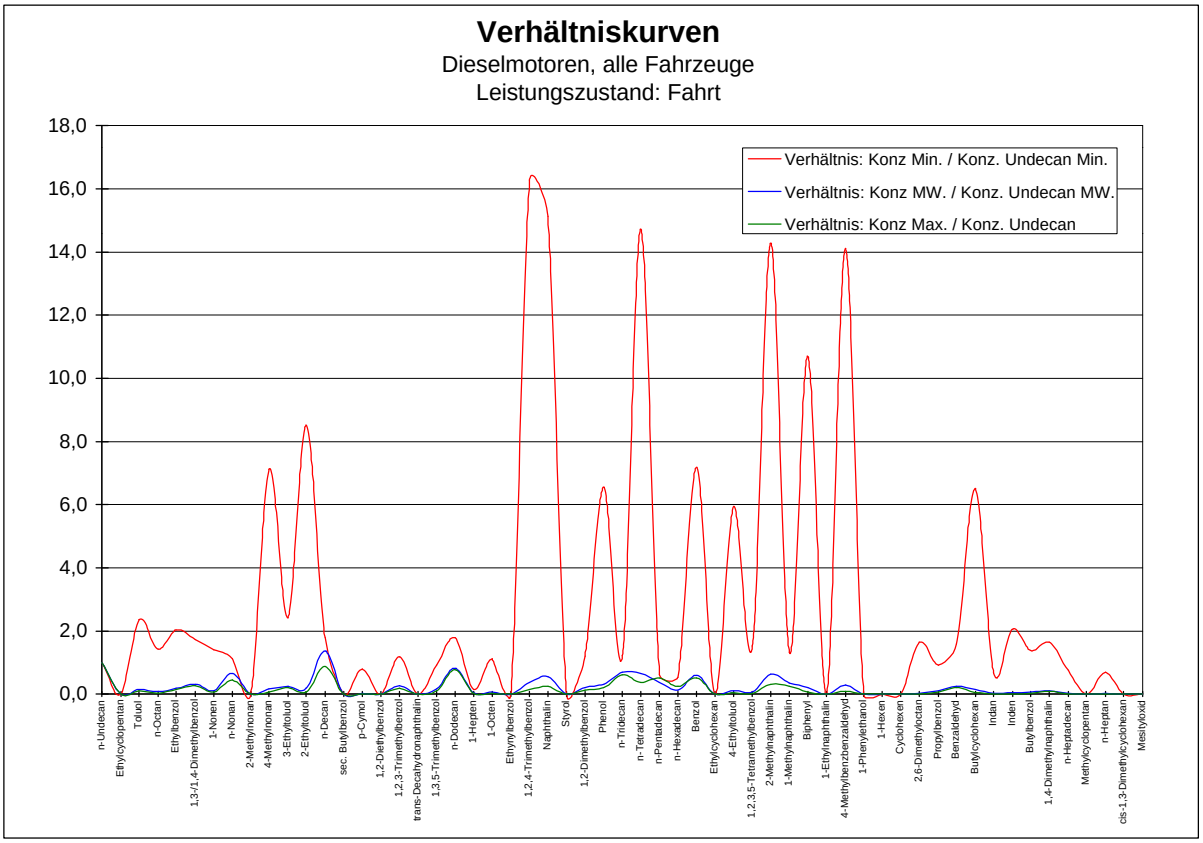


Abbildung 69: Verhältnisbereichskurve Abgas Dieselmotor

Tabelle 43: Massenkonzentrationen organischer Stoffe in Abgasen von Dieselmotoren.

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL — MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE — Blatt Nr.: 1

Firma: HLfU

Meßstelle: Dieselmotor, alle Fahrzeuge, Leerlauf

Sorptionsmittel: Carbosieve S-III/ Tenax TA

Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen

lfd. Nr.	Komponente	Anzahl	kleinster Wert	Mittelwert	größter Wert	Stdabw. (n-1).
1	Benzol	6	0,31	1,67	4,92	1,77
2	Cyclohexen	1	0,23	0,23	0,23	
3	1-Hepten	4	0,11	0,17	0,27	0,07
4	n-Heptan	2	0,05	0,08	0,10	0,04
5	Toluol	10	0,12	0,55	1,55	0,54
6	n-Octan					
7	Ethylcyclohexan					
8	Ethylbenzol	4	0,09	0,42	0,71	0,32
9	1,3-/1,4-Dimethylbenzol (m-/p-Xylol)	7	0,11	0,99	3,03	1,32
10	Ethynylbenzol					
11	1-Nonen	6	0,08	0,17	0,35	0,11
12	Styrol					
13	1,2-Dimethylbenzol (o-Xylol)	4	0,05	0,72	1,42	0,75
14	n-Nonan	8	0,04	0,84	3,06	1,29
15	Propylbenzol	2	0,65	0,71	0,76	0,08
16	Benzaldehyd	1	0,08	0,08	0,08	
17	3-Ethyltoluol	3	0,06	0,10	0,13	0,04
18	4-Ethyltoluol					
19	2-Ethyltoluol	1	0,12	0,12	0,12	
20	3-/4-Ethyltoluol	1	1,33	1,33	1,33	
21	1,3,5-Trimethylbenzol (Mesitylen)	2	0,81	0,86	0,92	0,07
22	Phenol	1	3,06	3,06	3,06	
23	1,2,4-Trimethylbenzol (Pseudocumol)	2	1,24	1,35	1,46	0,15
24	n-Decan	2	5,45	6,42	7,38	1,36
25	1,2,3-Trimethylbenzol	2	1,46	1,49	1,53	0,05
26	Indan	1	0,45	0,45	0,45	
27	Butylbenzol					
28	trans-Decahydronaphthalin	1	0,04	0,04	0,04	
29	n-Undecan	8	0,06	1,68	6,63	2,52
30	Naphthalin	2	1,92	2,21	2,50	0,41
31	n-Dodecan	3	0,18	2,76	6,03	2,99
32	n-Tridecan	7	0,06	1,43	5,26	1,82
33	2-Methylnaphthalin	3	1,02	2,57	4,22	1,60
34	1-Methylnaphthalin	4	0,11	1,53	3,37	1,62
35	Biphenyl	2	1,42	2,04	2,66	0,88
36	n-Tetradecan	7	0,05	1,30	3,42	1,31
37	1,4-Dimethylnaphthalin	6	0,09	11,14	35,30	14,49
38	n-Pentadecan	6	0,06	3,41	10,59	3,86
39	n-Hexadecan	8	0,04	2,18	7,80	2,71

HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT, KASSEL

MASSENKONZENTRATION GASFÖRMIGER ABGASINHALTSSTOFFE

Blatt Nr.: 1

Firma: HLfU

Meßstelle: Dieselmotor, alle Fahrzeuge, Leerlauf

Sorptionsmittel: Carbosieve S-III/ Tenax TA

Berechnet aus allen Massenkonzentrationswerten [mg/m3] (273,16K; 1013,25hPa; trocken) die oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen

lfd. Nr.	Komponente	Anzahl	kleinster Wert	Mittelwert	größter Wert	Stdabw. (n-1).
40	n-Heptadecan	8	0,03	2,42	10,11	3,45
41	1,2,3,5-Tetramethylbenzol	1	0,24	0,24	0,24	
42	1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin					
43	1,3-Dimethylnaphthalin					
44	1,6-Dimethylnaphthalin					
45	Methylcyclopentan					
46	1-Octen	3	0,05	0,15	0,27	0,11
47	4-Methylnonan	1	0,46	0,46	0,46	
48	sec. Butylbenzol					
49	Butylcyclohexan	3	0,34	0,53	0,79	0,23
50	Inden	1	0,17	0,17	0,17	
51	2-Methylbenzaldehyd					
52	1-Ethylnaphthalin	2	0,21	0,29	0,37	0,11
53	3-Ethyltoluol					
	+ Benzaldehyd					
54	n-Decan	6	0,09	0,37	1,04	0,36
	+ 1,2,4-Trimethylbenzol					
	(Pseudocumol)					
55	3-/4-Ethyltoluol					
	+ Benzaldehyd					
56	1-Hexen					
57	Methylcyclohexan					
58	Ethylcyclopentan					
59	cis-1,3-Dimethylcyclohexan					
60	Mesityloxid					
61	2,6-Dimethyloctan					
62	2-Methylnonan					
63	p-Cymol					
64	1,2-Diethylbenzol					
65	1-Phenylethanol					
66	4-Methylbenzaldehyd	1	1,34	1,34	1,34	
67	n-Octan					
	+ Mesityloxid (a-, ß-Isom.)					
68	p-Cymol					
	+1,2,3-Trimethylbenzol					
69	trans-Decahydronaphthalin					
	+ 1,2-Diethylbenzol					
70	2-Methylnonan					
	+ Benzaldehyd					
71	Nonan					
	+ 1,2-Dimethylbenzol (o-Xylol)					
72	Butylbenzol					
	+ 1-Phenylethanol					
73	n-Dodecan	2	3,12	6,15	9,17	4,28
	+ Naphthalin					

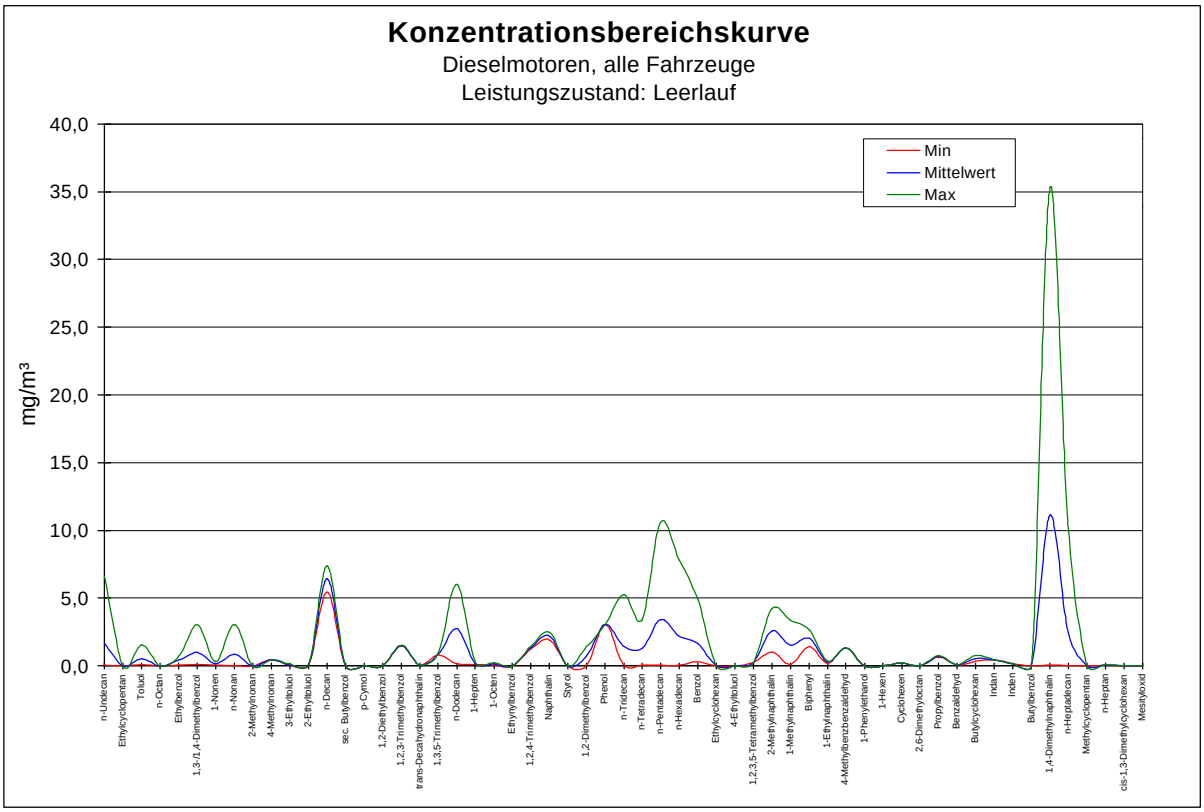


Abbildung 70: Konzentrationsbereichskurve eines Dieselmotors

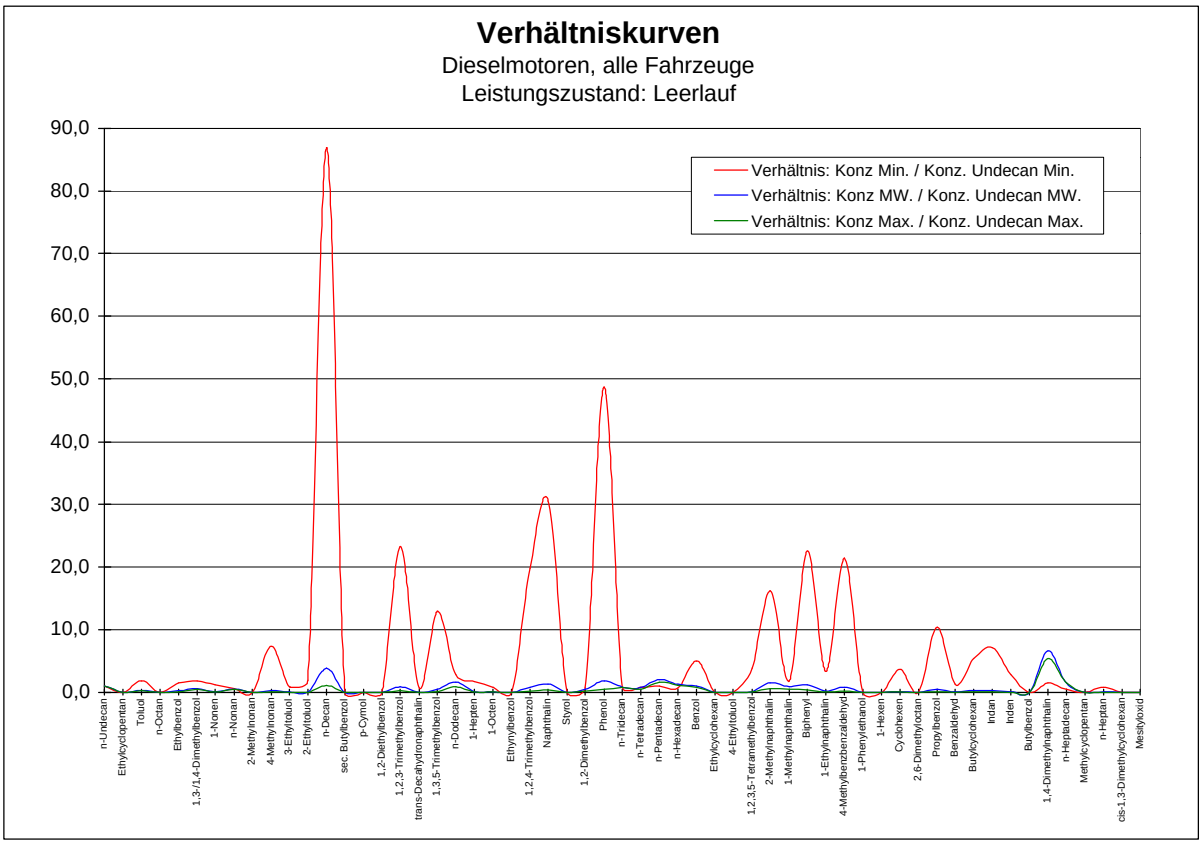


Abbildung 71: Verhältniskurve eines Dieselmotors

22 DISKUSSION DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Aus den in dieser Arbeit erzielten Ergebnissen lassen sich zur Beurteilung der Emissionen organisch-chemischer Verbindungen aus zivilen Flugzeugtriebwerken folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Der Aufwand bei der Beprobung von zivilen Flugzeugtriebwerken in Triebwerkstandlaufeinrichtungen zur Ermittlung organisch-chemischer Verbindungen ist beachtlich. Um repräsentative Abgasproben zu erhalten sind hierzu spezielle Methoden zu wählen.
- Das analytisch ermittelte Spektrum organisch-chemischer Verbindungen beschränkt sich im wesentlichen auf Alkane, Alkene, Aldehyde, Ketone, alicyclische Verbindungen sowie Mono- und Diaromaten. Mehr als 90 v.H. der Masse organisch-chemischer Verbindungen im Abgas ziviler Flugzeugtriebwerke konnte identifiziert werden.
- Unter der Annahme einer Übertragbarkeit der quantitativen Ergebnisse von den untersuchten Triebwerkstypen auf andere Triebwerkstypen lassen sich bei Berücksichtigung von Flugbewegungszahlen Emissionsabschätzungen für den flughafennahen Bereich treffen
- Obwohl sich zeigen ließ, daß die Emissionsstruktur organisch-chemischer Verbindungen im Abgas ziviler Flugzeugtriebwerke charakteristisch ist, lassen sich signifikante Fingerprints <u>zur</u> <u>ausschließlichen</u> Bestimmung flugverkehrsbedingter Immissionen nicht ableiten.
- Das Spektrum der Emissionen organisch-chemischer Verbindungen speziell aus Dieselmotoren zeigt Ähnlichkeiten zu dem der Flugzeugtriebwerke. An Immissionsaufpunkten kommt es daher zu Überlagerungen, die eine eindeutige Zuordnung der Verbindungen zu ihrem Ursprung nicht zuläßt.
- Bei der Ermittlung diskreter Einzelkomponenten zeigte sich, daß die Emissionskonzentration polychlorierter Dibenzo-p-dioxine und -furane sowie die Emissionskonzentration polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAH) im Abgas von Flugzeugtriebwerken eher unbedeutend ist.

Die Emissionen organisch-chemischer Einzelverbindungen aus zivilen Flugzeugtriebwerken waren bisher sowohl qualitativ als auch quantitativ nicht hinreichend untersucht. Als wesentliche Aussage diente hier, der mittels Flammenionisationsdetektor (FID) gemessene Summengehalt flüchtiger organischer Verbindungen (VOC). Zum Vergleich mit vorgegebenen Spezifikationen der Triebwerkshersteller reicht dieser Wert völlig aus. Andererseits läßt dieser VOC-Wert keinerlei Rückschluß darauf zu, welche organischen Einzelverbindungen sich in dem summarisch ermittelten Gesamtspektrum flüchtiger organischer Verbindungen verbergen. Insofern erschien es von Bedeutung, dieser Frage exemplarisch nachzugehen.

An ausgewählten Triebwerkstypen wurden daher Modelluntersuchungen sowohl in einer Triebwerkstandlaufeinrichtung als auch während betriebsüblicher Bewegungen von Flugzeugen im Vorfeld- bzw. Taxiway-Bereich eines großen deutschen Verkehrsflughafens durchgeführt.

Die Beprobung der Triebwerke in einer Triebwerkstandlaufeinrichtung setzte die Verwendung einer speziell für diesen Zweck konstruierten Beprobungseinrichtung voraus, um dem Grundsatz einer möglichst repräsentativen und vergleichbaren Probenahme zu genügen. Die

Beprobungen der Triebwerke im Vorfeld- und Taxiway-Bereich erfolgten durch nahe Hinterherfahrt direkt im Abgasstrahl der vorausfahrenden Flugzeuge.

Durch entsprechende Vorermittlungen waren zunächst die im Zuge der Beprobung einzusetzenden Sorbentien zur Anreicherung der organischen Einzelstoffe auszuwählen und zu erproben. Aus einer bestimmten Anzahl von infrage kommenden Sorbentien wurden schließlich die polymeren Stoffe Amberlithe XAD-2 und Tenax TA sowie das grafitisierte Kohlenstoffmolekularsieb Carbosieve SIII ausgewählt.

Nach Desorption der angereicherten Einzelverbindungen mittels unterschiedlicher Verfahren und sich hieran anschließender massenspektrometrischer Untersuchung konnten qualitativ über 350 organische Verbindungen analysiert werden. Die Identifikation der Einzelverbindungen gestaltete sich äußert zeitaufwendig.

Zunächst wurden unter Berücksichtigung bestimmter Qualitätskriterien aus dem ursprünglichen Angebot nur die Verbindungen näher untersucht, die mit einer Qualitätsaussage von > 85 von 100 nachgewiesen worden waren. Diese Verbindungen wurden dann durch mehrfachen Spektren- und Retentionszeitvergleich mit den entsprechenden Reinstsubstanzen als Referenzstandards verglichen. Bei absoluter Deckungsgleichheit der Massenspektren und gleicher Retentionszeit wurden die jeweiligen Verbindungen als identifiziert angesehen. Nach dieser Methode wurden insgesamt 68 Verbindungen als sicher identifiziert angegeben. Durch Vergleich der Summe der Massenanteile dieser Verbindungen in einer charakteristischen Abgasprobe mit dem parallel ermittelten VOC-Konzentrationswert wurden unter Einbezug weiterer diskret ermittelter Verbindungen und Verbindungsgruppen (35) somit über 90 v.H. der Massenanteile organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von Flugzeugtriebwerken aufgeklärt.

Bei einem VOC-Konzentrationswert im Abgas der untersuchten Triebwerke zwischen ca. 2 und 30 mg/m³ stellt sich die Frage einer weitergehenden Aufklärung nur von untergeordneter Bedeutung. D.h. dem nicht aufgeklärten Massenkonzentrationsanteil an VOC von >0,2 bis >3 mg/m³ sind ca. 280 Einzelverbindungen zuzuordnen. Ein entsprechender Aufklärungsaufwand wurde in diesem Falle als unverhältnismäßig angesehen, zumal der Zuwachs an Erkenntnissen als eher gering eingeschätzt wurde.

Die Quantifizierung der als sicher identifizierten organischen Verbindungen erfolgte mit Hilfe der Gaschromatographie. Aus der Vielzahl der erhaltenen Ergebnisse läßt sich erkennen, daß die Konzentrationswerte für die jeweiligen Einzelstoffe Abhängigkeiten von den unterschiedlichen Triebwerkstypen wie auch von den eingesetzten Sorbentien aufweisen. Dies läßt sich begründen durch gewisse Unterschiede zwischen einzelnen Prüfläufen der Triebwerke. Die Ergebnisse wurden daher für jeden Einzelstoff als Bereiche angegeben und sowohl tabellarisch als auch in Form sog. Konzentrationsbereichskurven dargestellt.

Um die Emissionsspektren übersichtlicher lesbar zu gestalten, wurden die Einzelstoffe weitgehend willkürlich aufgereiht und auf den Stoff Undecan (=1) bezogen. Bei der Aufreihung wurde jedoch darauf geachtet, daß sich überwiegend in den meisten Proben immer in gleichen oder ähnlichen Verhältnissen wiedergefundene Einzelsubstanzen am Anfang der Aufreihung stehen. Die hierdurch erhaltenen sog. Verhältniskurven lassen erkennen, daß sich signifikante Ähnlichkeiten in den Kurvenverläufen feststellen lassen. Dies legt den Schluß nahe, daß das Spektrum organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von zivilen Flugzeugtriebwerken charakteristisch ist.

Diese bei der Emission aus Flugzeugtriebwerken sich ergebenden „Fingerprints“ organischer Stoffe lassen sich jedoch im Rahmen der Immissionsermittlung nicht nutzen, da es, wie

ebenso im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden konnte, durch kraftfahrzeugbedingte Emissionen organischer Verbindungen zu stoffspezifischen Überlagerungen kommt.

Mit Hilfe der vorliegenden Arbeit ist es jedoch dennoch möglich stoffspezifische Emissionsabschätzungen vorzunehmen. Hierzu ist es erforderlich einen „Aufenthaltsraum“ der Flugzeuge im Nahbereich von Flughäfen zu definieren (z.B. 3000ft Höhe x Länge x Breite) und den jeweiligen Lastzustand der Triebwerke in diesem „Aufenthaltsraum“ (z.B. LTO-Zyklus) den ermittelten Emissionsraten sowie entsprechenden Flugbewegungszahlen zuzuordnen.

Ebenso wurde im Rahmen dieser Arbeit das bei den Testläufen der Triebwerke eingesetzte Kerosin Jet A1 analysiert. Hierzu wurden bei jedem beprobten Testlauf in der Triebwerksstandlaufeinrichtung entsprechende Proben entnommen. Eine Auswahl dieser Kerosinproben wurde nach einem Festphasenextraktionsverfahren in unterschiedliche Fraktionen aufgetrennt und dann gaschromatographisch untersucht. Es zeigte sich hierbei, daß das während der Untersuchungen eingesetzte Kerosin hinsichtlich seiner Zusammensetzung keinen wesentlichen Schwankungen unterlag.

Die kontinuierliche Überwachung der Emissionen organischer Stoffe aus Flugzeugtriebwerken in Triebwerkstandlaufeinrichtungen wurde im Rahmen dieser Arbeit ebenso untersucht. Hierzu stand für einen kurzen Zeitraum ein optisches Meßsystem zur Verfügung. Die Einsatzmöglichkeit eines solchen Meßsystemes konnte jedoch nicht befriedigend getestet werden, da das zur Verfügung gestellte Gerät nur für einen sehr eingeschränkten Komponentenumfang ausgelegt war und diese Komponenten zudem vom Hersteller nicht kalibriert waren (siehe Abschn. 16). Die Untersuchungen wurden allerdings nicht weiter intensiviert da in einer kontinuierlichen Überwachung von Triebwerkstandlaufeinrichtungen keine Notwendigkeit gesehen wird.

Neben der weitgehenden qualitativen und quantitativen Aufklärung organisch-chemischer Verbindungen im Abgas von Flugzeugtriebwerken wurden bestimmte Verbindungen und Verbindungsgruppen diskret untersucht. Hierbei handelte es sich um polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), Aldehyde, Ketone und polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane (PDCDD/F). Eine lastabhängige Beprobung war für diese Stoffe, bedingt durch die erforderlichen Probenahmezeiten nicht möglich. Während die Emissionskonzentrationen für die PAH und PCDD/F eher als unbedeutend einzustufen sind, wurden beispielsweise für Formaldehyd Massenkonzentrationen zwischen ca. 0,1 und 1,9 mg/m³ im Abgas der Triebwerkstandlaufeinrichtung gemessen.

Eine Reihe von Abgasbestandteilen wie Stickstoffoxide, Kohlenmonoxid, Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) wurden mit Hilfe kontinuierlich registrierender Meßeinrichtungen gemessen. Die Meßwerte wurden für den Lastzustand „Take Off“ -als einzig vergleichbarem Zustand- mit den in der ICAO-Datenbank angegebenen Werten verglichen. Hierbei zeigte sich, daß beim Vergleich größerer Meßwertkollektive mit den Werten der ICAO-Datenbank die gemessenen Werte für VOC und CO geringfügig über denen der ICAO-Datenbank liegen. Für NO liegen die Meßwerte für alle gemessenen Triebwerkstypen signifikant unter den Werten der ICAO-Datenbank. Um auch eine direkte Vergleichbarkeit der übrigen Lastzustände mit denen der ICAO-Datenbank herbeizuführen wäre es empfehlenswert, die verwendeten Begriffe in Abhängigkeit von den zugehörenden Power-Settings zu standardisieren.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank -First Edition **1995**- Doc 9646-AN/943, International Civil Aviation Organization, Montreal, Quebec, Canada sowie
Upgrade von **1997**

[2] Beier, K., Nachweis von Spurengasen und unverbrannten Kohlenwasserstoffen aus Flugzeugemissionen im Nahbereich von Flughäfen, DLR Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Bericht IB 552-91/13, **1991**

[3] Konzeptstudie zur Umweltsituation des Rhein-Main-Flughafens Frankfurt/M im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten, G. Weyrauther, TÜV Rheinland e.V., Köln, Niederlassung Frankfurt/M, **1992**/**1993**

[4] C.W.Spicer et al Chemical Composition of Exhaust from Aircraft Turbine Engine; Journal of Engeneering for Gas Turbines and Power, 114 (**1992**) 111-117

[5] CH. Schlatter, St. Scherer, H. Rothweiler, Emissionen eines PW 4060 Flugzeugtriebwerkes, Institut für Toxikologie der ETH Zürich, Datum des Aufsatzes nicht bekannt

[8] Richtline VDI 2066, -Messen von Partikeln-, Blatt 1 - 7, 0kt.**1975** bis Aug. **1993**

[9] ISO 9096 -Stationary source emissions - Determination of concentration and mass flow rate of particulate material in gas-carrying ducts- Manual gravimetric method, First edition 15.6.**1992**, Ref.No. ISO 9096:1992

[10] VDI 2448 - Planung von stichprobenartigen Emissionsmessungen an geführten Quellen, Blatt 1, April **1992**

[11] VDI 4200, Messen von Emissionen an geführten Quellen,Vorentwurf Stand Juni **1998**, (Gründruck erscheint im Nov. 1998)

[12] Eickhoff et al. Die Notwendigkeit der isokin. Probeentnahme von dampf- und gasförmigen Emissionen, Staub -Reinh. Luft 40 (**1983**) Nr. 3, S. 105

[13] Eickhoff, W./ Rühl, H.J., Ermittlung repräsentativer Meßpunkte in Abgasquerschnitten, Wasser, Luft und Boden WLB (**1994**) Nr.1-2, S. 39

[14] VDI 2066 Bl.1, -Messen von Partikeln- Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung, Übersicht, Okt**. 1975** und ISO 9096 s.Lit.Stelle 9

[15] Erste Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft-TA Luft vom 27.2.**1986** (GMBl. S.95)

[16] Jahresbericht 1995 des Flughafens München, Flughafen München GmbH

[17] Betriebsbeschreibung der DLH-Technik AG FRA WE8 vom 5.6.**1997**

[18] Klee, Ulrich, jp airline-fleet, The original yearly fleet-list reference book, Bucher & Co, Publikationen, Edition **1998**/**1999**

[19] Die genannten Schubwerte beziehen sich auf den “model Spec. Thrust” (FAA-Nameplate-Thrust). Dies sind Idealwerte, die z.B. Wirbelverluste, Verluste im Schubumkehrer, innerhalb der Cowling-Kanäle usw. nicht berücksichtigen. In der Praxis werden diese Werte nicht erreicht. Sie liegen etwa 160 lb unter den genannten Werten.

[20] VDI 2066 Bl. 2, Messen von Patikeln; Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung; Filterkopfgeräte, Aug. **1993**

[21] Schriftenreihe des LAI, Bd. 7, Fachliche Erläuterungen zur: Bundeseinheitlichen Praxis bei der Überwachung der Verbrennungsbedingungen an Abfallverbrennungsanlagen nach 17.BImSchV, Länderausschuß für Immissionsschutz, Erich Schmidt Verlag, April **1994**, Seite 23

[22] Lützke, K. UB Media Immissionsschutz -Datenbank, Kapitel Emissionsmessung

[23] S.A. Stumpf, W.S. Blazowski, Detailed Investigations of Organic Compound Emissions from Aircraft Gas Turbine Engines, Air Force Wright Aeronautical Laboratories (AFSC), International Conference on the Sensing of environmental pollutants - Las Vegas, Nevada, **1975**

[24] VDI 2457 Bl. 2 Probenahme durch Absorption in tiefkaltem Lösemittel (2-(2-Methoxyethoxy)ethanol, Methyldiglykol), 12/**1996**

[25] C.W. Spicer, M.W. Holdren, T.F.Lygn, R.M.Riggin, Composition and Photochemical Reactivity of Turbine Engine Exhaust, Battelle Columbus Laboratories, Columbus, Ohio, **1984**

[26] L. Kenneth et. al., Impact of Aircraft Emissions on Air Quality in the Vicinity of Airport, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, Offic of Environment and Energy under Interagency Agreement, DTFAOI-83-Y-10656, **1984**

[27] HLfU-eigene Untersuchungen

[28] CH. Schlatter, St. Scherer, H. Rothweiler, Emissionen eines PE 4060 Flugzeugtriebwerkes, Institut für Toxikologie der ETH Zürich, Datum des Aufsatzes nicht bekannt

[29] HLfU-eigene Untersuchungen

[30] A. Figge, W.Rabel, A.Wieck, Adsorptionsmittel zur Anreicherung von organischen Luftinhaltsstoffen, Fresenius Z.Anal.Chem. (**1987**); 261-278

[31] Wieck, A., Auswahl von Adsorbentien zur Anreicherung organischer Spurenkomponenten aus der Luft, Hamburg **1984**, FH Hamburg, FB Maschinenbau und Chemieingenieurwesen, Diplomarbeit

[32] R.G. Melcher et al., Spezialized Sorbents, Derivatization, and Desorption Techniques for the Collection and Determination of Trace Chemicals in Workplace Atmosphere, Michigan Division Analytical Laboratories, American Chemical Society, **1981**

[33] HLfU-eigene Untersuchungen

[34] A. Figge, W.Rabel, A.Wieck, Adsorptionsmittel zur Anreicherung von organischen Luftinhaltsstoffen, Fresenius Z.Anal.Chem. (**1987**); 261-278

[35] Firma G.Breitfuß, MPNE - Mikroprozessorgesteuerte Probenahme für Emissionsmessungen an Rauchgaskanälen nach VDI 2066 , Users Manual, **1992**,

[36] Wieck, A., Auswahl von Adsorbentien zur Anreicherung organischer Spurenkomponenten aus der Luft, Hamburg **1984**, FH Hamburg, FB Maschinenbau und Chemieingenieurwesen, Diplomarbeit

[37] Katalog der Firma Supelco - Chromatographie-Produkte **1997**

[38] VDI 3481, Bl. 2 (E) - Messung gasförmiger Emissionen; Bestimmung des durch Adsorption an Kieselgel erfaßbaren organisch gebundenen Kohlenstoffs in Abgasen, Nov. **1996**

[39] VDI 2457, Bl .1 - Messen gasförmiger Emissionen; Gaschromatographische Bestimmung organischer Verbindungen - Grundlagen, Nov. **1997**

[40] Barber, T. ,
The Use of unbonded Silica for the rapid Seperation of Additives from complex Mixtures
CIBA-GEIGY Corporation , Ardsley , NY , 10502

[41] Ciupe, R. , Spangenberg, J. , Meyer, T. , Wild, G. ,
Festphasenextraktionstrennsystem zur gaschromatographischen Bestimmung von PAK in Mineralöl
GIT Fachzeitschrift Labor , 825-829 , **1994**

[42] Kicinski, H. G. ,
Festphasenextraktion zur Probenvorbereitung und Clean up
CLB Chemie im Labor und Biotechnik , 47 , 542-548 , **1996**

[43] Kicinski, H. G. , Adamek, S. , Kettrup, A. ,
Trace Enrichment and HPLC Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Samples using Solid Phase Extraction in Connection with UV/VIS Diode-Array and Fluorescence Detection

Chromatographia , Vol. , 203-208, **1989**

[44] Schlatter, C. , Scherer, S. , Rothweiler, H. ,
Emissionen eines PW4060 Flugzeugtriebwerks
Studie der Gruppe für Luftanalytik am Institut für Toxikologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule und der Universität Zürich

[45] Van Horne, K. C.,
Handbook: Sorbent Extraction Technology
Analytichem International , **1990**

[46] DIN EN 1948 Bl. 1-3, Bestimmung der Massenkonzentration von PCDD/F Blatt 1, Mai. **1997**

[47] VDI 3873, Bl. 1,Messen von Emissionen; Messen von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) an stationären industriellen Anlagen; Verdünnungsmethode; Gaschromatographische Bestimmung Nov. **1992**

[48] Messung gasförmiger Emissionen, Messen aliphatischer und aromatischer Aldehyde und Ketone nach dem DNPH-Verfahren, Acetonitril-Verfahren, Richtlinien-Vorentwurf VDI 3862 Blatt 2, **1992**

[49] Messung gasförmiger Emissionen, Messen aliphatischer und aromatischer Aldehyde und Ketone nach dem DNPH-Verfahren, Acetonitril-Verfahren, Richtlinien-Vorentwurf VDI 3862 Blatt 2, **1992**

[50] Liste polycyclischer aromatischer Verbindungen, gemäß US Environmental Protecting Agency (EPA) EPA-Method 610

[51] Huster/ Pucher; Schadstoffemission, Vorschriften und Schadstoffermittlung,MTU-Schrift, LTH-Triebwerkstechnologie, **1992**