

Bericht über die Ergänzungsprüfung einer Gesamtkohlenstoff-Emissionsmeßeinrichtung

Auftraggeber:	Testa GmbH 80797 München
Meßgerät:	FID 123 / FID 123 I / FID 3001 W
Anlagenart:	Abfallverbrennungsanlage nach 17.BImSchV
Datum des Auftrages:	11.08.1995
Untersuchungszeitraum:	August bis November 1995
Sachbearbeiter:	Dr. Waeber Hr. Ertl
Auftrags-Nr.:	2401 4741
Seiten:	34
Anlagen:	2, zzgl. Betriebsanleitungen

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung der Prüfergebnisse.....	3
2. Zweck der Untersuchung.....	7
3. Beschreibung der Meßeinrichtung.....	8
3.1 Gesamtaufbau.....	8
3.2 Beschreibung der Meßeinrichtung FID 123 / FID 123 I / FID 3001 W.....	8
3.3 Aufbau und Arbeitsweise des Meßgerätes bzw. der Meßanlage.....	9
3.4 Bedienung.....	9
3.5 Spezifikation und technische Daten.....	9
4. Durchführung der Untersuchungen.....	10
5. Ergebnisse der Untersuchungen / Vergleich mit den Mindestanforderungen	12
5.1 Allgemeine Anforderungen.....	12
5.2 Anforderungen an Meßgeräte für gasförmige Luftverunreinigungen.....	18
6. Stellungnahme.....	26
Anlage 1.....	29
Anlage 2.....	34

1. Zusammenfassung der Prüfergebnisse

<i>Ziffer im Test- bericht</i>	<i>Ziffer in den Richt- linien</i>	<i>Mindestanford. lt. GMBI vom 01.03.1990</i>	<i>Testergebnisse</i>	<i>Mindestan- forderungen eingehalten</i>
			FID 123 Nr.: 1 / 2	
5.1.1	1.1.1	Durchführung nach VDI 2449, DIN ISO 6879 und DIN 43745	Durchführung erfolgte entsprechend	ja
5.1.2	1.1.2	Dauertest min. 3 Monate	mehr als 3 Monate Dauertest + Zusatz-Labortest	ja
5.1.3	1.1.3	Eichfunktion/ Analysefunktion	linear; ≤ 0,5% v. MBE (1) ≤ 0,6% v. MBE (2)	ja
5.1.4	1.1.4	Justierung; Siche- rung gegen unbeab- sichtigtes und un- befugtes Verstellen	abschließbarer Meßcontainer	ja
5.1.5	1.1.5	Lage von Nullpunkt und Referenzpunkt	Meßwertausgang 4-20 mA Prüfgas frei wählbar	ja
5.1.6	1.1.6	Meßbereich	0 - 25 mgC/m ³	ja
5.1.7	1.1.7	Meßwertausgang	vorhanden	ja

<i>Ziffer im Test- bericht</i>	<i>Ziffer in den Richt- linien</i>	<i>Mindestanford. lt. GMBI vom 01.03.1990</i>	<i>Testergebnisse</i>	<i>Mindestan- forderungen eingehalten</i>
			FID 123 Nr. 1 / 2	
5.1.8	1.1.8	Statussignale	vorhanden	ja
5.1.9	1.1.9	Verfügbarkeit mindestens 90%,	98,9 % (1) 98,9 % (2)	ja
5.1.10	1.1.10	Wartungsintervall	1 Woche	ja
5.1.11	1.1.11	Reproduzierbarkeit aus Doppelbest.	siehe 5.2.10	ja
5.1.12	1.1.12	Typprüfung mit vollständiger Meßeinrichtung	mit 2 vollstän- digen Meßeinrich- tungen geprüft	ja
5.1.13	1.1.13	Nenngebrauchsbed.	siehe Text	ja
5.2.1	1.4.1.1	Nachweisgrenze: < 2% des 1,5xTGW	0,20 % (1) 0,15 % (2)	ja
5.2.2	1.4.1.2	zulässiger Umge- bungstemperatur- bereich +5°C bis +35°C	geprüfter Bereich: +5°C bis +35/45°C	ja
5.2.3	1.4.1.3	Umgebungstemp. Änderung der Nullpunktsanzeige: <±2% des 1,5xTGW pro 10 K Diff.	≤ 0,5 % (1) ≤ 1,1 % (2)	ja

<i>Ziffer im Test- bericht</i>	<i>Ziffer in den Richt- linien</i>	<i>Mindestanford. lt. GMBI vom 01.03.1990</i>	<i>Testergebnisse</i>	<i>Mindestan- forderungen eingehalten</i>
			FID 123 Nr.: 1 / 2	
5.2.4	1.4.1.4	Umgebungstemp. - Änderung der Empfindlichkeits- anzeige: < 3% vom Sollwert pro 10 K Diff.	$\leq 3,4 \%$ (1) $\leq 3,3 \%$ (2)	ja
5.2.5	1.4.1.5	Querempfindlichkeit < $\pm 4\%$ des 1,5xTGW	$\leq 1,0 \%$ (1) $\leq 1,9 \%$ (2)	ja
5.2.6	1.4.1.6	Einstellzeit (90 %-Zeit) < 200 Sekunden	10 s (1) 8 s (2)	ja
5.2.7	1.4.1.7	zeitl. Drift des Nullpunktes < $\pm 2\%$ des 1,5xTGW	$\leq 0,5 \%$ (1) $\leq 0,5 \%$ (2)	ja
5.2.8	1.4.1.8	zeitliche Drift der Empfindl. < $\pm 4\%$ des Sollwertes	$\leq 0,5 \%$ (1) $\leq 0,5 \%$ (2)	ja
5.2.9	1.4.1.9	Probenahme und Meßgas- aufbereitung	keine Beeinflus- sung der Meßgas- zusammensetzung	ja

<i>Ziffer im Test- bericht</i>	<i>Ziffer in den Richt- linien</i>	<i>Mindestanford. lt. GMBI vom 01.03.1990</i>	<i>Testergebnisse</i>	<i>Mindestan- forderungen eingehalten</i>
			FID 123 Nr.: 1 / 2	
5.2.10	1.4.1.10	Reproduzierbarkeit 1,5xTGW: > 30	(Dauertest 91/92) Klasse 1: 40 2: 58 3: 39	ja
			(zzgl. neue Werte) Klasse 1: 126 2: 103 3: 60	ja
5.2.11	1.4.2	Responsefaktoren Standardabw. <15%	14,6 % (1) 13,9 % (2)	ja

2. Zweck der Untersuchung

Die Firma Testa GmbH, München beauftragte die TÜV Umwelttechnik GmbH, Unternehmensgruppe TÜV Bayern Sachsen mit der Durchführung der Ergänzungstypprüfung einer Meßeinrichtung für Gesamtkohlenstoff mit dem Analysator FID 123. Die Untersuchungen ergänzen unseren Bericht Nr. 152 9455 vom 6.8.1992.

Die Typprüfung sollte entsprechend den "Richtlinien für die Eignungsprüfung, den Einbau, die Kalibrierung und die Wartung von Meßeinrichtungen für kontinuierliche Emissionsmessungen" - Rundschreiben des BMU vom 01.03.1990; IG I 2 - 556 134/4 - durchgeführt werden.

Mit den Untersuchungen sollte der Nachweis für den Einsatz des FID 123 nach den Anforderungen gemäß der 17. BImSchV erbracht werden. Die Prüfung 1992 war an einer Abfallverbrennungsanlage mit dem kleinsten geprüften Meßbereich 0-50 mg/m³ durchgeführt worden. Die Bewertung dieser Ergebnisse nach den strengeren Anforderungen der 17. BImSchV machten einige Änderungen an der Meßeinrichtung notwendig.

Die Nachprüfung beschränkte sich auf diejenigen Anforderungen, bei welchen Auswirkungen durch den verkleinerten Meßbereich bzw. durch die Verbesserungen zu erwarten oder nicht auszuschließen waren. Bzgl. aller anderen Anforderungen wurden die Ergebnisse der Prüfung von 1992 übernommen, soweit nötig neu bewertet und den Anforderungen nach 17. BImSchV gegenübergestellt.

Zusätzlich zum Modell FID 123 liefert der Hersteller die Meßeinrichtung auch in den folgenden Ausführungen:

- FID 123 I (Modell mit Injektor statt Bypass-Pumpe)
- FID 3001 W (Wandanbau-Analysator).

Im Zuge der Untersuchungen sollte auch die Übertragbarkeit der Prüfergebnisse auf diese Modellausführungen festgestellt werden.

Die Nachprüfung umfaßte somit die folgenden Untersuchungen:

- Bauteilprüfung
- Bestimmung der Nachweisgrenze
- Querempfindlichkeit gegenüber Sauerstoff
- Umgebungstemperatur-Abhängigkeit
- Dauerbetriebsverhalten, zeitliche Drift
- zusätzliche Bestimmung der Reproduzierbarkeit

3. Beschreibung der Meßeinrichtung

3.1 Gesamtaufbau

Die modifizierte Meßeinrichtung FID 123, sowie die Modellvarianten FID 123 I und FID 3001 W weisen gegenüber der bereits vom BMU als geeignet bekanntgegebenen Meßeinrichtung die folgenden gemeinsamen Änderungen auf:

- Meßbereich 0-25 mgC/m³
- Brennluftversorgung über Brennluftgenerator
- Brennluftfluß neu 40 l/h
- Optimierung der Temperaturkompensation
- wahlweise pneumatische oder elektronische Vakuumregelung
- zusätzlicher beheizter Feinfilter

3.2 Beschreibung der Meßeinrichtung FID 123 / FID 123 I / FID 3001 W

FID 123:

Der Analysator entspricht in seinen Bauteilen der bereits eignungsgeprüften Ausführung, wobei folgende Veränderungen vorgenommen wurden:

- Verkleinerung des Meßbereiches von 0-50 auf 0-25 mg/m³
- Vergrößerung des Brennluft-Flusses von 30 auf 40 l/h
- Temperaturkompensation: Anpassung des Regelkreises auf der Temperatur-Regelkarte für FID-Block und beheizte Pumpe
- wahlweise pneumatische oder elektronische Vakuumregelung

Die Meßeinrichtung wurde darüberhinaus mit einer Brennluftversorgung über einen separaten Brennluftgenerator ergänzt (Air Purifier CAP 10, Fa.Headline: Prinzip der katalytischen Verbrennung, garantierter Restgehalt an THC < 800 ppb); alternativ kann Synthetische Luft der Reinheitsklasse 5.0 zu Einsatz kommen.

Zur Verlängerung der Standzeit wurde schließlich ein zusätzlicher beheizter Feinfilter, Porenweite 1-2µ (Kat.Nr. 1035) dem Probeneingang vorgeschaltet.

FID 123 I:

Dies Modell unterscheidet sich vom Typ FID 123 durch den Injektor statt der Bypass-Pumpe.

Die Bypass-Pumpe entfällt bei diesem Modell, es befinden sich keine bewegten Teile im Probenweg. Ggfs. Kann jedoch zur Probenförderung eine Meßgaspumpe druckseitig zwischengeschaltet werden (T-Stück).

FID 3001 W:

Ausführung des FID 123 I als Wandanbau-Gerät mit identischen Baugruppen, jedoch in veränderter Anordnung, so daß die einzelnen Baugruppen als eigene Einschübe in den Analysator integriert sind. Weiterhin erfolgt die Eich- und Nullgas-Zuführung vor dem Feinfilter 1035.

(Fließpläne in den beigefügten Bedienungsanleitungen)

3.3 Aufbau und Arbeitsweise des Meßgerätes bzw. der Meßanlage

Der FID 123 saugt das Meßgas über eine beheizte Pumpe an. Drucksetig zweigt kapillarengesteuert oder über ein Sintermetallfilter der FID-Probengasstrom ab, der mit einer weiteren Pumpe durch die FID-Meßzelle gesaugt wird; diese Pumpe fördert auch das Brenngas (Wasserstoff) und brennluft über Kapillaren in die Meßzelle. Der Meßgas-Überschuß wird im Bypass ins Freie abgeleitet.

Null- und Eichgas kann über Magnetventile vor der beheizten Meßgaspumpe aufgeschaltet werden; der Überschuß wird dabei über die Meßgasleitung in den Kamin zurückgeleitet. Bei korrosiven Abgasen (Z.B. AVA) ist jedoch eine Eichgas-Zuleitung über die beheizte Sonde notwendig, wie es auch im Dauertest 91/92 erfolgt ist.

Der Aufbau der gesamten Meßeinrichtung für die Untersuchungen am Abgaskanal an der Abfallverbrennungsanlage ist im Prüfbericht vom 6.8.1992, Nr. 152 9455 beschrieben.

3.4 Bedienung

Der FID 123, FID 123 I und der FID 3301 W werden ausschließlich von der Frontseite her bedient und überwacht, bei FID 123 und FID 123 I befinden sich die Versorgungsanschlüsse auf der Rückseite, beim Wandgerät FID 3001 W auf der Geräteunter- bzw. oberseite.

Die entsprechenden Bedienungsanleitungen sind als Anlage beigefügt.

3.5 Spezifikation und technische Daten (nach Angaben des Geräteherstellers)

Meßbereiche:	maximal 6 Meßbereiche, geprüfter Meßbereich: 0 - 25 mgC/m ³ (autom. Meßbereichsumschaltung möglich)
Meßausgang: Anzeige:	Strom 0/4-20 mA, 0/2-10 V analog, 0-100 %
Nullpunktsdrift: Reproduzierbarkeits- abweichung: Umgebungstemperatur Ansprechzeit	<±1% der Meßspanne des kleinsten Meßbereiches in 24 h <±1 % der Meßspanne max 45 °C 1 s ab Geräteingang
Gewicht	ca. 15 kg (FID 3001 W: 35 kg)
Netzspannung Leistungsaufnahme:	230 V, 50 Hz max. 600 W ohne Probenleitung
Brenngasverbrauch	Wasserstoff 5.0: 30-40 ml/min Wasserstoff/Helium : 80-100 ml/min
Brennluft	Synthetische Luft 5.0 oder entsprechend nachgereinigte Luft: 0,4 l/min
Probegasdurchfluß Eichgasverbrauch	ca. 2 l/min 2-3 l/min (FID 3001 W: 0,25 - 0,5 l/min)
Flammenkontrolle Flammenzündung bei Netzausfall	über Thermoelement, Anzeige über Lampe automatisch Flamme aus, Wasserstoff-Abschaltung

4. Durchführung der Untersuchungen

Im Zuge der Ergänzungsuntersuchung wurden die folgenden wichtigen Kenngrößen ermittelt:

- Dauerbetriebsverhalten
- Nachweisgrenze*
- Analysenfunktion
- Standardabweichung (Bestimmung der Reproduzierbarkeit)
- Nullpunkt- und Empfindlichkeitsdrift*
- Querempfindlichkeiten gegenüber Sauerstoff*
- Einfluß von Änderungen der Umgebungstemperatur*

Bei den mit * gekennzeichneten Prüfpunkten ergaben sich mit den Ergebnissen der Prüfung 91/92 bei Umrechnen auf die Anforderungen für den Einsatz an Anlagen nach 17.BImSchV eine Überschreitung der geforderten Werte.

Eine Beschränkung der Nachprüfungen auf diese Laboruntersuchungen ist ausreichend, da bei der Bewertung der Ergebnisse der Prüfung 91/92 als Haupteinfluß-kriterium auf die erzielten Kenngrößen die Qualität der Brennluft identifiziert wurde. Der Einsatz des Brennluftgenerators ist somit die entscheidende Veränderung gegenüber der bereits eignungsgeprüften Meßeinrichtung. Einflüsse aus der Art des Meßgases spielen dabei nur eine untergeordnete Rolle, sodaß ein weiterer Dauertest an einer Abfallverbrennungsanlage nicht nötig wurde.

Bei der Bestimmung der Reproduzierbarkeit ergab sich bei ausschließlicher Auswertung des Wertekontingentes aus dem Bericht 91/92 eine leichte Unterschreitung des Wertes 30, allerdings bei dann erheblich zu wenigen Wertepaaren in den neu zu bildenden Konzentrationsklassen für eine statistisch gesicherte Aussage.

Darauf wurde eine neue Auswertung des Dauertestes 91/92 vorgenommen, in die auch die alten Wertepaare (bis zum neuen Meßbereichsendwert) eingeflossen sind.

Informativ wurde auch der Labortest ausgewertet, wodurch die durchgeführten Verbesserungen an der Meßeinrichtung deutlich werden.

Die Responsefaktoren wurden seinerzeit in mehreren Meßbereichen überprüft und ergaben in allen Fällen identische Werte, eine zusätzliche Überprüfung konnte somit entfallen.

5. Ergebnisse der Untersuchungen / Vergleich mit den Mindestanforderungen

5.1 Allgemeine Anforderungen

5.1.1 Begriffsbestimmungen

Anforderung 1.1.1

Die Eignungsprüfung ist unter Beachtung der Begriffsbestimmungen der Richtlinie VDI 2449, Blatt 1 vom Februar 1995, der Norm DIN ISO 6879 vom Januar 1984 und der Norm DIN 43 745 vom Februar 1975 durchzuführen.

Die Eignungsprüfung wurde unter Beachtung der **Begriffsbestimmungen** der VDI-Richtlinie 2449, Blatt 1 vom Februar 1975, der Norm DIN ISO 6879 vom Jan. 1984 und der Norm DIN 43 745 vom Feb. 1975 durchgeführt.

Bewertung: erfüllt

5.1.2 Dauertest

Anforderung 1.1.2

Die Einhaltung der Mindestanforderungen soll bei der Eignungsprüfung während eines wenigstens dreimonatigen Dauertests nachgewiesen werden.

Die Untersuchungen waren seinerzeit am Reingaskanal einer Müllverbrennungsanlage (Haus- und Gewerbemüll) über einen Zeitraum von mehr als 5 Monaten durchgeführt worden. Da die nun durchgeführten Änderungen am Meßsystem keinen negativen Einfluß durch eine reale Abgasmatrix erwarten lassen, wurden die Analysengeräte über einen verkürzten Zeitraum von ca. 1 1/2 Monaten im Labor betrieben.

Während der Zeit des Dauertestes traten an den Meßeinrichtungen keine Störungen auf. Die Meßeinrichtungen wurden arbeitstäglich mit Null- und Prüfgas beaufschlagt, über den Versuchszeitraum mußten keine Nachstellungen vorgenommen werden. Die im wöchentlichen Abstand aufgenommenen Werte wiesen keine erkennbaren Driften (d.h. unterhalb der Auflösung der Registriereinrichtung) auf.

Bewertung: erfüllt

5.1.3 Eich- und Analysenfunktion

Anforderung 1.1.3

Bei der Eignungsprüfung soll der Zusammenhang zwischen der Geräteanzeige und dem Sollwert des Meßobjektes ermittelt werden.

Die Analysenfunktion ist für Gesamtkohlenstoff-Gehalt im Abgas einer Abfallverbrennungsanlagen nicht bestimmbar, das z.Z. kein Bezugsverfahren für diesen Anwendungsfall bekannt ist. Die Eichfunktion stellt den Zusammenhang zwischen der Geräteanzeige und der vorgegebenen Massenkonzentration des Meßobjektes dar; ihre mathematische Umkehr ergibt die Analysenfunktion.

Die Linearität der Eichfunktion (Geräte Kennlinie) wurde durch Aufgabe abgestufter Prüfgaskonzentrationen auf den Analysator ermittelt. Hierzu wurde mit einer Gasmischeinrichtung Prüfgas mit bekanntem Gehalt an Propan in synthetischer Luft in definierten Volumenverhältnissen mit Synthetischer Luft gemischt und der Meßeinrichtung aufgegeben. Eine Gegenüberstellung der Sollwerte zu den Anzeigewerten ist in im Folgenden aufgeführt.

Überprüfung der Linearität (neue Prüfung):

Sollwert	Anzeige.....Abweichung	Anzeige	Abweichung
	FID 1	FID 2	
mA	mA.....% v. MBE	mA	% v. MBE
4,00	4,00..... 0,0	4,00	0,0
6,97	6,96..... -0,1	6,95	-0,1
9,94	9,92..... -0,1	9,91	-0,2
12,91	12,88..... -0,2	12,87	-0,3
15,88	15,87..... -0,1	15,87	-0,1
18,85	18,85..... 0,0	18,85	0,0

Bewertung: erfüllt

5.1.4 Sicherung gegen unbefugtes und unbeabsichtigtes Verstellen der Justierung

Anforderung 1.1.4

Die Justierung der Meßeinrichtungen soll im Betrieb gegen unbefugtes oder unbeabsichtigtes Verstellen gesichert werden können.

Unbeabsichtigtes Verstellen wird durch feststellbare bzw. gerastete Einstellknöpfe verhindert.

Gegen unbefugtes Verstellen kann die Meßeinrichtung in einem abschließbaren Geräteschrank untergebracht werden.

Bewertung: erfüllt

5.1.5 Lage des Nullpunktes ("Lebender Nullpunkt") und des Referenzpunktes

Anforderung 1.1.5

Die Lage des Nullpunktes der Geräteanzeige soll bei etwa 10% oder 20%, die Lage des Referenzpunktes bei etwa 70% des Vollausschlages liegen.

Bei einem Vollausschlag von 20 mA liegt der Nullpunkt bei 2 oder 4 mA. Durch Wahl einer geeigneten Prüfgaskonzentration kann der Referenzpunkt auf etwa 70% des Vollausschlages gelegt werden.

Bewertung: erfüllt

5.1.6 Meßbereich

Anforderung 1.1.6

Die Meßeinrichtungen sollen so beschaffen sein, daß der Anzeigebereich auf die jeweilige Meßaufgabe abgestimmt werden kann.

Die Ergänzungsprüfung wurde im Meßbereich 0-25 mgC/m³ durchgeführt, bei der Bewertung der Anforderungen wurden die Ergebnisse auf das 1,5-fache des Grenzwertes des Tagesmittelwertes bezogen (15 mg/m³).

Bewertung: erfüllt

5.1.7 Elektrischer Meßwertausgang

Anforderung 1.1.7

Die Meßeinrichtungen sollen einen Meßwertausgang besitzen, an den ein zusätzliches Anzeige- oder Registriergerät angeschlossen werden kann.

An das Meßgerät können zusätzliche Registriergeräte angeschlossen werden.

Bewertung: erfüllt

5.1.8 Statussignale

Anforderung 1.1.8

Die Meßeinrichtungen sollen in der Lage sein, einem nachgeschalteten Auswertesystem ihren jeweiligen Betriebszustand (Betriebsbereitschaft, Wartung, Störung) über Statussignale mitzuteilen.

Neben dem Status Gerät "ein/aus" ist eine Flammenkontrolle als Wechselkontakt vorhanden.

Ein eigener Wartungsschalter kann bei Bedarf in die Meßeinrichtung integriert werden.

Bewertung: erfüllt

5.1.9 Verfügbarkeit

Anforderung 1.1.9

Die Verfügbarkeit der Meßeinrichtungen soll im Dauereinsatz mindestens 90% betragen und in der Eignungsprüfung 95% erreichen. (Die Verfügbarkeit beschreibt den Zeitanteil, während dessen verwertbare Meßergebnisse zur Beurteilung des Emissionsverhaltens einer Anlage anfallen).

Die Verfügbarkeit wurde im Zuge des Dauertestes an der Abfallverbrennungsanlage 1991-1992 zu 98,7 bzw. 98,9 % bestimmt.

Bewertung: erfüllt

5.1.10 Wartungsintervall

Anforderung 1.1.10

Das Wartungsintervall der Meßeinrichtungen ist zu ermitteln und anzugeben.

Das Wartungsintervall wurde im Zuge des Dauertestes an der Abfallverbrennungsanlage 1991-1992 bestimmt und beträgt aufgrund der damals festgestellten zeitlichen Driften 1 Woche. Mit den Ergebnissen des Labor-Dauertests kann das Wartungsintervall bzgl. der zeitlichen Driften nun auf bis zu 4 Wochen ausgedehnt werden (5.2.7/8).

Das Wartungsintervall bezüglich der anderen Arbeiten, wie z.B. Reinigung der Filter, muß nach den Anforderungen der jeweiligen Anlage festgelegt werden.

Bewertung: erfüllt

5.1.11 ReproduzierbarkeitAnforderung 1.1.11

Die Reproduzierbarkeit $R = x/U$ (x Meßbereichsendwert; U Unsicherheitsbereich gemäß VDI 2449, Blatt 1) ist aus Doppelbestimmungen zu ermitteln. Hierzu sind Messungen mit zwei gleichartigen Meßeinrichtungen Meßort durchzuführen.

Die Standardabweichung s_D berechnet sich nach der folgenden Gleichung:

$$s_D = \pm \sqrt{\frac{\sum (x_1 - x_2)^2}{2n}}$$

mit: $x_{1,2}$ Halbstundenmittelwerte
 n Zahl der Doppelbestimmungen

Multiplikation der Standardabweichung s_D mit dem Student-Faktor t

ergibt den **Unsicherheitsbereich** $U = s_D * t$

Die Reproduzierbarkeit R berechnet sich nach der Gleichung

$$R = \frac{\text{Meßbereichsendwert}}{U}$$

Das Datenmaterial des Dauertests 1991/92 mußte neu ausgewertet werden, da mit den ursprünglichen Datensätzen nicht ausreichend viele Meßwertepaare für die neu zu bildenden Konzentrationsklassen zur Verfügung standen.

Zusätzlich wurde informativ auch der Zeitraum des Labor-Dauertests ausgewertet; wie schon im Dauertest 1991/92 wurde auch hier über einen Teil des Prüfzeitraumes ein Gemisch von organischen Stoffen in geringem Teilstrom der gemeinsamen Probenahmeleitung zudosiert.

In der Anlage 1 sind die Meßwertepaare zusammengestellt. Damit errechnen sich folgende Ergebnisse:

Meßbereich: 0 - 25 mg/m³; Datensätze aus dem Dauertest 1991/92

Konzentrationsklasse	n	s _p mg/m ³	U mg/m ³	R
1: 0 - 8,3 mg/m ³	150	0,192	0,379	40
2: 8,31 - 16,6 mg/m ³	100	0,131	0,259	58
3: 16,61 - 25 mg/m ³	30	0,191	0,383	39

Meßbereich: 0 - 25 mg/m³, Datensätze aus Labortest 1995

Konzentrationsklasse	n	s _p mg/m ³	U mg/m ³	R
1: 0 - 8,3 mg/m ³	43	0,060	0,119	126
2: 8,31 - 16,6 mg/m ³	55	0,073	0,145	103
3: 16,61 - 25 mg/m ³	34	0,126	0,252	60

Die Reproduzierbarkeit soll den Wert 30 nicht unterschreiten.

Bewertung: erfüllt

5.1.12 Typprüfung

Anforderung 1.1.12

Die Eignungsprüfung umfaßt die vollständige Meßeinrichtung einschließlich Probenahme, Probenaufbereitung und Datenaufzeichnung oder -ausgabe. Die Bedienungsanleitung des Herstellers ist in die Eignungsprüfung einzubeziehen.

Die Typprüfung und die Ergänzungsprüfung umfaßte die gesamte Meßeinrichtung einschließlich Probenahme, Probenaufbereitung und Registriereinrichtung; sie wurde mit zwei Meßeinrichtungen durchgeführt.

Die Bedienungsanleitung wurde auf die praktische Anwendbarkeit hin überprüft.

Bewertung: erfüllt

5.1.13 Nenngebrauchsbedingungen

Anforderung 1.1.13

Die Mindestanforderungen sollen unter den nachfolgend angeführten Nenngebrauchsbedingungen gemäß DIN 43 745 vom Februar 1975, Einsatzgruppe II eingehalten werden:

- a) Netzspannung
- b) Relative Luftfeuchtigkeit
- c) Gehalt der Luft an Flüssigwasser
- d) Schwingung

Für die Betriebslage sind die Toleranzgrenzen vom Hersteller festzulegen.

- zu a) Netzspannung: Abweichung der Meßsignale sind kleiner 1 % vom Meßbereichsendwert im Bereich von Netzspannungsschwankungen zwischen 200 und 235 V.
- zu b) Nach Angaben des Herstellers ist das Gerät unempfindlich gegen eine relative Luftfeuchtigkeit von < 98 %, leichte Betauung möglich.
- zu c) Das Gerät ist nicht vor Tropfwasser geschützt.
- zu d) Die bei den Untersuchungen an der Anlage aufgetretenen Schwingungen beeinflussten die Messung nicht.

Das Gerät ist stets in normaler Betriebslage zu montieren; nach Herstellerangaben ist eine Neigung bis 15° zulässig.

Bewertung: erfüllt

5.2 Anforderungen an Meßgeräte für gasförmige Luftverunreinigungen

5.2.1 Nachweisgrenze

Anforderung 1.4.1.1

Die Nachweisgrenze der Meßeinrichtungen soll 2% des empfindlichsten Anzeigebereiches nicht übersteigen (Meßeinrichtungen nach 17. BImSchV: 2 % von 15 mgC/m³).

Ihre Bestimmung erfolgte durch 30-malige Aufgabe von Nullpunktgas verteilt über den Zeitraum des Labor-Dauertests (neue Prüfung).

Die einzelnen Meßwerte sind in der Anlage .. zusammengestellt.

Über die Bestimmung der **Standardabweichung der Nullpunktanzeige**

$$S_D = \pm \sqrt{\frac{\sum (x_{0i} - x_0)^2}{n-1}}$$

mit x_{0i} = Meßwert bei Nullpunktgas-Aufgabe

x_0 = mittl. Leerwert

errechnet sich die **Nachweisgrenze x** zu

$$x_{95\%} = x_0 + t * s_{x_0} \quad (\text{gemäß VDI 2449 Bl. 1 vom Feb. 95} \\ 95\% \text{ vereinbarte Sicherheit})$$

$$x_{99\%} = x_0 + 3 * s_{x_0} \quad (\text{gemäß VDI 2449 Bl. 1 vom Okt. 70 und Feb. 95} \\ 99\% \text{ vereinbarte Sicherheit})$$

	FID 1	FID 2
n	30	30
x_0 (in mA)	3,996	3,986
s_{x0} (in mA)	0,0181	0,0161
$x_{95\%}$ (in mA)	4,026	4,014
$x_{95\%}$ (in mg/m ³)	0,05	0,04
$x_{95\%}$ (in % vom Bezugswert)	0,32	0,28
$x_{99\%}$ (in mA)	4,050	4,035
$x_{99\%}$ (in mg/m ³)	0,09	0,08
$x_{99\%}$ (in % vom Bezugswert)	0,57	0,50

Bewertung: erfüllt

5.2.2, 5.2.3 und 5.2.4 Umgebungstemperatur-Abhängigkeit des Nullpunktmeßsignals und der Empfindlichkeit

Anforderung 1.4.1.2

Der zulässige Umgebungstemperaturbereich beträgt +5 bis +35°C. Er sollte -10°C und +55°C entsprechend DIN 43 745 vom Februar 1975, Einsatzgruppe II erreichen.

Anforderung 1.4.1.3

Die Temperaturabhängigkeit der Nullpunktanzeige soll bei einer Änderung der Umgebungstemperatur um 10 K im zulässigen Temperaturbereich nicht mehr als $\pm 2\%$ des Anzeigebereiches betragen (Meßeinrichtungen nach 17. BlmSchV: $\pm 2\%$ von 15 mgC/m³). Eine Beeinflussung des Nullpunktes durch Änderungen der Temperatur des Meßgutes soll durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden.

Anforderung 1.4.1.4

Die Änderung der Referenzpunktanzeige, verursacht durch eine Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit, soll bei einer Änderung der Umgebungstemperatur um 10 K im zulässigen Temperaturbereich nicht mehr als $\pm 3\%$ des Sollwertes betragen. Eine Beeinflussung der Empfindlichkeit durch Änderungen der Temperatur des Meßgutes soll durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden.

Zur Untersuchung des Einflusses der Umgebungstemperatur auf die Meßgeräte wurden die Analytoren in einer Klimakammer installiert. Geprüft wurde im

Temperaturbereich von 5°C bis 35°C in Intervallen von 10 K, jeweils durch ca. 10-minütige Aufgabe von Nullpunktgas und Prüfgas mit einem Gehalt von 15,14 mgC/m³ in Synthetischer Luft.

Beginnend bei 25°C wurde die Temperatur auf 45°C erhöht, dann auf 5°C abgesenkt, und wieder auf 25°C zurückgebracht. Die Anpassungszeit an die neu eingestellte Temperatur betrug jeweils mind. 2 Stunden. Die Registriereinrichtungen waren außerhalb der Klimakammer aufgestellt.

Änderungen des Nullpunkt-Meßsignals und der Empfindlichkeit bei 10 K Temperaturänderung sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Änderung der Anzeige am Nullpunkt:

Änderung in % des Bezugswertes 15 mg/m³

Temperaturstufe	FID1	FID 2
25 °C - 35 °C	-0,5	-0,6
35 °C - 45 °C	-0,2	0,8
45 °C - 35°C	0,1	-0,9
35 °C- 25°C	0,4	0,1
25°C - 15 °C	0,2	0,6
15 °C - 5 °C	0,5	1,1
5 °C - 15 °C	-0,5	-0,7
15 °C - 25 °C	-0,4	-1,0

Änderung der Anzeige bei der Empfindlichkeit:

Änderung in % des Sollwertes

Temperaturstufe	FID1	FID 2
25 °C - 35 °C	-2,7	-2,8
35 °C - 45 °C	-2,7	-2,3
45 °C - 35°C	3,0	2,3
35 °C- 25°C	3,0	2,8
25°C - 15 °C	2,8	2,7
15 °C - 5 °C	2,3	2,6
5 °C - 15 °C	-3,0	-2,0
15 °C - 25 °C	-2,3	-3,0

Bewertung: erfüllt

5.2.5 Einflüsse durch QuerempfindlichkeitenAnforderung 1.4.1.5

Der Störeinfluß durch die Querempfindlichkeit gegenüber im Meßgut enthaltenen Begleitstoffen in den üblicherweise in Abgasen auftretenden Massenkonzentrationen soll insgesamt nicht mehr als $\pm 4\%$ des Anzeigebereiches betragen. Kann diese Forderung nicht eingehalten werden, soll der Einfluß der jeweiligen Störkomponente auf das Meßsignal durch geeignete Maßnahmen berücksichtigt werden.

Der Einfluß von Sauerstoff wurde durch Aufgabe des entsprechenden Prüfgasgemisches mit direkt auf die Meßeinrichtungen ermittelt.

Für die restlichen Störkomponenten wurden die Ergebnisse der Untersuchung von 1992 auf den Bezugswert von 15 mg/m^3 umgerechnet.

Die Herstellung der Gasgemische erfolgte mit Hilfe eines Gasteilers (SGD-XC5L der Firma STEC Inc.), wobei das Grundgas mit bekannter Konzentration der Meßkomponente mit einem Prüfgas mit bekanntem Gehalt an der Störkomponente in Stickstoff gemischt wurde.

Den Einfluß der Störstoffe auf den Null- und auf den Referenzpunkt, dargestellt als Abweichung vom Bezugswert, zeigt die folgende Tabelle:

Stoff	Konzentration	Einfluß auf			
		Nullpunkt		Empfindlichkeit	
		FID 1	FID 2	FID 1	FID 2
Kohlendioxid	15 Vol.%	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Stickstoffmonoxid	272 mg/m^3	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Stickstoffdioxid	45 mg/m^3	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Schwefeldioxid	1216 mg/m^3	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Ammoniak	229 mg/m^3	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Chlorwasserstoff	80 mg/m^3	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Wasserdampf	47 g/m^3	0,5	0,5	0,9	1,4
	133 g/m^3	0,6	0,7	1,3	2,1
Kohlenmonoxid	2 Vol.%	2,3	1,7		
	1 Vol.%			1,1	0,9
Sauerstoff	20,8 Vol.%	1,6	1,7	1,1	2,9
	10,4 Vol.%	0,6	0,7	<0,5	1,2

Bewertung: erfüllt

5.2.6 EinstellzeitAnforderung 1.5.8 und 1.4.1.6

Die Einstellzeit (90%-Zeit) der Meßeinrichtungen soll nicht mehr als 200 Sekunden betragen.

Zur Ermittlung der Tot- und Einstellzeit wurden die gesamten meßgasführenden Teile der Meßeinrichtung mit Nullpunktgas gespült und dann Prüfgas aufgegeben. Die Zeit zum Erreichen von 10% (Totzeit, T 10) und 90% (Einstellzeit, T 90) des erwarteten Meßwertes wurde gestoppt.

Folgende Zeiten wurden gemessen (Ergebnisse der Untersuchung 1992):

Geräte-Nr.:	32571693	32571703
	(1)	(2)
T 10:	6 s	5 s
T 90:	10 s	8 s

Bei direkter Aufgabe des Prüfgases auf die Analysatoren beträgt die Einstellzeit weniger als 1 s.

Bewertung: erfüllt

5.2.7/ 5.2.8 Zeitliche Driften der Nullpunktanzeige und der EmpfindlichkeitAnforderung 1.4.1.7

Die zeitliche Änderung der Nullpunktanzeige soll im Wartungsintervall $\pm 2\%$ des Anzeigebereiches nicht übersteigen.

Anforderung 1.4.1.8

Die zeitliche Änderung der Referenzpunktanzeige, verursacht durch eine Änderung der Empfindlichkeit, soll im Wartungsintervall $\pm 4\%$ des Sollwertes nicht übersteigen.

Die Meßeinrichtungen wurden im Dauertest 1991/92 über einen Zeitraum von insgesamt 163 Tagen an einer Abfallverbrennungsanlage betrieben. Über diesen Zeitraum hinweg wurde die Einstellung der Meßeinrichtungen 24 mal mit Nullpunkt- und Prüfgas kontrolliert.

Nach Umrechnung auf den Bezugswert 15 mgC/m³ waren die zeitlichen Driften am Nullpunkt bis auf 2 mal (FID 1) bzw. 4 mal (FID 2) immer kleiner $\pm 2\%$, bei 14 (FID 1) bzw. 13 (FID 2) von 24 Versuchen kleiner $\pm 0,5\%$.

Die zeitlichen Änderungen der Empfindlichkeit waren bei beiden FID über den gesamten Zeitraum des Dauertests kleiner als $\pm 4\%$, bezogen auf den Prüfgassollwert.

Das Wartungsintervall wurde zu 1 Woche bestimmt.

Im Rahmen der Nachprüfung wurden beide FID 123 über einen Zeitraum von 46 Tagen im Labor-Dauertest betrieben, davon über etwa die halbe Zeit unter Zudosieren von Gemischen verschiedener organischer Stoffe in die gemeinsame Meßgasentnahme.

Werktäglich wurde die zeitliche Änderung von Nullpunktanzeige und Empfindlichkeit überprüft.

Bei beiden FID waren die Änderungen kleiner $\pm 0,5\%$ am Nullpunkt und an der Empfindlichkeit, bewertet über jeweils eine Woche und über den ganzen Prüfzeitraum - ein Nachstellen der Geräte war in dieser Zeit nicht notwendig.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann das Wartungsintervall für die modifizierte Meßeinrichtung (mit EingangsfILTER und Versorgung mit nachgereinigter Brennluft) mit dem FID 123 auf bis zu 4 Wochen festgelegt werden.

Bewertung: erfüllt

5.2.9 Probenahme und Probenaufbereitung

Anforderung 1.4.1.9

Probenahme und Probenaufbereitung sind bezüglich Werkstoff und Beheizung so zu gestalten, daß eine einwandfreie Feststofffilterung erreicht und Umsetzungen sowie Verschleppungseffekte durch Adsorptions- und Desorptionserscheinungen so weit wie möglich vermieden werden.

Die Probenahme und -aufbereitung waren bezüglich Werkstoff und Beheizung so beschaffen, daß die Zusammensetzung des Meßgases nicht beeinflußt wurde.

Bewertung: erfüllt

5.2.10 Reproduzierbarkeit (vgl. Abs. 5.1.11)Anforderung 1.4.1.10

Die Reproduzierbarkeit soll den Wert 30 nicht unterschreiten.

In der Anlage .. sind die Meßwertepaare zusammengestellt.
Damit ergeben sich die folgenden Werte für die Reproduzierbarkeit:

Meßbereich: 0 - 25 mg/m³; Datensätze aus dem Dauertest 1991/92

Konzentrationsklasse	n	s _p mg/m ³	U mg/m ³	R
1: 0 - 8,3 mg/m ³	150	0,192	0,379	40
2: 8,31 -16,6 mg/m ³	100	0,131	0,259	58
3: 16,61 - 25 mg/m ³	30	0,191	0,383	39

Meßbereich: 0 - 25 mg/m³, Datensätze aus Labortest 1995

Konzentrationsklasse	n	s _p mg/m ³	U mg/m ³	R
1: 0 - 8,3 mg/m ³	43	0,060	0,119	126
2: 8,31 -16,6 mg/m ³	55	0,073	0,145	103
3: 16,61 - 25 mg/m ³	34	0,126	0,252	60

Bewertung: erfüllt

5.2.11 ResponsefaktorenAnforderung 1.4.2

Meßgeräte für organische Verbindungen

Die relative Standardabweichung der Bewertungsfaktoren für die organischen Verbindungen Butan, Cyclohexan, n-Heptan, Isopropanol, Aceton, Toluol, Essigsäureethyl- und Essigsäurebutylester soll 15% nicht übersteigen.

Für den Einsatz an Abfallverbrennungsanlagen ist die Untersuchung auf folgende Stoffe auszudehnen: Benzol, Ethylbenzol, Xylol, Methan, Propan, Ethin, Chlorbenzol, Perchlorethylen. Liegen Anhaltspunkte dafür vor, daß bei bestimmten Anlagen das Stoffspektrum von den hier genannten Komponenten deutlich abweicht, sollen weitere Hauptkomponenten hinzugenommen werden.

Die Durchführungsmethoden dieser Untersuchungen sind im Prüfbericht 152 9455 vom 6.8.92 beschrieben (Prüfgasherstellung durch Verdampfen der reinen Stoffe und Einsatz von Prüfgasen aus Druckbehältern); die Untersuchungen wurden seinerzeit sehr ausführlich und bei verschiedenen Meßbereichen durchgeführt. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden nun keine zusätzlichen Untersuchungen mehr durchgeführt. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Versuche von 1991/92 aufgelistet:

Komponente	FID 1	FID 2
Butan	1,00	0,97
Cyclohexan	0,96	0,96
n-Heptan	1,00	1,00
Isopropanol	0,78	0,79
Aceton	0,75	0,76
Toluol	1,00	1,00
Essigsäureethylester	0,71	0,71
Essigsäurebutylester	0,79	0,79
n	8	8
Mittelwert	0,874	0,873
Standardabweichung	0,127	0,121
rel. Stdabw. in %	14,6	13,9
Benzol	1,04	1,04
Ethylbenzol	0,94	0,95
Xylol	1,01	1,01
Methan	1,17	1,13
Propan	1,00	1,00
Ethin	1,21	1,20
Chlorbenzol	1,06	1,07
Perchlorethylen	1,04	1,05
n	16	16
Mittelwert	0,966	0,964
Standardabweichung	0,143	0,137
rel. Stdabw. in %	14,8	14,2
Ethan	1,02	1,01
Ethylen	1,16	1,10
Methanol	0,74	0,74
Ethanol	0,71	0,71
Butanol	0,79	0,78
Essigsäure	0,52	0,52
Dichlormethan	1,00	1,03

Bewertung: erfüllt

5.2.12 Funktionsprüfung und Kalibrierung

Die Funktionsprüfung sollte folgende Untersuchungen umfassen:

- Sichtprüfung (Gaslaufpläne, Meßgasentnahmesystem (Sonde, Filter Meßgasleitung und Prüfgasdosierung, Beheizung des Filters, der Meßgasleitung und des FID, Unterdruckanzeige Vakuumregler, Drucke der Betriebsgase, Flammenkontrolle, Qualität der Betriebs- und Prüfgase, H₂-maximum-Einstellung)
- Prüfung der Dichtheit des probegasführenden Systems durch Null- bzw. Prüfgas- aufgabe über die Sonde
- Kontrolle der Gerätekenlinie durch Prüfgase und Nullgas
- Überprüfen der Sauerstoff- und Kohlenmonoxid-Querempfindlichkeit (für CO nur, falls Konzentrationen größer 0,5 Vol.% CO/m³ im Meßgas zu erwarten sind; O₂ nur bei Meßgas mit anderen O₂-Gehalten als in Außenluft)
- Überprüfung der Nullpunkts- und Empfindlichkeitsdrift im Wartungsintervall
- Ermittlung des Einstellzeit

Im Übrigen sind die Vorgaben der VDI 3950, Blatt 1 und die Vorgaben des Herstellers zu beachten.

6. Stellungnahme

Die TÜV Umwelttechnik GmbH (Unternehmensgruppe TÜV Bayern) wurde von der Firma TESTA GmbH beauftragt, die ergänzende Typprüfung der Emissions-Meßeinrichtung FID 123 durchzuführen und die Konformität der Prüfergebnisse bezüglich der Modellvarianten FID 123 I und FID 3001 W zu bestätigen.

Die Meßeinrichtung FID 123 erfüllt die in den

“Richtlinien für die Eignungsprüfung, den Einbau und die Wartung kontinuierlich arbeitender Emissionsmeßgeräte, Rundschreiben des BMU vom 1.3.1990; IG I - 556134/4”

und den

"Richtlinien über die Auswertung kontinuierlicher Emissionsmessungen nach der Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe (17. BImSchV)"- Rundschreiben des BMU vom 26.10.1992, IG I 3 - 51134/3-

gestellten Mindestanforderungen.

Die Kenngrößen wurden, soweit zutreffend mit Bezug auf das 1,5-fache des Tagesmittelwertes (15 mgC/m^3) berechnet und mit den vorgegebenen Anforderungen verglichen.

Alle Anforderungen werden eingehalten.

Nach Prüfung der Bauteile und Ausführung der Analysatoren, kommt das Prüfinstitut zu der Auffassung, daß die für die Grundaussführung FID 123 geltenden Aussagen uneingeschränkt auch für die Modelle FID 123 I und 3001 W zutreffen.

Folgender Bekanntgabebetext wird vorgeschlagen:

Summenbestimmung organischer Verbindungen

FID 123 / FID 123 I / FID 3001 W

Hersteller: Testa GmbH
80797 München

Eignung: für Anlagen mit Emissionen chlorierter und nichtchlorierter organischer Lösemittel und Anlagen nach TA Luft und der 17. BImSchV

Kleinster Meßbereich
bei der Eignungsprüfung: 0 - 25 mgC/m^3

Die geprüfte Meßeinrichtung entspricht auch den im Entwurf Juni 1995 genannten Anforderungen des CEN-Standards: "Stationary Source Emissions - Determination of the Mass Concentration of Total Organic Carbon at Low Concentrations in Flue gasses - Continuous Flame Ionisation Detector Method.

TÜV Umwelttechnik GmbH
Unternehmensgruppe TÜV Bayern

Der Sachbearbeiter

TÜV UMWELTTECHNIK

Testa GmbH

FID 123 / 123 I / 3001 W

MÜ-A-KS dr.wae

A.-Nr.: 2401 4741

TÜV

05.02.1996

Seite 29 von 34

Anlage 1

Doppelbestimmungen zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit

TÜV UMWELTTECHNIK

Testa GmbH

FID 123 / 123 I / 3001 W

MÜ-A-KS dr.wae

A.-Nr.: 2401 4741

TÜV

05.02.1996

Seite 30 von 34

Doppelbestimmungen zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit

TÜV UMWELTTECHNIK

Testa GmbH

FID 123 / 123 I / 3001 W

MÜ-A-KS dr.wae

A.-Nr.: 2401 4741

TÜV

05.02.1996

Seite 31 von 34

Doppelbestimmungen zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit

TÜV UMWELTTECHNIK

Testa GmbH

FID 123 / 123 I / 3001 W

MÜ-A-KS dr.wae

A.-Nr.: 2401 4741

TÜV

05.02.1996

Seite 32 von 34

Doppelbestimmungen zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit

TÜV UMWELTTECHNIK

Testa GmbH

FID 123 / 123 I / 3001 W

MÜ-A-KS dr.wae

A.-Nr.: 2401 4741

TÜV

05.02.1996

Seite 33 von 34

Doppelbestimmungen zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit

TÜV UMWELTTECHNIK

Testa GmbH

FID 123 / 123 I / 3001 W

MÜ-A-KS dr.wae

A.-Nr.: 2401 4741

TÜV

05.02.1996

Seite 34 von 34

Anlage 2

Leerwertmessungen zur Bestimmung der Nachweisgrenzen

(Meßwerte in mA)