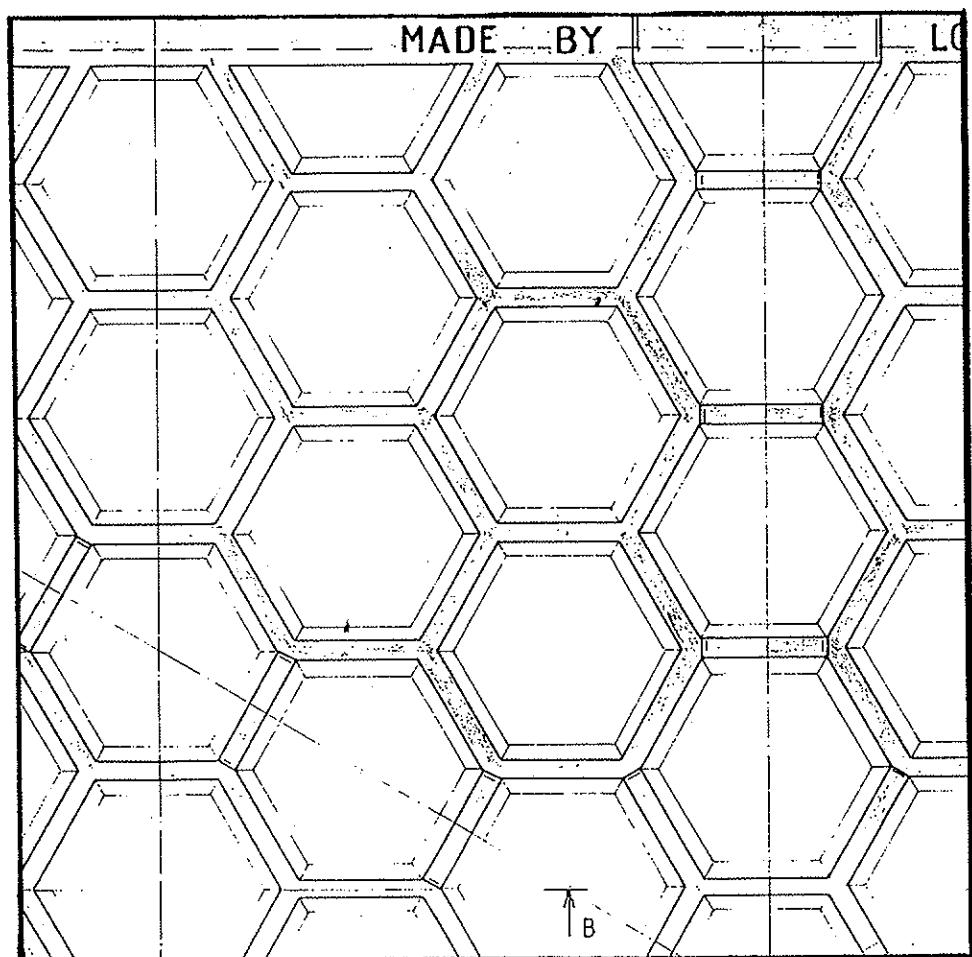


**DIANE 7**  
Klein-Holzfeuerungen

## *Anfeuerverbesserung durch Rostoptimierung*



Das Aktionsprogramm Energie 2000:  
Energie-Partnerschaft, die nachhaltig wirkt.  
Wir machen mehr - mit aller Energie.



Ein ENERGIE 2000-Programm des  
Bundesamtes für Energiewirtschaft

*DIANE steht als Kurzform für "Durchbruch innovativer Anwendungen neuer Energietechniken". Das Programm will mit sieben ausgewählten Projekten bisher ungenutzte oder nicht optimal genutzte Reserven bei der Energieerzeugung und beim Energiesparen mobilisieren. Es soll den Marktdurchbruch der einbezogenen umweltfreundlichen Techniken fördern und diese dadurch befähigen, bis zum Jahr 2000 einen spürbaren Beitrag zur Verbesserung der Energiesituation zu leisten.*

## **DIANE 7**

### **Klein- Holzfeuerungen**

### **Entwicklung eines Feuerungsrostes mit optimiertem Anfeuer- und Ausbrandverhalten**

Anschrift der Verfasser:

**Lopper Energietechnik AG**  
R. Schnekenburger  
D. Schlottmann

**Alteno AG**  
Dr. Basso Salerno

per Adresse:

Lopper Energietechnik AG  
Beckenriederstrasse 5  
6374 Buochs

Buochs im April 1995

Bezugsquelle:

Eidgenössische Drucksachen und Materialzentrale EDMZ, 3000 Bern

**EDMZ-Nr. 805.201**

# Inhaltverzeichnis

	Seite
<b>Zusammenfassung</b>	
<b>1. Ausgangslage</b>	1
<b>2. Ziel</b>	1
<b>3. Der neue Rost</b>	2
<b>4. Messungen</b>	
4.1 Messobjekt	3
4.2 Einflussparameter	4
4.3 Messgrösse	4
4.4 Messprozedere	4
4.5 Messprogramm	5
<b>5. Resultate und Analyse</b>	
5.1 Ist-Zustand	7
5.2 Neuer Rost Phase A	9
5.3 Neuer Rost Phase B	9
5.4 Neuer Rost Phase C	9
5.4 Neuer Rost Phase C/Anfeuermodul	10
<b>6. Schlussfolgerungen</b>	
6.1 Geometrie	11
6.2 Verbrennung	12
6.2 Restasche	13
6.2 das Anfeuermodul AMO	13
<b>7. Offene Fragen</b>	14
<b>8. Danksagung</b>	14

## ANHANG

## Zusammenfassung

Sämtliche heute auf dem Markt befindlichen Holzheizkessel sind entweder mit einem konventionellen Gussrost oder mit einer Keramikwanne ausgerüstet.

Ziel des Projektes war die Entwicklung, Konstruktion und die Prüfung eines neuartigen Rostes, der die Vorteile von Guss- und Keramikrost vereinigt. Spezifisch interessierte die Auswirkung des neuen Rostes auf die Emissionen in der Anfeuer- und Betriebsphase. Auch eine Reduktion von unverbrannten Rückständen war zu erwarten.

Der Rost ist aus einem Guss-Rahmen mit 59 sechseckigen Keramikelementen zusammengesetzt. Alle Keramikelemente sind austauschbar. Einige davon sind mit einem Loch versehen und in erster Linie für die Verteilung der Verbrennungsluft im Rostbereich verantwortlich. Diese Konstruktion zeigt sehr gute mechanische Eigenschaften sowie eine hohe Flexibilität, die die Möglichkeit weiterer Optimierung zulässt.

Ein Lopper Kessel Typ Dragon 30 wurde mit dem alten Gussrost und anschliessend mit dem neuen Wabenrost getestet. Insgesamt wurden 23 Versuche mit Hart-, Weich- und Hackholz durchgeführt.

Die Resultate der Abgasanalyse mit dem neuen Rost zeigen eine Verbesserung des Emissionsbildes, aber keine Reduktion der Restkohle, auch wenn Beobachtungen der Verbrennungsrückstände auf eine höhere Glutbetttemperatur als beim Gussrost hinweisen. Nach der ersten Optimierung der Luftzufuhr im Rostbereich sinkt der durchschnittliche CO-Gehalt von 5.7 gr/nm<sup>3</sup> (4560 ppm) auf 3.7 gr/nm<sup>3</sup> (2960 ppm) (13% O<sub>2</sub> normiert). Mit der zweiten Optimierung wurden durchschnittliche CO-Werte von 3.4 gr/nm<sup>3</sup> (2720 ppm) und Spitzen-Mittelwerte unter 2 gr/nm<sup>3</sup> (1600 ppm) (13% O<sub>2</sub> normiert) erreicht. Diese Verbesserungen der Emissionen sind vor allem auf die Luftverteilung im Rostbereich und, beim zweiten Optimierungsschritt, auf die Abdichtung der Ausbrennkammer zurückzuführen.

In der Startphase (erste 20 Minute) wurden die besten Werte beim Holznachlegen und mit dem Anfeuermodul AMO (ein weiters Diane7-Projekt) erreicht. Allein mit dem Einsatz des neuen Rostes sank der CO-Gehalt von 8 auf 7.3 gr/nm<sup>3</sup> (6400 auf 5840 ppm) (13% O<sub>2</sub> normiert). Mit der ersten Optimierung sanken die CO-Werte auf 4.3 gr/nm<sup>3</sup> (3470 ppm), mit dem Anfeuermodul durchschnittlich auf 1.9 gr/nm<sup>3</sup> (1510 ppm), mit Spitzen-Mittelwerten unter 1 gr/nm<sup>3</sup> (800 ppm) (13% O<sub>2</sub> normiert).

Keine wesentlicher Unterschied wurde beim feuerungstechnischen Wirkungsgrad und bei den verschiedenen Holzarten festgestellt. Für Hackholz ist eine andere Verteilung der Primär- und Sekundärluft nötig.

Offen bleiben noch Fragen über: die Einstellung des Luftverhältnisses beim Hackholz, die Wirkung der sogenannten Sturmlüftung beim Anfeuern, die Auswirkung auf Heizkessel für 1 m Spalten, die Abstimmung der Verbrennungsluft-Regelung auf den Wabenrost.

## 1. Ausgangslage

Sämtliche heute auf dem Markt befindlichen Holzheizkessel sind entweder mit einem konventionellen Gussrost oder vor allem die Primärluft-Vergaserkessel, mit einer Keramikwanne ausgerüstet.

Der Gussrost ist wohl gegen mechanische Beschädigungen weitgehend unempfindlich, muss aber wegen der Gefahr einer vorzeitigen Verzunderung für Ascheausbrand derart ungünstig geformt werden, damit keine übermässige Hitze im Guss auftreten kann. Dadurch wird aber der totale Ascheausbrand verunmöglicht. Ein totaler Ausbrand kann nur dann stattfinden, wenn die Glut auf einer möglichst heißen und hitzespeicherfähigen Masse total ausgasen und dann anschliessend die Holzkohle vollständig ausglühen kann. Dieser Zustand kann mit dem Einsatz eines Metallrostes nicht erreicht werden. Dazu ist eine Steinplatte notwendig. Da diese jedoch äusserst bruchempfindlich ist, kann sie trotz ihrer guten Eigenschaften in einem Heizkessel nicht eingesetzt werden.

Kessel, die mit einer Rostwanne ausgerüstet sind, sind wohl bezüglich der Ascheausbrandqualität besser als Kessel mit einem Gussrost. Leider kann aber bei diesen Kesseltypen dieser Zustand nur während einer äusserst kurzen Betriebsdauer des Gerätes gewährleistet werden und auch dann nur beim konsequenten Einsatz von Scheitholz. Denn bereits nach kurzer Betriebsdauer zerreißen die keramischen Rostwannen, weil die relativ grossen Keramikteile die gespeicherte Hitze nicht mehr abgeben können und dadurch poröse und übermässig bruchempfindlich werden. Dadurch ist der Kessel nicht mehr Betriebsfähig. Auch gegen mechanische Einflüsse wie z. B. das Einfüllen der Holzscheiter, bei der Kesselreinigung etc. ist eine solche Keramik-Rostwanne sehr empfindlich. Zudem verstopfen die Gasdurchlassdüsen übermässig oft. Diese Kessel sind darum für kleinstückiges Brenngut äusserst ungeeignet. Deshalb wird, selbst in Kenntnis der günstigen Ascheausbrandeigenschaften des keramischen Materials, heute mehrheitlich auf den Einsatz von Keramik im Rostbereich verzichtet und somit die Nachteile des Gussrostes billigend in Kauf genommen.

## 2. Ziel

Das Ziel dieses Diane7-Projektes ist:

- **die Entwicklung**
- **die Konstruktion**
- **die Prüfung**

eines neuartigen Rostes.

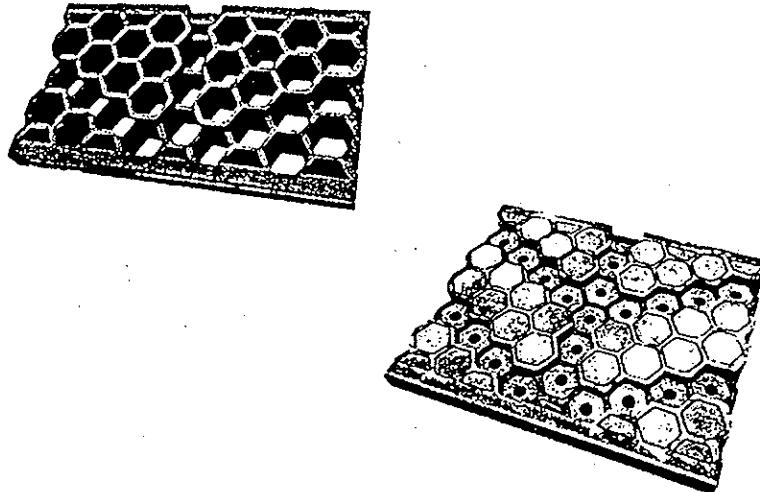
Durch den Einsatz des neuen Rostes soll es möglich sein:

- das Emissionsverhalten eines Holzheizkessels sowohl in der Start- und in der Ausbrandphase wie auch während der gesamten Abbrandzeit deutlich zu verbessern.
- Aschenanfall wesentlich zu reduzieren. Dadurch werden die Reinigungsintervalle entsprechend länger, was wiederum den Komfort der Holzfeuerung spürbar verbessert.

### 3. Der neue Rost

Um nun die Vorteile, die ein keramischer Rost eindeutig aufweist, nutzen zu können, ohne gleichzeitig auch die Nachteile in Kauf nehmen zu müssen, entstand die Idee, einen Wabenrahmen aus hochlegiertem Spezialguss zu entwickeln, in dessen sechseckigen Waben, starke, keramische

Rostsegmente aus Schamotte aneinandergereiht eingelegt werden. Es ist bei dieser Konstruktion zwingend zu beachten, dass die Grundmasse der Wabenrahmen so festgelegt werden, dass maximal zwei Typen von Einlegeschamottsteine benötigt werden. Für die Gestaltung des Wabenrahmens sind Sechseckelemente allen anderen Formen vorzuziehen. Nur durch die



**ABB. 3.1. Links der Rostrahmen ohne keramische Segmente. Rechts der vollständige Rost: ersichtlich sind die versenkten gelochten keramischen Segmente, die für die Primärluft-Zufuhr verantwortlich sind.**

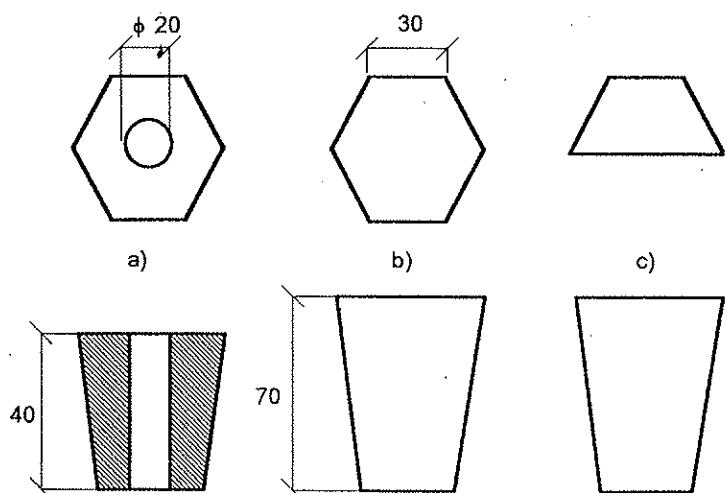
Formgebung der Sechsecke ist das Fließverhalten des hochlegierten Temperguss beeinflussbar, da nirgends ein vertikaler Metallfluss notwendig wird, und somit die Metalleinspritzung seitlich an den Werkzeugen vorgenommen werden kann.

Der Wabenrost (Siehe ABB. 3.1.) soll gleichzeitig als Muldenrost ausgebildet werden, damit vor allem das Anbrennverhalten des Kessels

günstig beeinflusst werden kann und der Kessel schnellmöglich ein Glutbett bilden kann, da erst ein kompaktes Glutbett die rauchlose Verbrennung ermöglicht.

Die Wabenkonstruktion des Rostrahmens garantiert, dass die keramischen Rost-Segmente auch dann vor Zerstörung geschützt sind, wenn beim Befüllen des Kessels schwere Holzscheiter auf den Rost geworfen werden. Durch die Aufteilung des grossflächigen Gesamtrostes in viele

kleine Teilstücke wird das Zerreissen der Keramikteile durch die enorme Hitzeentwicklung während des Abbrandes verhindert.



**ABB. 3.2. Die keramische Segmente a) mit Loch für Primärluft-Zufuhr b) normal c) Halbsegment für den Rand**

Der Gussteil ist 55x28 cm gross und beinhaltet 59 ganze sowie 11 halbe keramische Segmente. Die eingebaute Versenkung soll die Luftzufuhr vereinfachen. Die Primärluft fliesst zuerst in den Aschenraum und dann durch die gelochten Segmente in die Brennkammer. ABB. 3.2. zeigt die drei verschiedenen Typen.

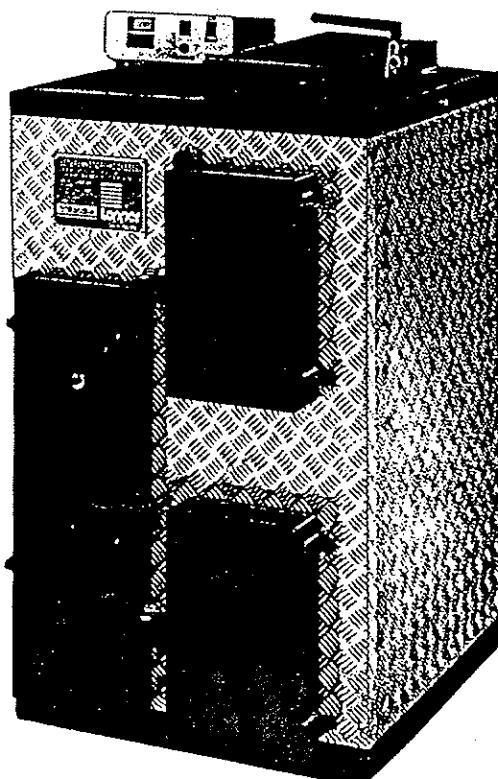
## 4. Messungen

### 4.1 Messobjekt

Die Messungen wurden mit einem Lopper Kessel Typ Dragon 30 (ABB 4.1.1) in Langenbruck (BL) zwischen 15. August und 4. Oktober 1994 durchgeföhrt.

Dank einem an dem 3m<sup>3</sup>-Speicher angeschlossenen externen Wärmetauscher konnten die Versuche auch bei heissem Wetter durchgeföhrt werden. Zwei Klappen regeln die Primär- und Sekundärluft. Die Primärluft wird mittels einem Samson-Regler mit der Kesseltemperatur gekoppelt, während die Sekundärluft von der Abgastemperatur abhängig ist. Der Zweistufen-Ventilator ist wie folgt gesteuert:

Anzündung	tiefere Stufe
2 Min. nach Anzündung bis Abgastemp. 170°C	höhere Stufe (Sturmlüftung)
Abgastemp 170-270°C	tiefere Stufe
Abgastemperatur >270°C	abgeschaltet
Ausbrand Abgastemp. <170°C während 15 Min.	Sturmlüftung
Ausbrand Abgastemp. <170°C nach 15 Min.	abgeschaltet



Nennwärmeleistung	kW	25
Mindestwärmeleistung	kW	15
Höchstwärmeleistung	kW	30
Zulässige Betriebstemperatur	°C	95
Mindestdrücklauftemperatur	°C	55
Widerstand Nennleist. 20 °C	kPa	.15
Thermische Ablaufsicherung	kg/h	1500
Brennraumtiefe	cm	55
Kesselwasserinhalt	Liter	70
Füllschachtinhalt	Liter	160
Gewicht	kg	535
Breite	cm	77
Länge	cm	125
Höhe	cm	130

ABB. 4.1.1. Kessel und technische Angaben

#### 4.2 Einflussparameter

In den 25 Versuchen wurden die folgenden Einfluss-Parameter getestet:

Brennstoff:	Hartholz	15 atro %
	Weichholz	14 atro %
	Hackholz	12 atro %

Start: **Holzwolle (11 atro%)/Anfeuerholz (14 atro %)**  
**Anfeuermodul AMO (Siehe Anhang E)**  
**Holz-Nachladung**

Da Schwierigkeiten vor allem bei der Einstellung des Verbrennungsluft-Verhältnisses aufgetreten sind, wurde praktisch nur der Brennstoff-Parameter Hartholz weiterverfolgt.

Die Versuche mit dem Anfeuermodul AMO wurden im Zusammenhang mit dem noch nicht abgeschlossenen Diane7- Projekt "Anfeuermodul AMO" durchgeführt. Das AMO besteht aus einem geformten Stück Holz (ca. 700 gr, ca. 12 atro %) und aus ca 300 gramm paraffinimprägnierten Holzspänen (Siehe Anhang E).

#### 4.3 Messgrösse

Die folgenden Größen und Gaskomponenten wurden erfasst:

Sauerstoff	Kohlenmonoxid	Kohlendioxid
Stickstoffmonoxid	Kohlenwasserstoffe	Zuluftmenge
Resttasche (kg)	Raumtemperatur	Unterdruck im Abgasrohr
Abgastemperatur		

Eine detaillierte Beschreibung der Messgeräte und das gesamte Mess-Schema befinden sich in Anhang F.

Für die Normierung und Mittelwertbildung siehe Anhang G.

#### 4.4 Messprozedere

Die Versuche wurden mit dem folgenden Prozedere durchgeführt:

Prozedere: **Holzwolle + Anfeuerholz**

- 1 500 gr. Holzwolle hinlegen
- 2 2.5 kg Anfeuerholz (Länge ca 30 cm, mittlerer Durchmesser ca. 3 cm) hinlegen
- 3 Brennraum füllen (36 kg Hartholz oder 26 kg Wiechholz oder 21 kg Hackholz)
- 4 Obere Fülltüre zu
- 5 Anzünden bei der unteren Türe

- 6 Starttaste drücken
- 7 untere Türe zu
- 8 Abbruch bei CO<sub>2</sub>= 2 %

#### Prozedere: Anfeuermodul AMO

- 1 Anfeuermodul AMO hinlegen
- 2 Brennraum füllen (36 kg Hartholz oder 26 kg Wiechholz oder 21 kg Hackholz)
- 3 Obere Fülltüre zu
- 4 Anzünden bei der unteren Türe
- 5 Starttaste drücken
- 6 untere Türe zu
- 7 Abbruch bei CO<sub>2</sub>= 2 %

#### Prozedere: Holznachladung

- 1 Glutbett-Kontrolle (CO<sub>2</sub>=2%)
- 2 Brennraum füllen (36 kg Hartholz oder 26 kg Wiechholz oder 21 kg Hackholz)
- 3 Obere Fülltüre zu
- 4 Abbruch bei CO<sub>2</sub>= 2 %

Das Anfeuermodul (Siehe Anhang E) wurde anstelle von Holzwolle und Anfeuermaterial gebraucht. Die Mittelwerte wurden von Start bis CO<sub>2</sub>=2% (Start und Ausbrand inkl.) errechnet. Daher sollten Vergleiche mit den üblichen Mittelwerten mit Vorsicht vorgenommen werden (Siehe Anhang G).

#### 4.5 Messprogramm

Die gesamte Versuchsreihe wurde den Verbesserungsschritten entsprechend in 6 Phasen geteilt:

<b>1 Vorversuche</b>	<b>zur Einstellung der Anlage und Verbrennungsluft. Diese Versuche wurden nicht ausgewertet.</b>
<b>2 IST-Zustand</b>	<b>Versuche mit dem alten Gussrost</b>
<b>3 Neuer Rost Phase A</b>	<b>Versuche mit dem neuen Rost in der ersten Konfiguration (Siehe ABB. 3.1)</b>
<b>4 Neuer Rost Phase B</b>	<b>Versuche mit dem neuen Rost mit geänderter Konfiguration (Siehe Abb. 4.5.1)</b>
<b>5 Neuer Rost Phase C</b>	<b>Versuche mit dem neuen veränderten Rost und besser abgedichter Brenn- und Ausbrennkammer (Siehe Abb. 4.5.2).</b>
<b>6 Neuer Rost Phase C/AMO</b>	<b>Angefeuert wird mit dem Anfeuermodul AMO. Der Rest ist wie in der Phase C.</b>

Die Tabelle 4.5.1. zeigt einen Gesamtüberblick der durchgeführten Versuche.

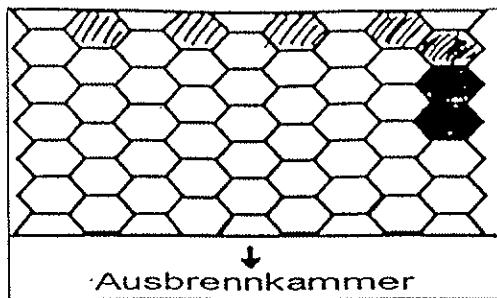


ABB. 4.5.1 Veränderte Geometrie in der Phase B: die seitlichen 5 keramischen Segmente wurden entfernt. (z.T. zusätzlich 2 Segmente bei der Fülltür)

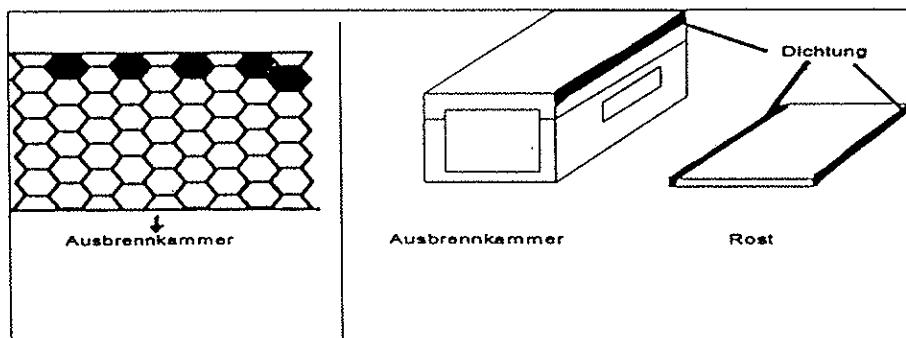


ABB. 4.5.2 Veränderte Geometrie in der Phase C: 5 keramische Elemente entfernt, 4 Löcher zugestopft, Ausbrennkammer sowie Brennkammer gegenüber Aschenraum abgedichtet.

	IST Anfeuerholz	Neuer Rost Phase A Anfeuerholz	Neuer Rost Phase B Anfeuerholz	Neuer Rost Phase C Anfeuerholz	Neuer Rost Phase C Holznachlegen	Neuer Rost Phase C Anfeuermodul
Hartholz	<b>2</b> 240894 250894	<b>2</b> 80994 90994	<b>3</b> 120994 130994 140994	<b>2</b> 210894 280894	<b>2</b> 200994 41094	<b>4</b> 260994 270994 290994 21094
Weichholz	<b>2</b> 260894 290894	<b>2</b> 60994 70994				
Hackholz	<b>3</b> 300894A 300894B 310894			<b>1</b> 200994A		

Tab. 4.5.1. Übersicht der Versuche mit Anzahl und Versuchsbezeichnung

## 5. Resultate und Analyse

### 5.1 IST-Zustand

In 7 Versuchen wurde das Verhalten des Messobjekts mit dem alten Gussrost erfasst. Die optimale Einstellung des Kessels und der Anlage ist nicht oder nur teilweise gelungen. Diese Tatsache ist sehr wahrscheinlich auf eingetretene Undichtigkeiten im Ausbrennkammerbereich zurückzuführen. Ausführliche Informationen sowie die Mittelwerte sind im Anhang A, die Zeit-Verläufe der Messgrössen im Anhang B zu finden. Die durchgeföhrten Messungen lassen das Folgende bemerken:

#### Mittlere Brennstoffleistung

Die mittlere Brennstoffleistung errechnet sich aus dem Energieinhalt des Brennstoffes und der Brenndauer. In den durchgeföhrten Versuchen gilt als Brenndauer die Zeit vom Anzünden bis zum Punkt, in dem  $\text{CO}_2 \leq 2\%$  erreicht ist.

Diese Brennstoffleistung liegt bei allen Versuchen mit Hart- und Weichholz um 42 kW. Mehr als 30 % höher liegt der genannte Wert bei der Verbrennung von Hackholz (durchschnittlich 55 kW Versuch 308094 ausgenommen).

#### Feuerungstechnischer Wirkungsgrad

Bei allen Versuchen liegt der feuerungstechnische Wirkungsgrad um 83 %, unwesentlich höher (84 %) bei den Hartholz-Versuchen. Ausbrandphase ausgenommen, verlief der feuerungstechnische Wirkungsgrad relativ konstant (zwischen 80 und 90%). Relativ hoch (4 bis 6 %) sind die chemischen Verluste bezüglich Kohlenmonoxid.

Zu bemerken ist hier, dass in der Berechnung des Wirkungsgrades die zusätzlichen Verluste aus der unvollständigen Verbrennung der Kohlenwasserstoffe nicht inbegriffen sind, da die genaue Zusammensetzung der gemessenen Kohlenwasserstoffe fehlt. Wird eine durchschnittliche Komposition von  $\text{C}_2\text{H}_4$  (Ethylen) angenommen, kann der zusätzliche Verlust ca. 4 % betragen. Zusammenfassend können wir sagen, dass der effektive Verbrennungswirkungsgrad ca. 80 % beträgt und die Verluste wie folgt aufgeteilt sind:

thermisch	11%
Chemisch Kohlenmonoxid	5%
chemisch Kohlenwasserstoffe	4%
Total Verluste	20%

#### Luftüberschuss

Der Luftüberschuss liegt bei den Hartholz-Versuchen um 2, bei Weichholzversuchen um 2.4.

Deutlich tiefer sind mit 1.7 die Werte bei Hackholz-Versuchen,

Der Verlauf ist in der Betriebsphase ausser bei den Weichholz-Versuchen relativ ruhig. Eine plausible Erklärung davon liegt in der Bildung von Mini-Brücken durch das schnelle Brennen des Weichholzes. Die durch diese Kanäle strömende Luft nimmt nicht an der Verbrennung Teil, so steigt der

Luftüberschuss. In der sukzessiven Phase brechen sich die Kanäle, des Brennstoff-Netz wird dichter, der Luftüberschuss sinkt wieder.

#### Kohlenmonoxid

Die besseren Werte werden bei den Hartholz-Versuchen mit einem Durchschnitt von 5.7 gr/nm<sup>3</sup> (4560 ppm) normiert erreicht (Berechnung Normwerte Siehe Anhang G). Mit einem Durchschnitt von 8 gr/nm<sup>3</sup> (6400 ppm) normiert (Versuch 300894A ausgenommen) schneiden die Versuche mit Hackholz am schlechtesten ab. Die Weichholz-Versuche bezeichnen einen Durchschnitt von 7.5 gr/nm<sup>3</sup> (6000 ppm).

In der Anfeuerungsphase (20 Minuten) ist kein bedeutsamer Unterschied zu bezeichnen. Die Werte liegen um 7.5 gr/nm<sup>3</sup> (6000 ppm) sehr nahe zusammen. Schlussendlich ist das Anfeuerungsverfahren (Art und Material) bei allen Versuchen gleich gewesen.

Der Verlauf ist bei allen Versuchen sehr unruhig. Es wurde praktisch keine stabile Phase mit Werten unter 1 gr/nm<sup>3</sup> festgestellt. Das ist vor allem auf eine durch die schlechte Verteilung von Verbrennungsluft erzeugte Brücken-Bildung (Brandloch) zurückzuführen.

Die Spitzenwerte liegen beim Hartholz um 0.6 (480 ppm), beim Weichholz um 1 (800 ppm) und beim Hackholz um 0.5 gr/nm<sup>3</sup> (400 ppm) und werden nur für kurze Zeit erreicht. Auch diese in einer brandlochfreien Phase erreichten Spitzenwerte sind relativ hoch.

Die Gründe sind sehr wahrscheinlich vor allem auf Undichtigkeiten zurückzuführen. Ein mit ziemlich viel Schadsstoffe geladener Teil der Abgase ist direkt in den Wärmetauscher-Bereich hingeflossen. Die durch die kalten Fläche abgekühlten Gase fanden keine Nachverbrennung.

#### Kohlenwasserstoffe

Die Analyse der Mittelwerte des Kohlenwasserstoff-Austosses führt zu den gleichen Bemerkungen, die bei dem Kohlenmonoxid gemacht worden sind. Bei der Kurven-Analyse ist zu bemerken, dass im Allgemeinen der grosse Ausstoss sich eher auf die erste Hälfte des Versuchs konzentriert.

Durchschnittlich beträgt der CxHy-Ausstoss mit Hartholz 270, mit Weichholz 515 und mit Hackholz 620 mg/nm<sup>3</sup>. In der Anfeuerungsphase (20 Min.) sind bei Weichholz und Hartholz keine Unterschiede festzustellen. Beim Hackholz sind die Werte 30% höher.

#### Stickoxid

Die Holzart beeinflusst den Stickoxidaustoss markant. Deutlich tiefer ist er beim Weichholz. Der Mittelwert steigt auf 30 beim Hartholz und auf 100 mg/nm<sup>3</sup> (normiert) beim Hackholz. Auch der Verlauf ist von der Holzart charakterisiert.

Diese Tatsache ist auf die folgenden Gründe zurückzuführen:

-kleinerer Gehalt an Stickstoff beim Weichholz

-unvollständige Zersetzung der höheren Komponenten beim Weichholz (Der Stickstoff bleibt an grössere Moleküle gebunden, die im Kondensat statt in der Messzelle landen).

"Eine Störung des Messgerätes kann 100%-ig nicht ausgeschlossen werden, auch wenn die Versuche sehr ähnlich für Weich-, Hart- sowie Hackholz verlaufen".

## 5.2 Neuer Rost Phase A

Nach der Aufnahme des IST-Zustandes wurde der neue Rost, wie es im ABB. 3.1. steht, eingebaut. Bei den ersten drei Messungen konnte aber nur eine leichte Verbesserung des Kohlenmonoxid-Gehaltes in der Startphase von 8 gr/nm<sup>3</sup> (6400 ppm) auf 7.3 gr/nm<sup>3</sup> (5840 ppm) beim Hartholz und eine Verschlechterung des feuerungstechnischen Wirkungsgrad festgestellt werden. Alles andere ist ziemlich ohne Erfolg geblieben. Dadurch entstand die Entscheidung, die Luftzufuhr in einer einfachen Weise zu verändern und die Messungen weiterzuführen.

## 5.3 Neuer Rost Phase B

Die Luftzuführung im Rost wurde geändert, in dem von vorne rechts seitlich (Ausbrennkammereintritt gegenüber) und bei der Türe zuerst 7 dann nur 5 keramische Segmente (Siehe ABB. 4.5.1 ) herausgenommen wurden.

Diese Änderung brachte eine gewisse Stabilität in der Verbrennung. Die CO-Mittelwerte erreichten 3.7 gr/nm<sup>3</sup> (2960 ppm) (IST-Zustand 5.7 gr/nm<sup>3</sup> ), in der Anfeuerungsphase 4.3 gr/nm<sup>3</sup> (3470 ppm) (13% O<sub>2</sub>). Der feuerungstechnische Wirkungsgrad wurde mit 77 % nicht besser (IST-Zustand 84 % Hartholz). Die gemessenen Werten waren immer noch nicht zufriedenstellend. Ein weiterer Schritt war notwendig.

## 5.4 Neuer Rost Phase C

Undichte Stellen wurden mit Keramikmatte zugestopft (Siehe ABB. 4.5.2. ). Das betrifft den Eintritt in die Ausbrennkammer und den Rost-Teil neben dem Ausbrennkammereintritt. Erst dann war eine markante Verbesserung der Situation festzustellen.

Die weiteren Versuche wurden dann nur mit Hartholz (200994A ausgenommen Hackholz) durchgeführt. Infolge einer Panne des Messgerätes nach einem Versuch mit Hackholz wurden keine Kohlenwasserstoff-Messungen durchgeführt. Die Mittelwerte im Anhang A und die Kurve im Anhang B lassen das Folgende bemerken:

### mittlere Brennstoffleistung

Die mittlere Brennstoffleistung liegt mit 45 kW etwa 10% höher als die des Ist-Zustandes. Es ist aber zu bemerken, dass die Erhöhung der Brennstoffleistung nur auf einer grösseren Verbrennungsluftmenge und nicht auf einem höheren Kohlendioxid-gehalt zurückzuführen ist.

### Verbrennungswirkungsgrad

Mit ca. 83% (ohne Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffe) Verbrennungswirkungsgrad sind keine wesentlichen Änderungen gegenüber dem Ist-Zustand festzustellen.

### Luftüberschuss

Der Luftüberschuss bewegt sich zwischen 2.2 und 2.6 und ist etwas höher im Vergleich mit den Ist-Zustand-Versuchen. Der Verlauf ist aber etwas stabiler.

### Kohlenmonoxid

Der Kohlenmonoxid-Ausstoss beträgt durchschnittlich 2.2 gr/nm<sup>3</sup> (1760 ppm) ohne grosse Abweichnungen ( 1.9 (1520 ppm) bis 2.8 gr/nm<sup>3</sup> (2240 ppm) 13% O<sub>2</sub>). Der Verlauf ist relativ stabil. Nur selten (1 mal pro Versuch) und für kurze Zeit steigt der Gehalt über 5 gr/nm<sup>3</sup> (4000 ppm). Die Brückebildung (Brandloch) ist aufgrund der neuen Verbrennungsluftverteilung im Brennraum eindeutig zurückgegangen. Spitzenwerte liegen im Bereich von .1 gr/nm<sup>3</sup> (80 ppm) (13% O<sub>2</sub>), was die Erwartung bei solchen Kesseln mit Nachverbrennung erfüllt.

### Kohlenwasserstoffe

Aus technischen Gründe konnten in der letzten Versuchsreihe keine Kohlenwasserstoff-Messungen durchgeführt werden.

### **5.4 Neuer Rost Phase C/Anfeuermodul**

Das Anfeuermodul AMO soll die Bedienungsfreundlichkeit des Anfeuerns verbessern und die Sicherheit eines guten Startes erhöhen. Das AMO (noch im Prototyp-Stadium) ist ohne Zweifel bedienungsfreundlich. Statt Holzwolle (.5 kg) und Anfeuerholz (2.5 kg) kann mit AMO (ca 1kg) die Anfeuerprozedur verbessert werden.

Auch die Emissionswerte sprechen dafür. Mit einem Durchschnittswert von 1.9 gr/nm<sup>3</sup> (1510 ppm) CO in der Startphase (erste 20 Min. "ab Zündholz") schneidet das AMO viel besser als Holzwolle/Anfeuerholz ab und ist gleich gut wie beim Holznachlegen.

Der beste Durchschnittswert der Startphase (erste 20 Minute) liegt bei AMO- um .94 gr/nm<sup>3</sup> (750 ppm), beim Holznachlegen- um .77 gr/nm<sup>3</sup> (616 ppm) und bei Holzwolle/Anfeuerholz-Versuchen um 1.78 gr/nm<sup>3</sup> (1420 ppm).

Der Kohlendionoxid-Gehalt steigt in der Startphase bei AMO-Versuchen nur langsam, der CO-Gehalt bleibt in dieser Phase aber immer sehr tief und stabil.

## 6. Schlussfolgerungen

Die regelmässige Form zeigt eine enorme geometrische Stabilität sowie eine gute mechanische Festigkeit auch bei hoher Temperatur. Der Gussteil sowie die sechseckige Keramikelemente haben den Versuchsserien ohne Schaden überstanden.

Durch den Einsatz des neuen Rostes wurde keine Reduktion der Restkohle festgestellt.

Die Resultate der verschiedenen Phasen zeigen aber eine deutliche Verbesserung des Emissionsbildes, die auf der Abdichtung der Ausbrennkammer und auf einer verbesserten Luftführung durch den Rost zurückzuführen ist. Die Luftführung kann dank der Flexibilität der Konstruktion beliebig variiert werden. Dadurch sind weitere Verbesserungen der Verbrennungsvorgänge mit Sicherheit möglich.

### 6.1 Geometrie

Bleiben die gelochte Keramikelemente (ABB. 3.2. a) in der aktuellen Form, erhöht sich das Risiko, dass sich die Löcher während der Verbrennung verstopfen. Nur durch eine sorgfältige Entaschung können sie wieder frei gelegt werden. Ein leicht konisches Loch (ABB. 6.5.1) sollte dieses Problem aufheben. Der Rost-Rahmen sollte gegenüber den Brennraum abgedichtet werden. In der Versuchsserie wurde festgestellt, dass

eine Erhöhung der seitliche Luftmenge (ABB. 6.5.1.) eine Positive Wirkung hat. Damit im Rost nicht zu grosse Masche entstehen, ist eine zusätzliche Form der Keramikelemente nötig. Ein Vorschlag dazu ist im ABB. 5.1.1. ersichtlich. Nur so kann eine Kontrollierte Luftzufuhr garantiert werden.

Die im Rost eingebrachte Versenkungen, die positiv auf die Anfeuerungsphase wirken, sind nach einem Abbrand mit Asche gefüllt. Nur eine akkurate Entaschung kann die Kanäle wieder frei setzen.

Für diesen Zweck ist ein spezielles Werkzeug erforderlich.

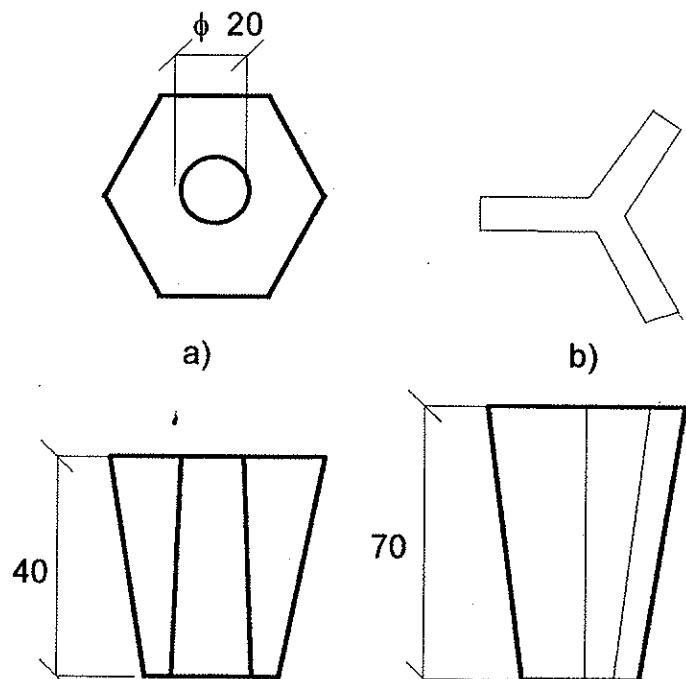
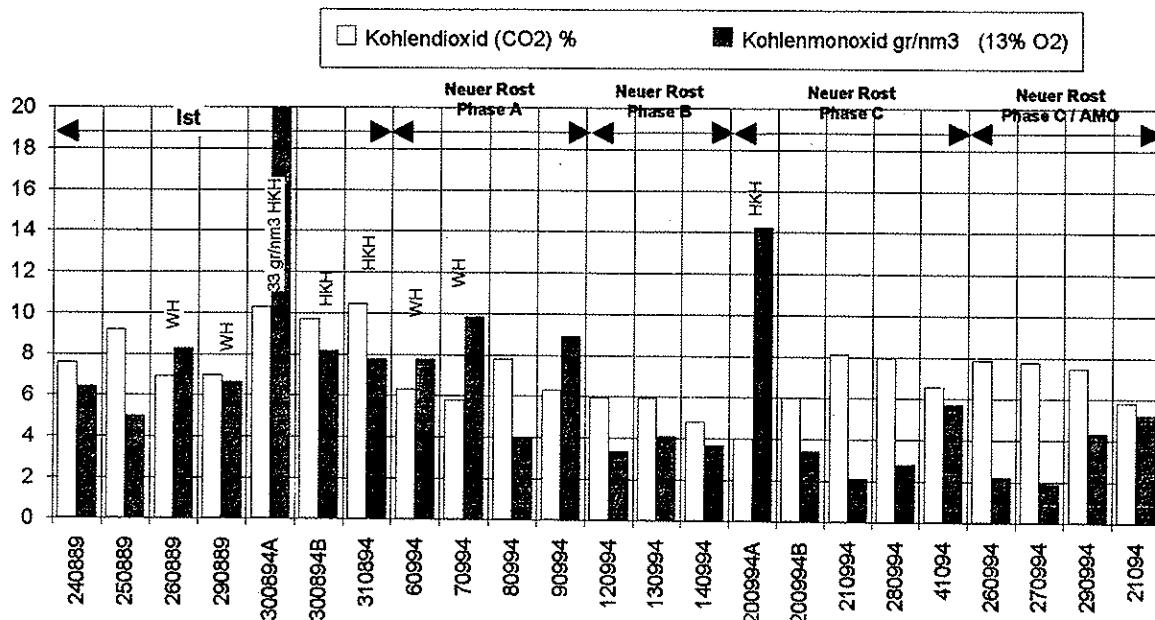


ABB. 6.5.1 Verbesserungsvorschläge für die Keramikelemente: a) das Loch ist leicht konisch, b) neues Element für den Rand

## 6.2 Verbrennung

ABB. 6.2.1 zeigt die Mittelwerte von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Kohlenmonoxid (CO normiert 13%  $\text{O}_2$ ) in der verschiedenen Phasen. Erst nach der ersten Optimierung (neuer Rost Phase B) ist eine deutliche Verbesserung des Emissionsverhaltens festzustellen. Auch wenn die Werte noch nicht im erwarteten optimalen Bereich liegen. Eine zusätzliche Verbesserung findet mit der Abdichtung im Bereich Ausbrennkammer und Rost (Siehe ABB. 4.5.2.) statt. Wird der "IST-Zustand" mit "neuer Rost Phase C" verglichen, sind Reduktionen des Kohlenmonoxid-Ausstosses von mehr als 65 % festzustellen. Abschliessend können wir sagen, dass das Anfeuermodul AMO für diesen Kesseltyp geeignet ist.



**ABB. 6.2.1. Kohlendioxid- (%) und Kohlenmonoxidegehalt (gr/nm<sup>3</sup> 13%  $\text{O}_2$ ).** Nach jeder Phase ist eine Verbesserung der CO-Mittelwerte festzustellen. Weichholz (WH) und Hackholz (HKH) wurden nur in der Erfassung des IST-Zustandes, in der Phase A und einmal in der Phase C eingesetzt.

In der "neuer Rost Phase C" liegt der mittlere CO-Austoss um 2 gr/nm<sup>3</sup> (1600 ppm) (13%  $\text{O}_2$ ). Dieser in einer Ladung inkl. Anfeuerungsphase ermittelter Wert kann als gut bezeichnet werden.

Die Verbrennungsluft-Verteilung im Bereich des Rostes spielt eine entscheidende Rolle, wie ein Vergleich von Phase B und Phase C im ABB. 6.2.1 zeigt.

Da Schwierigkeiten vor allem bei der Einstellung des Verbrennungsluft-Verhältnisses eingetreten sind, wurden Untersuchungen mit Weichholz und Hackholz nur in IST-Zustand, Phase A und (einmal) in Phase C durchgeführt.

Zwischen Hart- und Weichholz sind keine grossen Differenzen festzustellen.

Das Hartholz zeigte in den durchgeföhrten Versuchen gegenüber dem Weichholz einen leicht stabileren Verlauf.

Die Versuche zeigen aber klar, dass der Kessel für das Hackholz eine andere Luft-Einstellung benötigt.

Wird z. B. der Kohlenmonoxid-Verlauf analysiert, so ist festzustellen, dass bis zu 40 Minuten vom Start auffallend schlechte Werte (bis zu 50 gr/nm<sup>3</sup> 13% O<sub>2</sub>) erreicht werden, die vor allem auf einen Luftmangel zurückzuführen sind. In der zweiten Hälfte folgt normalerweise eine schöne ruhigere Phase, in der auch CO-Werte unter .5 gr/nm<sup>3</sup> (13% O<sub>2</sub>) zu beobachten sind.

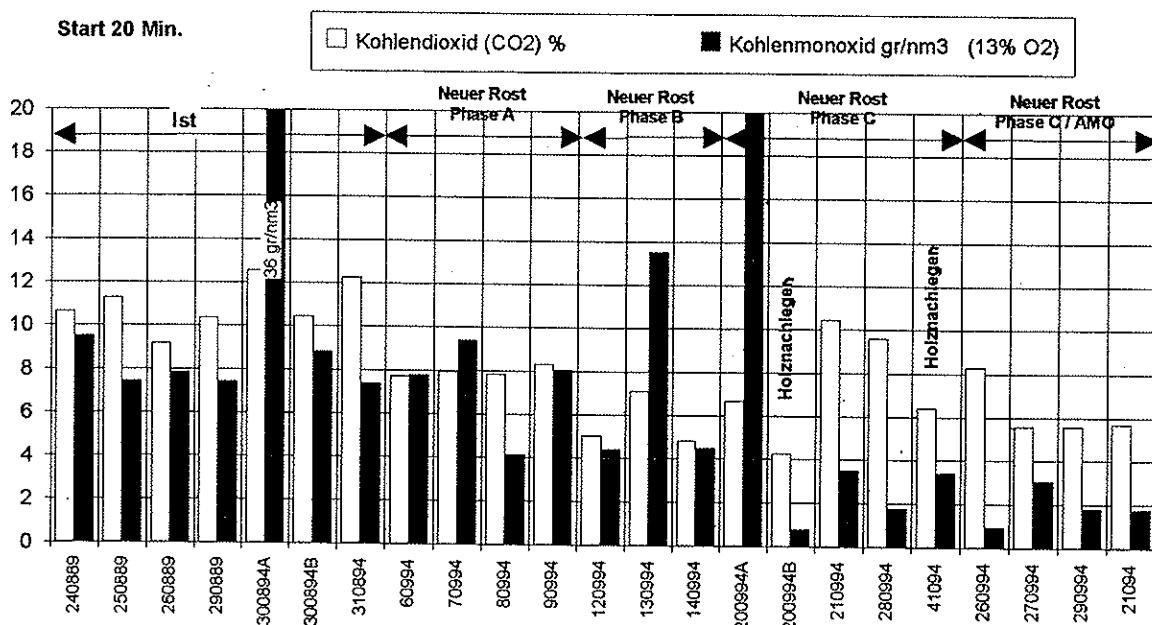
### 6.3 Restasche

Erreichte der CO<sub>2</sub>-Gehalt 2%, wurde das bleibende (auf dem Rost und im Aschenfall) Material abgewogen. Erwartet wurde, dass Dank der höheren Kohlenbett-Temperatur weniger Reste bleiben. Grosse Unterschiede sind aber nicht festzustellen, wie schon erwähnt. Die Messungen zeigen sogar, dass der alte Rost mit etwas besseren Werten abschneidet.

Das Vorhandensein von Schlacke (feste leichte Aschenformation) beim neuen Rost gibt Hinweise auf eine höhere Kohlenbetttemperatur.

### 6.4 das Anfeuermodul AMO

Das Anfeuermodul AMO (Siehe Anhang E) erhöht massgeblich die Bedienungsfreundlichkeit beim Anfeuern. Auch die Resultate zeigen überzeugende Schadsstoffwerte.



**ABB. 6.4.1. Mittelwerte von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Kohlenmonoxid (CO normiert 13% O<sub>2</sub>) in der Startphase (erste 20 Minute). Mit dem Anfeuermodul AMO und beim Holznachlegen werden vergleichbare CO-Werte erreicht.**

Im ABB. 6.4.1. sind die Mittelwerte von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Kohlenmonoxid (CO normiert 13% O<sub>2</sub>) in den ersten 20 Minuten ersichtlich. In 3 Versuche von 4 liegen die normierte CO-werte unter 2 gr/nm<sup>3</sup> (1600 ppm). Im Durchschnitt sind die AMO-Schadsstoffwerte mit denen vergleichbar, die beim

Holznachlegen erreicht worden sind. Abschliessend können wir sagen, dass das Anfeuermodul AMO für diesen Kesseltyp geeignet ist.

## 7. Offene Fragen

Nach dem Abschluss dieses Projektes bleiben noch offene Fragen, die mit systematischem Vorgehen beantwortet werden sollten.

Diese Fragen betreffen:

- die Einstellung des Luftverhältnisses beim Hackholz
- die Wirkung der Sturmlüftung beim Anfeuern
- die Auswirkung auf Heizkessel für 1 m Spälen
- die Abstimmung der Verbrennungsluft-Regelung auf den Wabenrost

## 8. Danksagung

Wir wollen uns bei allen Beteiligten für die gute Zusammenarbeit bedanken:

Herrn Ch. Völlmin der uns vor allem in der Vorbereitungsphase tatkräftig zur Seite stand.

Herrn A. Jenni, der als Projekt-Begleiter unseren besonderen Dank verdient, da er mit seinem vielen Anregungen und Ideen einen wesentlichen Anteil zum Erfolg des Projektes beigetragen hat.

Lopper Mitarbeiter für etliche geleistete Überstunden.

## **ANHANG**

### **A Mittelwerte: Tabelle**

Ist-Zustand  
Neuer Rost Phase A  
Neuer Rost Phase B  
Neuer Rost Phase C  
Neuer Rost Phase C / Anfeuermodul

### **B Mittelwerte: graphische Darstellung**

Kohlendioxid und Kohlenmonoxid  
Mittlere Leistung und Wirkungsgrad  
Kohlenwasserstoffe und Stickmonoxid  
Kohlendioxid und Kohlenmonoxid in der Startphase ( 20 Min.)

### **C Darstellung versus Zeit**

Abgastemperatur (TRG), Wirkungsgrad (ETA) & Brennstoffleistung (PK),  
Luftüberschuss (LAMBDA), Abgasvolumenstrom (VRGK), Kohlendioxid (CO2),  
normierter Kohlenmonoxid (COn13), normierter Kohlenwasserstoffe (CxHyn),  
normierter Stickstoff (NOn13)  
versus  
Zeit (alle Versuche)

### **D Korrelationen**

normierter Stickstoff (NOn13), Kohlendioxid (CO2),  
normierter Kohlenmonoxid (COn13)  
versus  
Luftüberschuss (alle Versuche)

### **E Anfeuermodul**

Zeichnung

### **F Messinstallation**

Geräteliste (Messbereich, -genauigkeit, -prinzip)  
Schema

### **G Berechnungsverfahren**

Mittelwertbildung  
Normierung

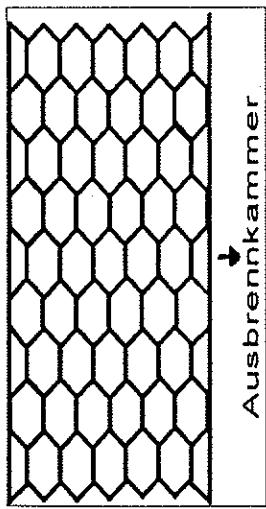
**ANHANG A:** Mittelwerte Tabelle

## Ist-Zustand

(alter Rost)

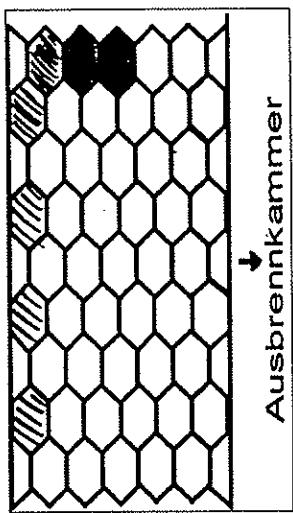
Versuch	240889	250889	260889	280889	300894A	300894B	310894
Bemerkungen							
Holzart		Hartholz	Hartholz	Weichholz	Weichholz	Hackholz	Hackholz
Brennstoff							
Holzwolle	kg	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Anfeuerholz	kg	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
Brennholz	kg	36.00	36.00	26.00	21.00	19.57	21.00
Brennstofffeuchtigkeit	atm%	15	15	14	12	12	12
Restasche & -kohle	kg	0.70	0.63	0.65	0.71	0.44	0.40
Brennstoffumsatz		Gesamt	Start	Gesamt	Start	Gesamt	Start
Brenndauer	Min	233	20	232	20	188	20
Brennstoffumsatz	kg/h	10.04	10.09	9.61	9.26	20.87	11.88
Energieinhalt einer Füllung	kWh	163		163	128	104	98
Mittlere Leistung	kW	42		42	43	90	51
Verbrennungswirkungsgrad	%	84.4		85.2	82.0	82.7	73.4
Rauchgasanalyse							
Aufschluss							
Aufschluss		2.25	1.86	2.34	2.38	1.46	1.69
Luftüberschuss	%	12.02	9.92	10.11	8.90	12.52	11.15
Restsauerstoff	%	7.60	10.64	9.18	11.28	6.93	9.20
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	gr/nm <sup>3</sup>	6.40	9.52	5.00	7.44	8.27	7.88
Kohlenmonoxid Norm CO (13% O <sub>2</sub> )	gr/nm <sup>3</sup>	272	836	268	784	702	971
Kohlenwasserstoffe CH <sub>n</sub> Norm (13% O <sub>2</sub> ) mg/nm <sup>3</sup>	mg/nm <sup>3</sup>	40	62	19	35	7	31
Stickmonoxid NO Norm (13% O <sub>2</sub> )	mg/nm <sup>3</sup>						

# Neuer Rost Phase A



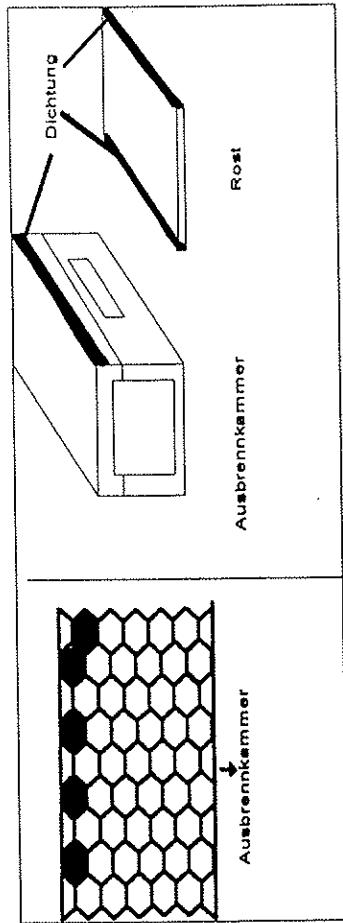
Versuch	60994	70994	80994	90994
Bemerkungen				
Holzart	Weichholz	Weichholz	Weichholz	Hartholz
Brennstoff				
Holzwolle	kg	0,50	0,50	0,50
Anfeuerholz	kg	2,50	2,50	2,50
Brennholz	kg	26,00	26,00	37,00
Brennstoffflächigkeit	atm%	14	14	15
Restasche & -kohle	kg	1,00 *	0,94	0,80
Brennstoffumsatz				
Brenndauer	Min	170	20	177
Brennstoffumsatz	kg/h	10,24	9,83	9,68
Energieinhalt einer Füllung	kWh	127	127	167
Mittlere Leistung	kW	45	43	40
Verbrennungswirkungsgrad	%	79,3	72,4	80,9
Rauchgasanalyse				
Ausgasen				
Luftüberschuss		2,58	2,85	2,27
Restsauerstoff	%	13,28	12,89	14,04
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	%	6,31	7,71	5,80
Kohlenmonoxid Norm CO (13% O <sub>2</sub> )	gr/m <sup>3</sup>	7,76	7,79	9,84
Kohlensäuerstoffe CH Norm (13% O <sub>2</sub> ) mg/m <sup>3</sup>		899	1544	1123
Stickmonoxid NO Norm (13% O <sub>2</sub> )	mg/m <sup>3</sup>	32	79	11

## Neuer Rost Phase B



Versuch	120994	130994	140994
Bemerkungen	7_Elem. weniger	5_Elem. weg	5_Elem. weg
		5Elem bei Düse zu	5Elem bei Düse zu
Holzart	Hartholz	Hartholz	Hartholz
<b>Brennstoff</b>			
Holzölle	kg	0,50	0,50
Afetuerholz	kg	2,50	2,50
Brennholz	kg	36,00	36,00
Brennstofffeuchtigkeit	atro%	15	15
Restasche & -kohle	kg	1,00 *	0,70
<b>Brennstoffumsetsz</b>			
Brenndauer	Min	172	20
Brennstoffumsatz	kg/h	13,60	14,44
Energieinhalt einer Füllung	kWh	161	163
Mittlere Leistung	kW	56	60
Verbrennungswirkungsgrad	%	76,1	79,0
<b>Rauchgasanalyse</b>			
Luftüberschuss		2,86	2,65
Restsauerstoff	%	13,96	15,08
Kohlendioxid (CO2)	%	5,94	5,03
Kohlenmonoxid Norm CO (13% O2)	gr/nm3	3,36	4,43
Kohlenwasserstoffe CH Norm (13% O2 mg/nm3)		398	1112
Stickmonoxid NO Norm (13% O2)	mg/nm3	8	9
		52	52
		7	7
		61	61

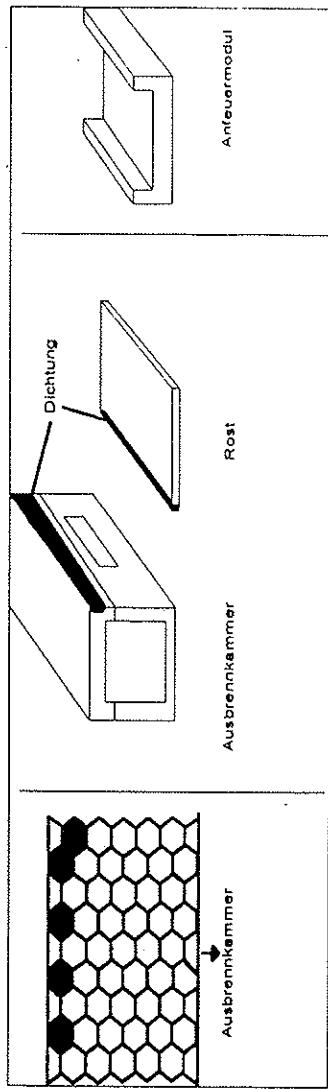
## Neuer Rost Phase C



Versuch	200994A	200994B	210994	280994	41094
Bemerkungen		Holz nachlegen Ende CO2=4%	Ohne Sturmöffnung	Sturmöffnung	Holz nachlegen
Holzart	Hackholz	Hartholz	Hartholz	Hartholz	Hartholz
Brennstoff					
Holzholz	kg	0,50		0,50	0,50
Anfeuerholz	kg	2,50		2,50	2,50
Brennholz	kg	21,00	34,30	36,00	34,76
Brennstofffeuchtigkeit	atm%	12	15	15	15
Restasche & Kohle	kg	1,00 *	1,00 *	1,00 *	0,38
Brennstoffsatz		Gesamt	Start	Gesamt	Start
Brenndauer	Min	92	20	226	20
Brennstoffsatz	kg/h	15,65		9,11	11,70
Energieinhalt einer Füllung	kWh	106	149	170	168
Mittlere Leistung	kW	69	40	51	42
Verbrennungswirkungsgrad	%	80,7	85,0	84,0	83,9
Rauchgasanalyse					
Luftüberschuss		3,89	3,41	2,60	2,24
Restsauerstoff	%	16,00	11,94	14,01	15,75
Kohlendioxid (CO2)	%	4,00	6,67	6,00	4,28
Kohlenmonoxid Norm CO (13% O2)	gr/nm3	14,24	22,13	3,40	0,77
Kohlenwasserstoffe CH Norm (13% O2 mg/nm3		1674	3326		
Stickmonoxid NO Norm (13% O2)	mg/nm3	139	80	70	28

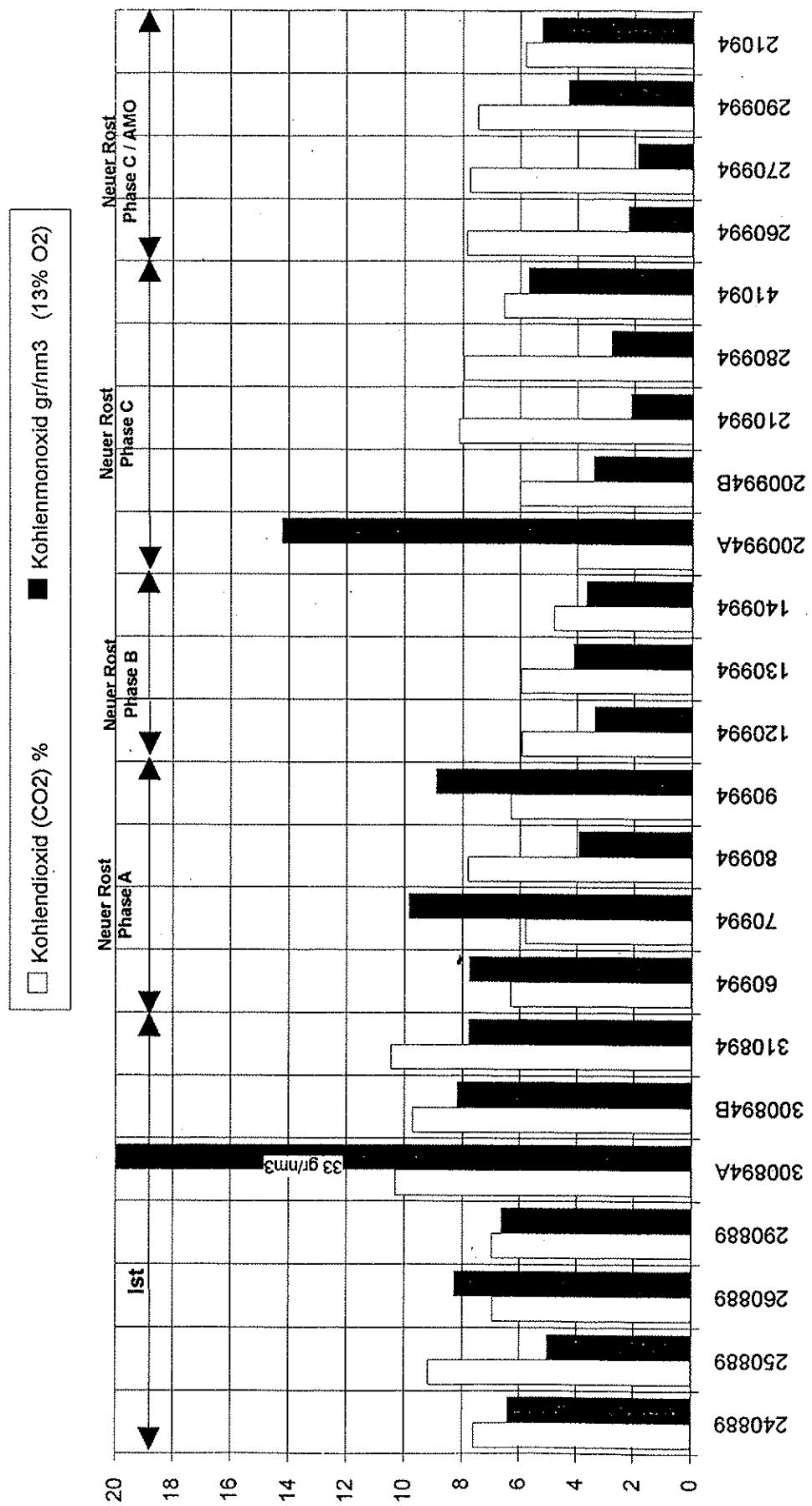
# Neuer Rost Phase C

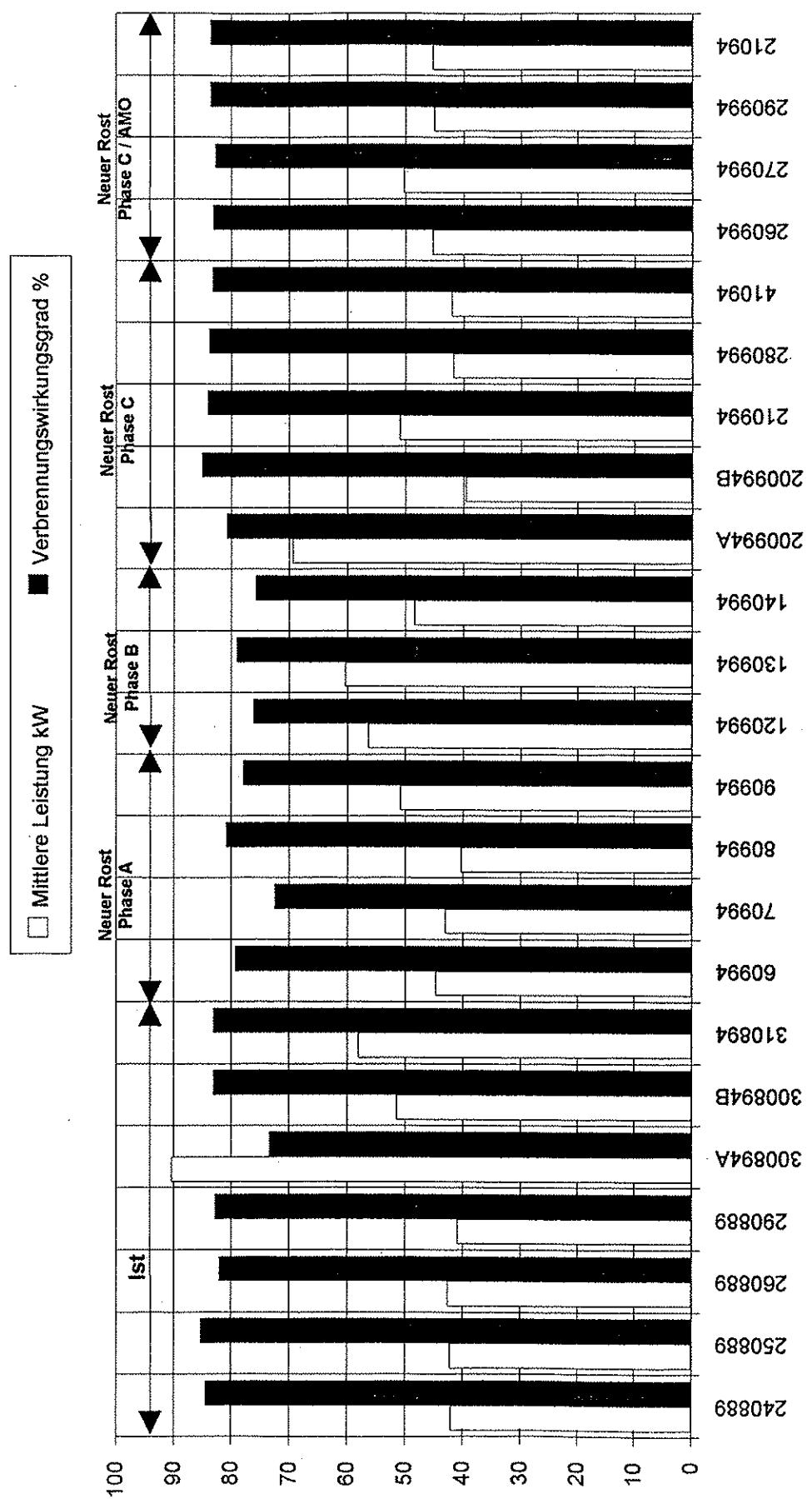
## Anfeuermodul



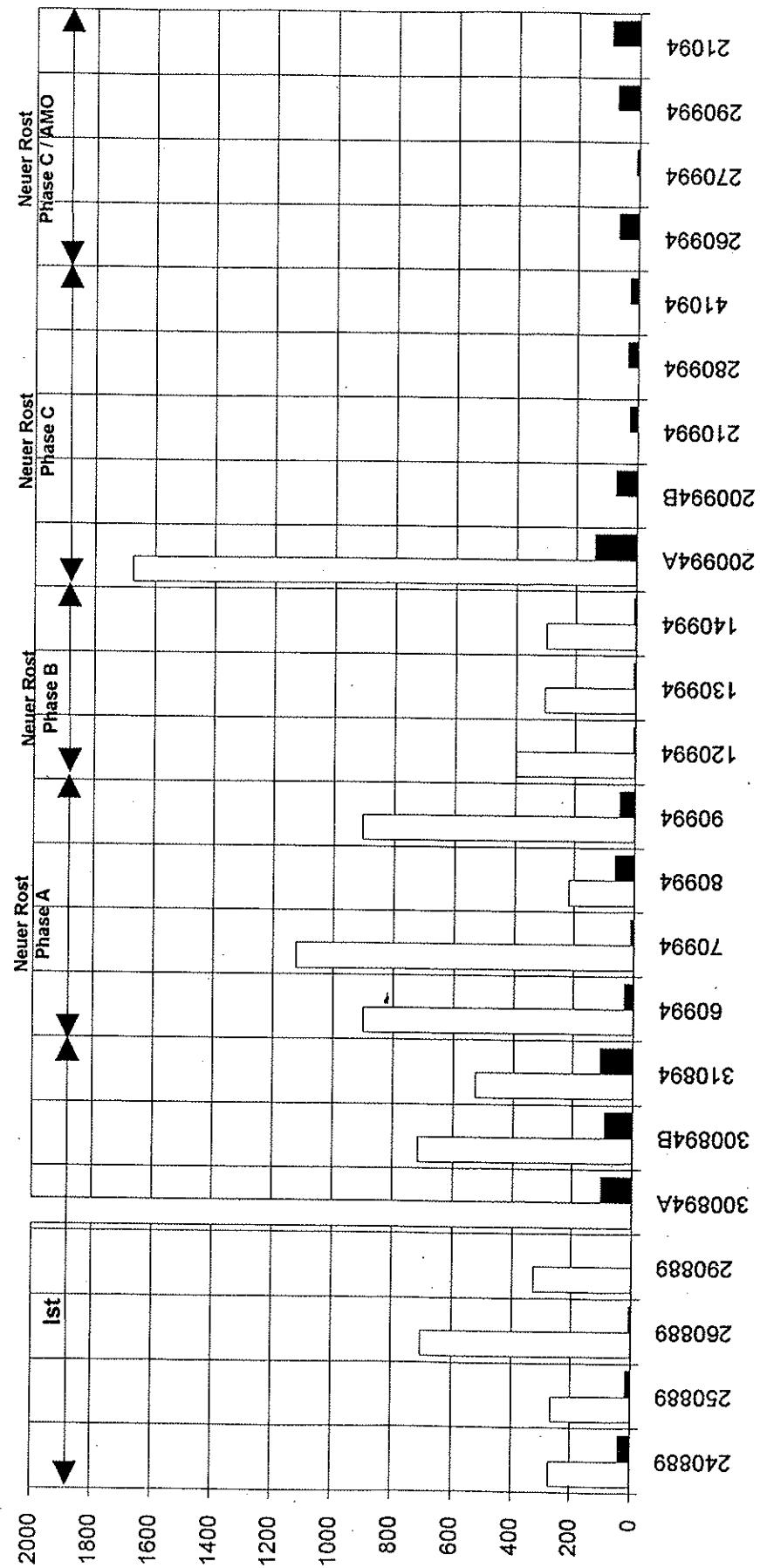
Versuch	260994	270994	290994	21094
Bemerkungen	Anfeuermodul	Anfeuermodul	Anfeuermodul	Anfeuermodul
Holzart	Hartholz	Hartholz	Hartholz	Hartholz
Brennstoff				
Holzwolle	kg			0,00
Anfeuermholz	kg	1,00	~ 1,00	1,00
Brennholz	kg	39,31	39,30	42,13
Brennstofffeuchtigkeit	atr.-%	15		15
Resttasche & Kohle	kg	1,00 *	1,18	1,16
Brennstoffsatz	Gesamt	Statt	Gesamt	Statt
Brenndauer	Min	233	20	250
Brennstoffsatz	kg/h	10,38	9,67	10,35
Energieinhalt einer Füllung	kWh	176	209	188
Mittlere Leistung	kW	45	50	45
Verbrennungswirkungsgrad	%	83,2	82,8	83,6
Rauchgasanalyse				
Luftüberschuss		2,54	2,50	3,38
Restsauerstoff	%	12,90	12,57	13,00
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	%	7,85	8,27	7,76
Kohlenmonoxid Norm CO (13% O <sub>2</sub> )	g/m <sup>3</sup>	2,22	0,94	1,89
Kohlenwasserstoffe CH <sub>n</sub> Norm (13% O <sub>2</sub> ) mg/m <sup>3</sup>				
Stickmonoxid NO Norm (13% O <sub>2</sub> ) mg/m <sup>3</sup>		67	126	9
			5	72
				115
				90
				146

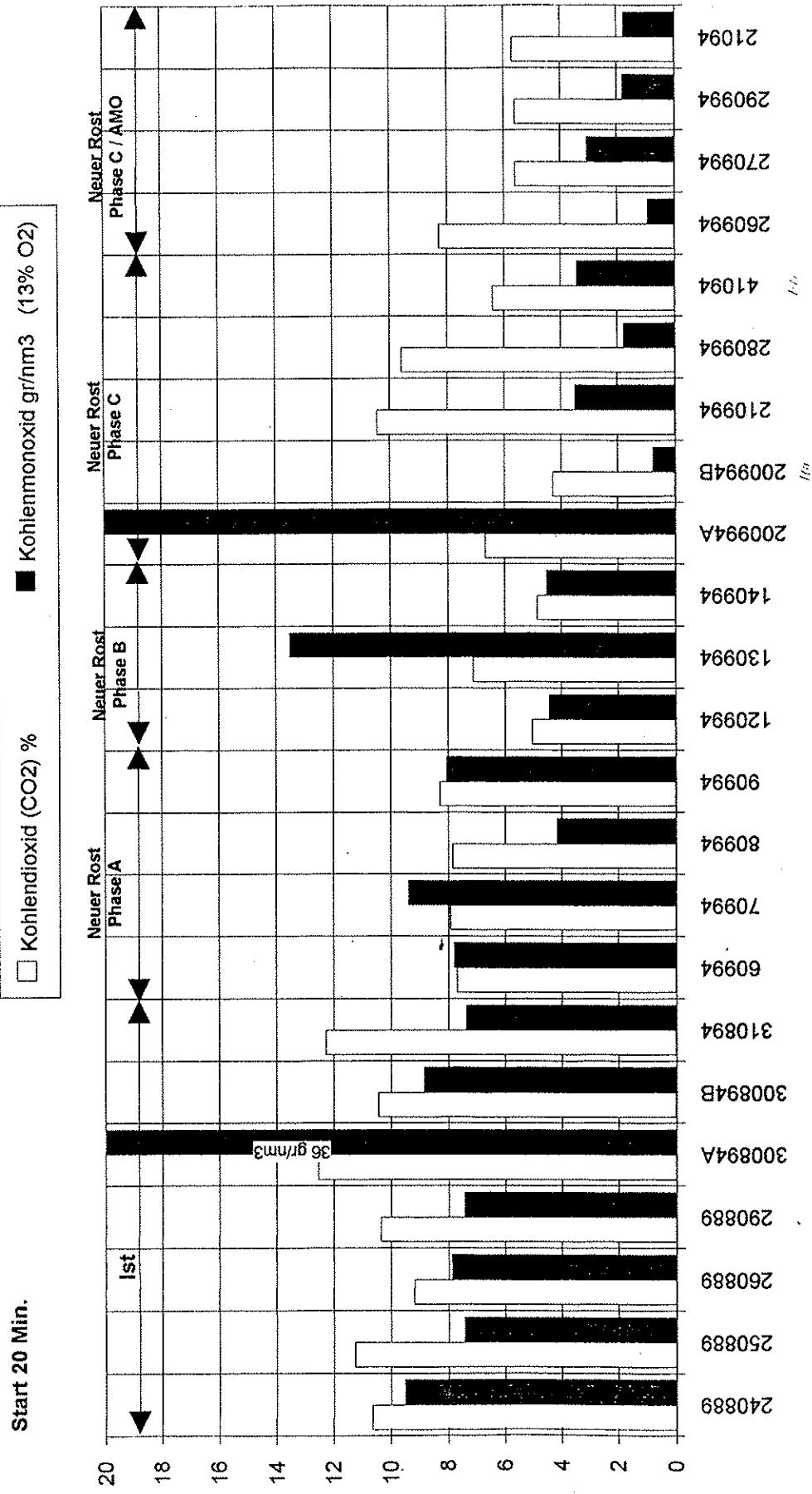
**ANHANG B:** Mittelwerte graphische Darstellung





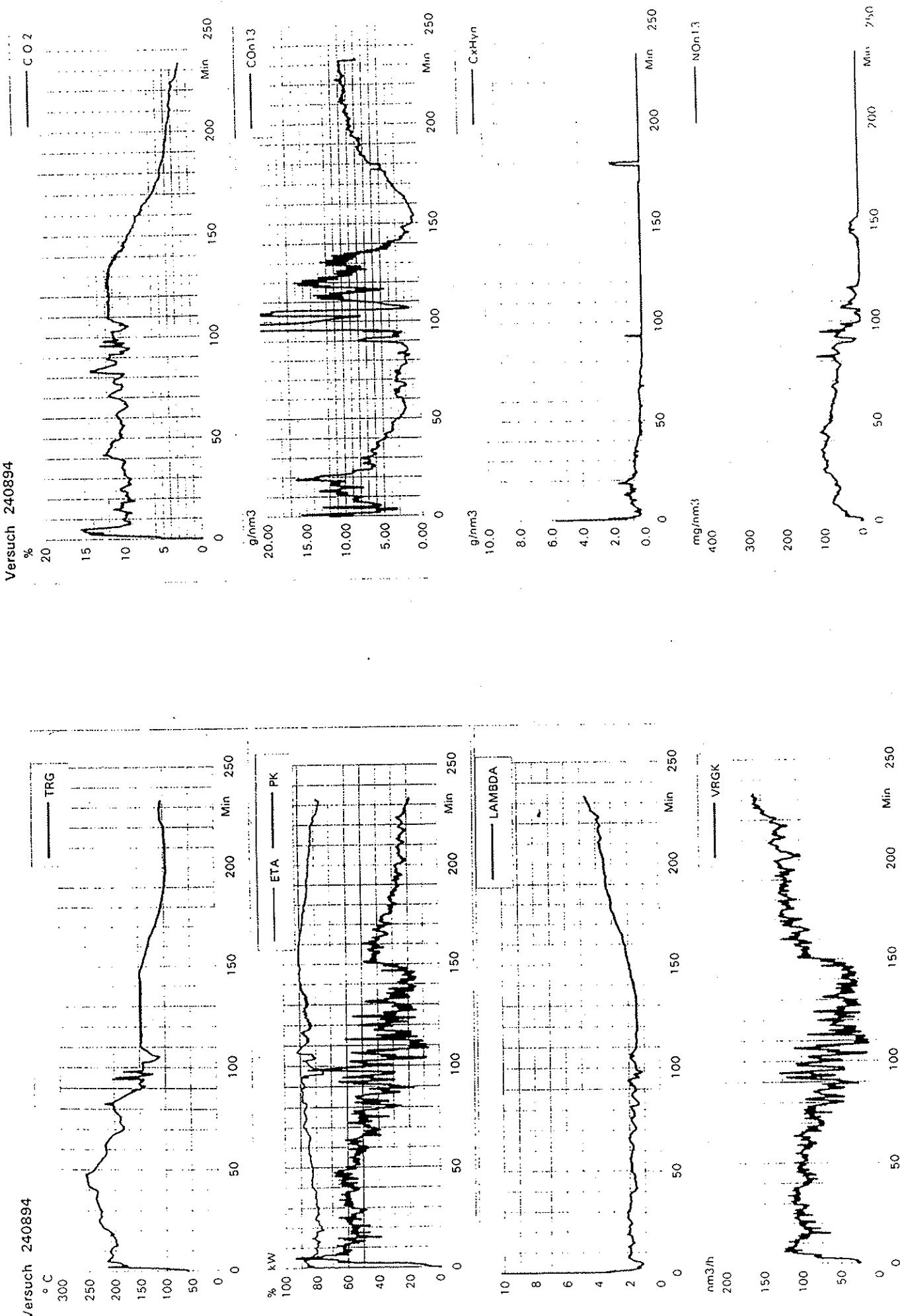
□ Kohlenwasserstoffe mg/m<sup>3</sup> (13% O<sub>2</sub>) ■ Stickmonoxid mg/m<sup>3</sup> (13% O<sub>2</sub>)



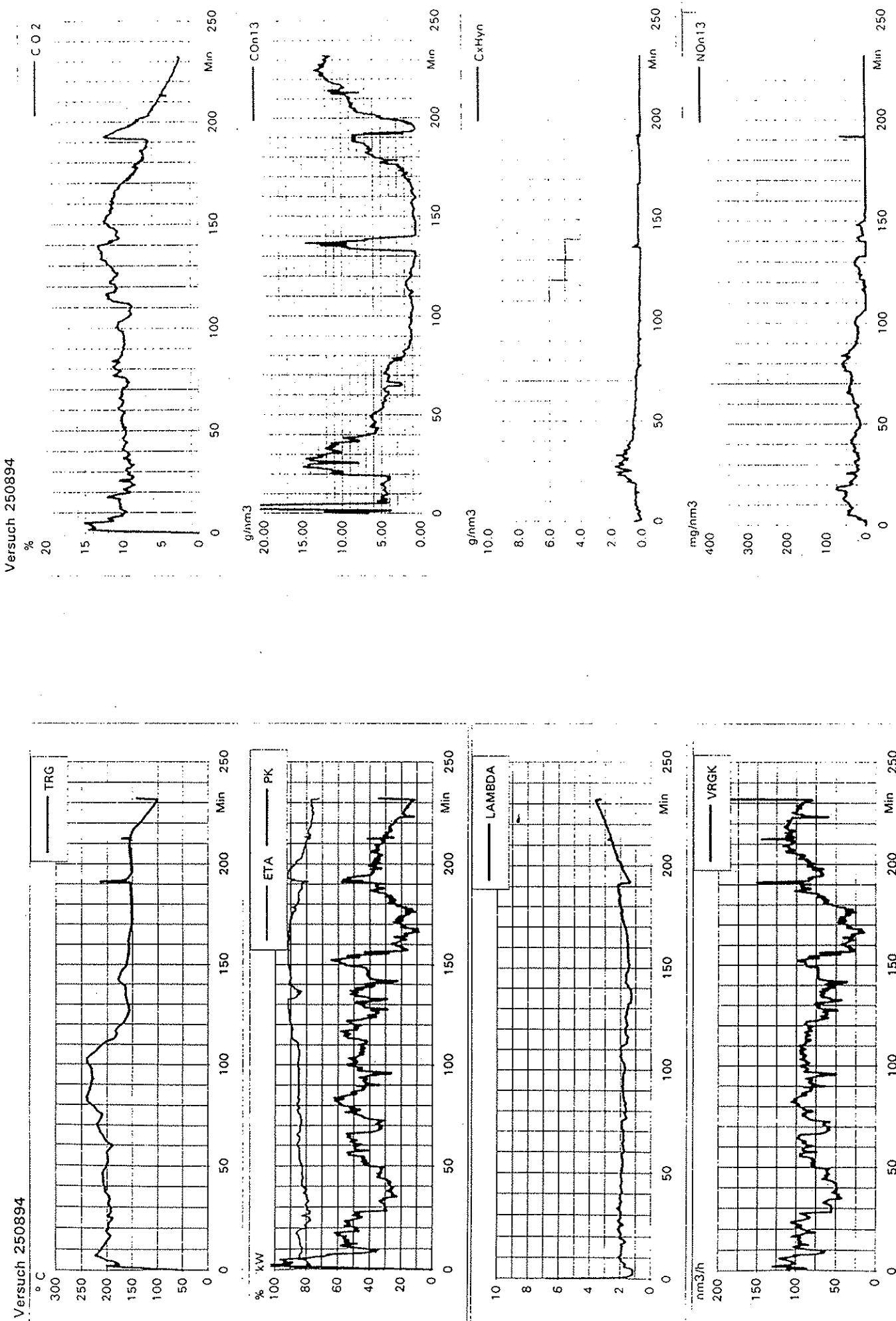


**ANHANG C:** Darstellung versus Zeit

## Versuch 240894



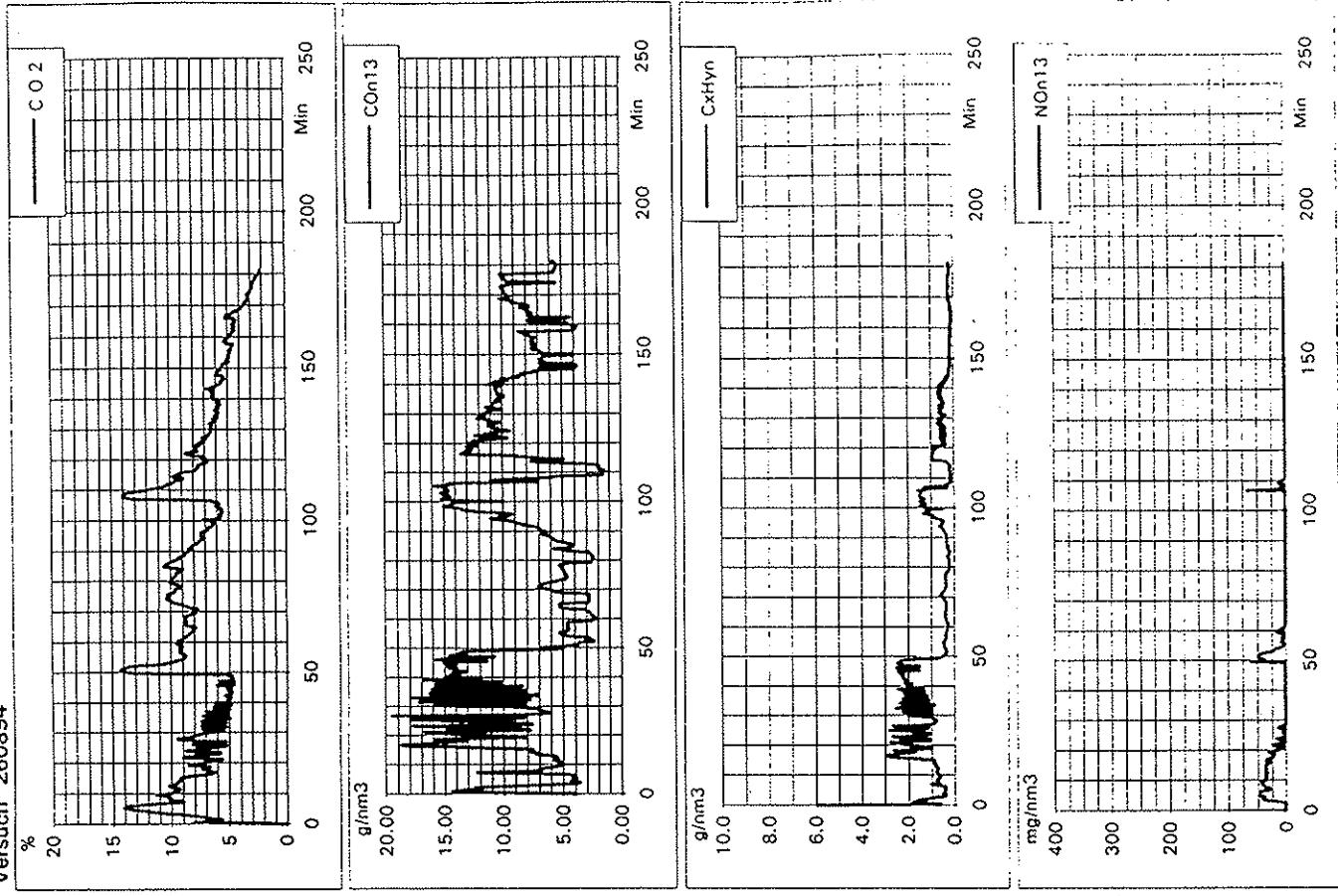
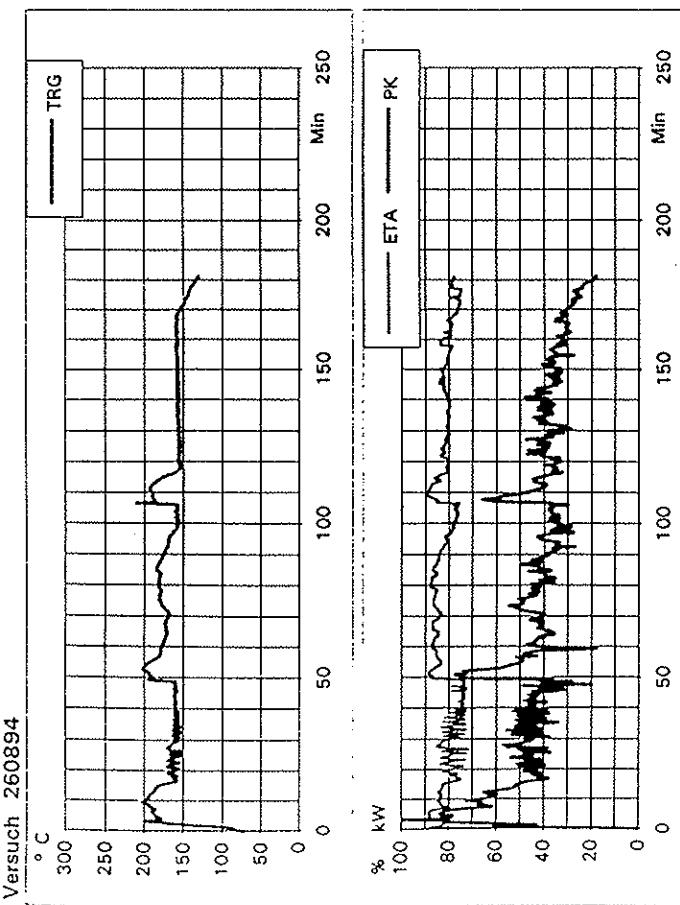
Versuch 250894



ETA: Wirkungsgrad. P: Leistung. LAMBDA: Luftüberguss.

1ST Hartholz

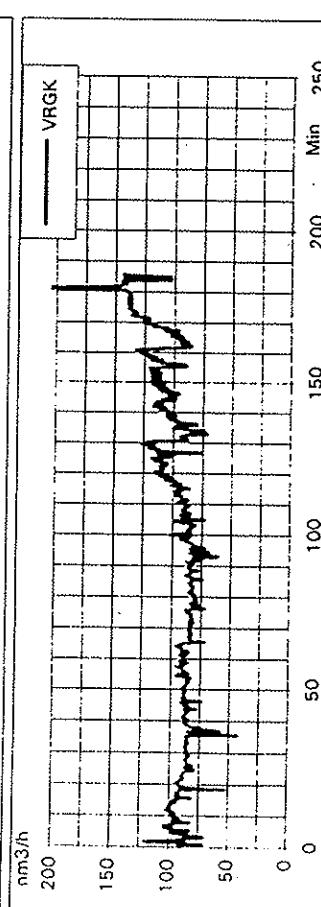
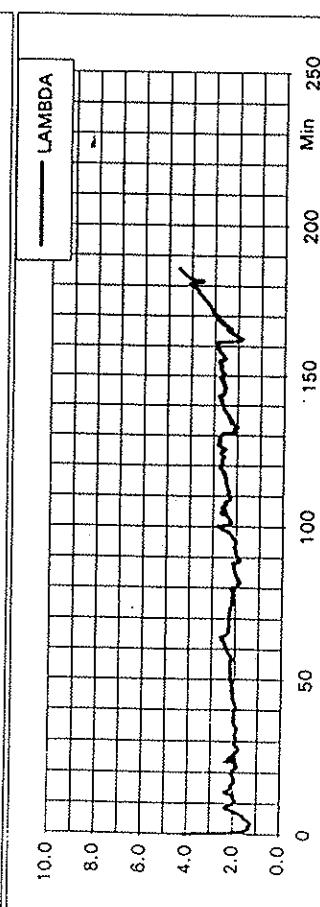
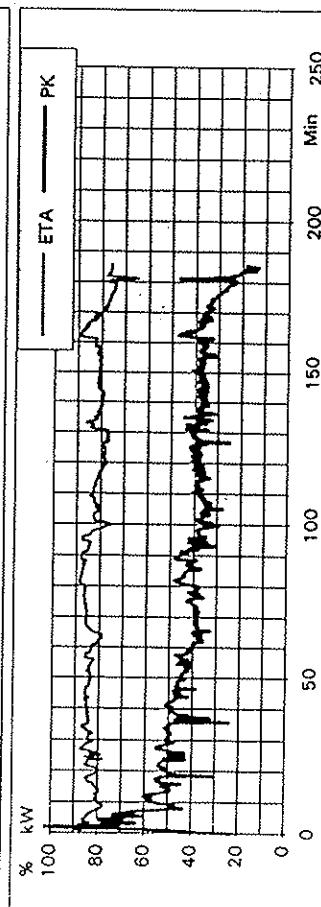
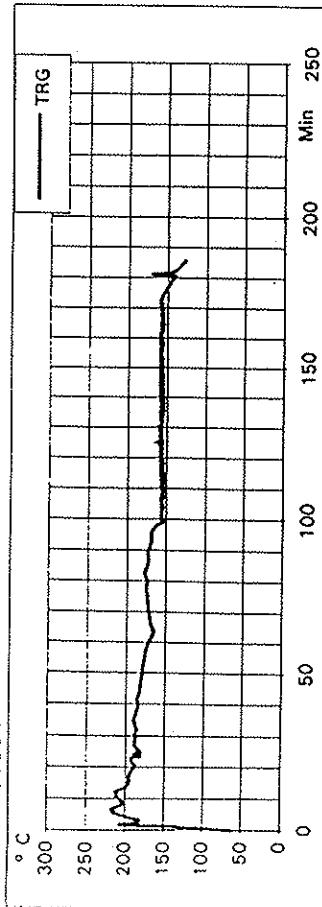
## Versuch 260894



ETA: Wirkungsgrad; P: Leistung; LAMBDA: Luftüberschuss

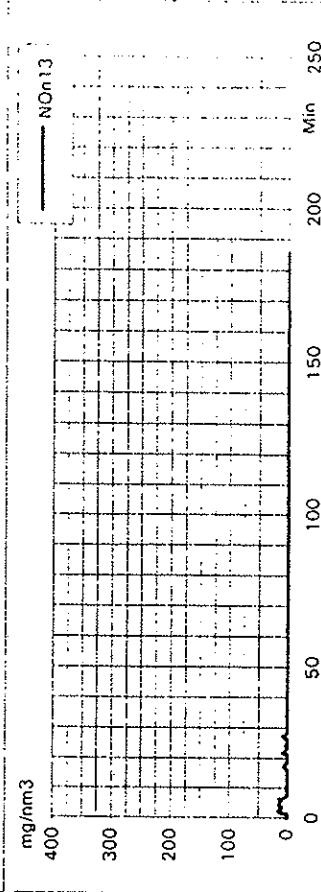
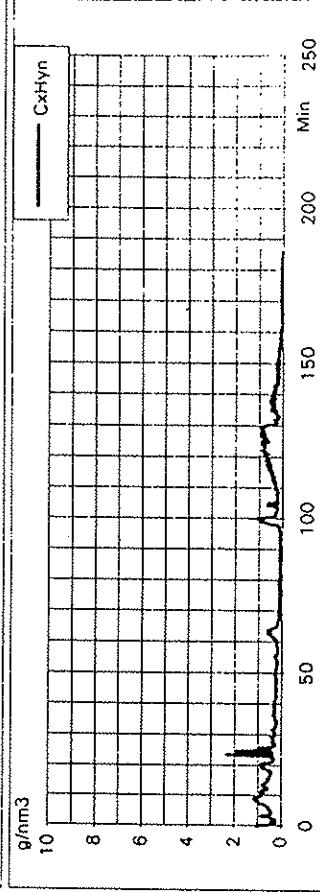
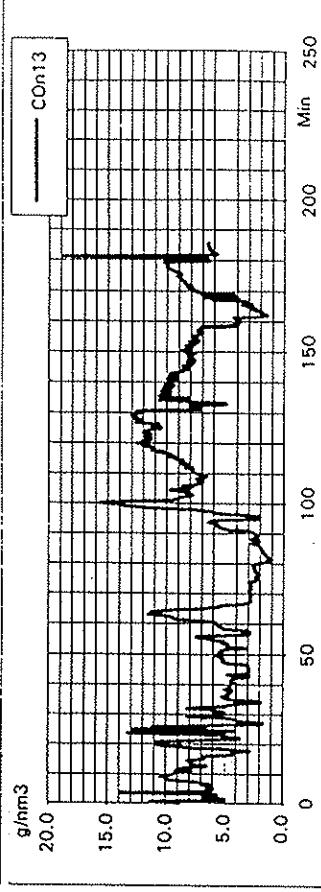
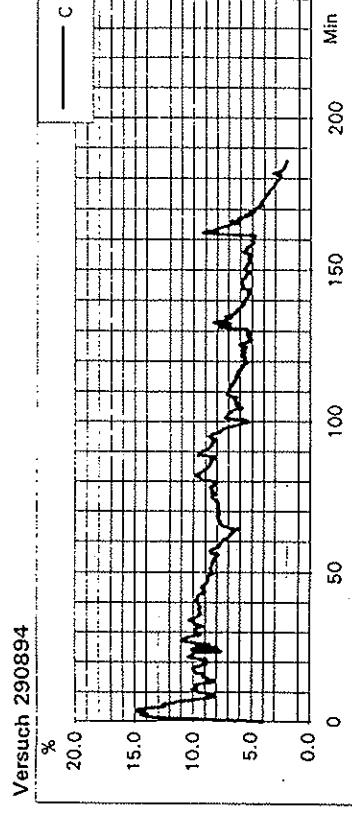
## Versuch 290894

## Versuch 290894

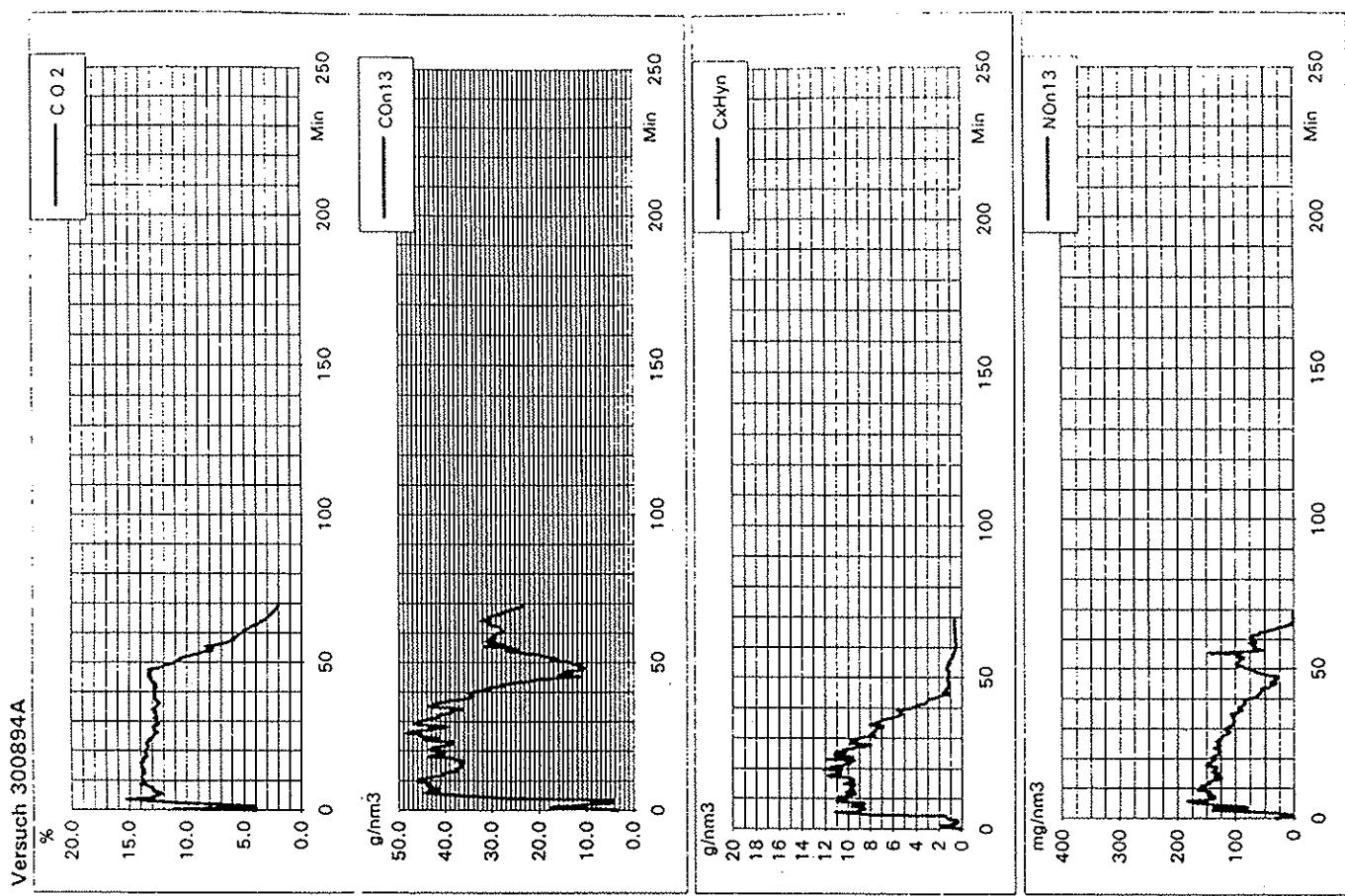


ETA: Wirkungsgrad, P: Leistung, LAMBDA: Luftüberschuss

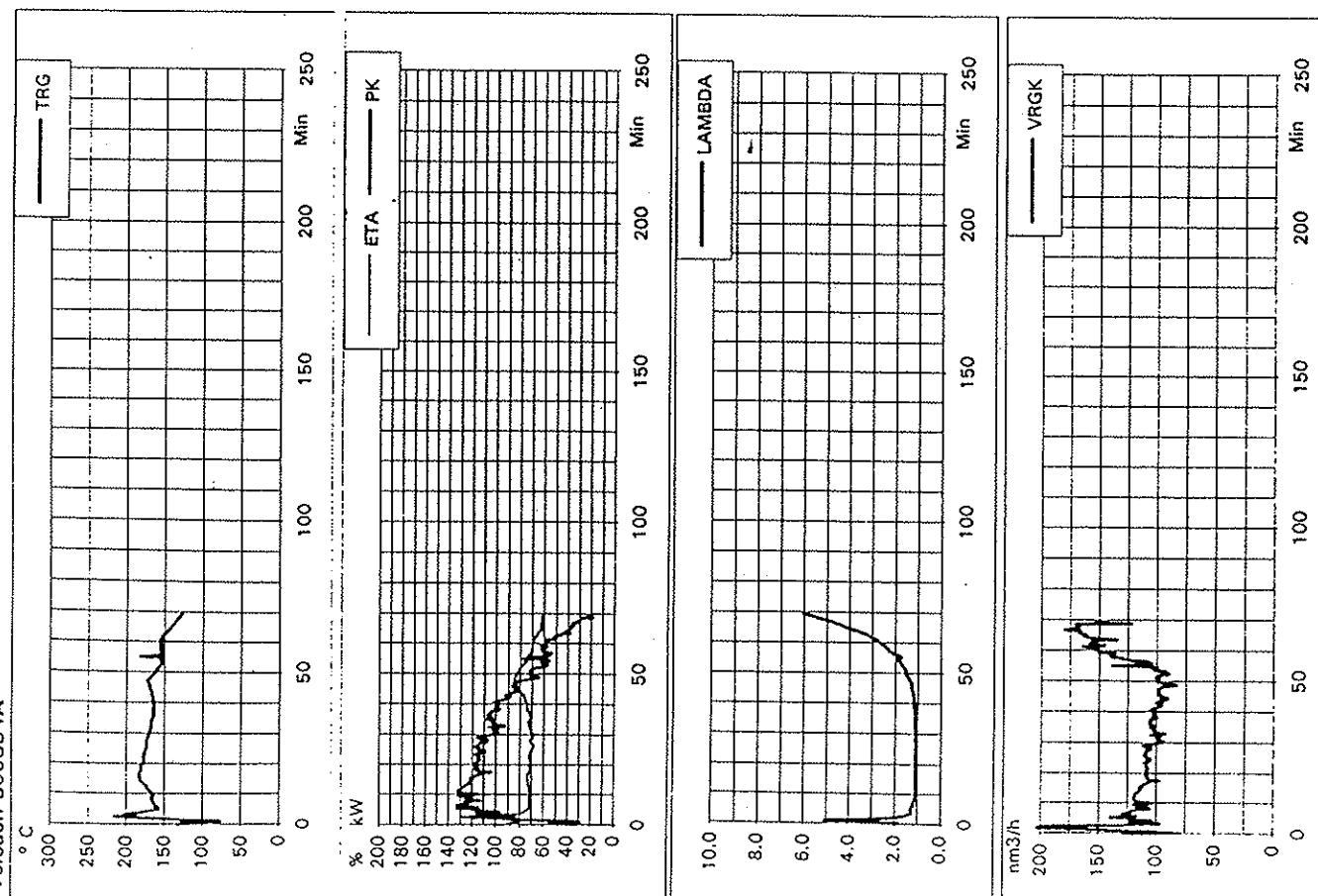
IST Weichholz



## Versuch 300894A

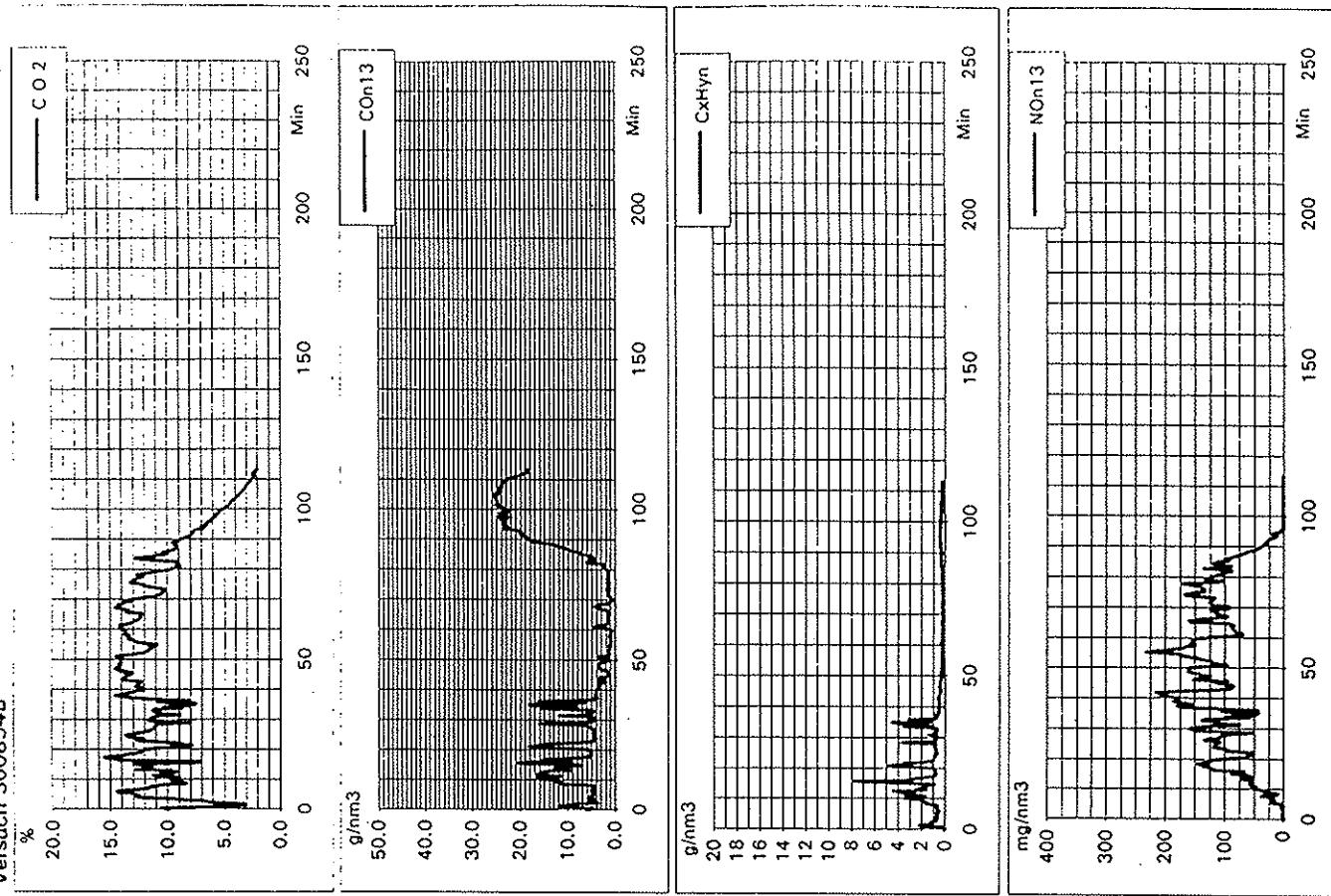


## Versuch 300894A

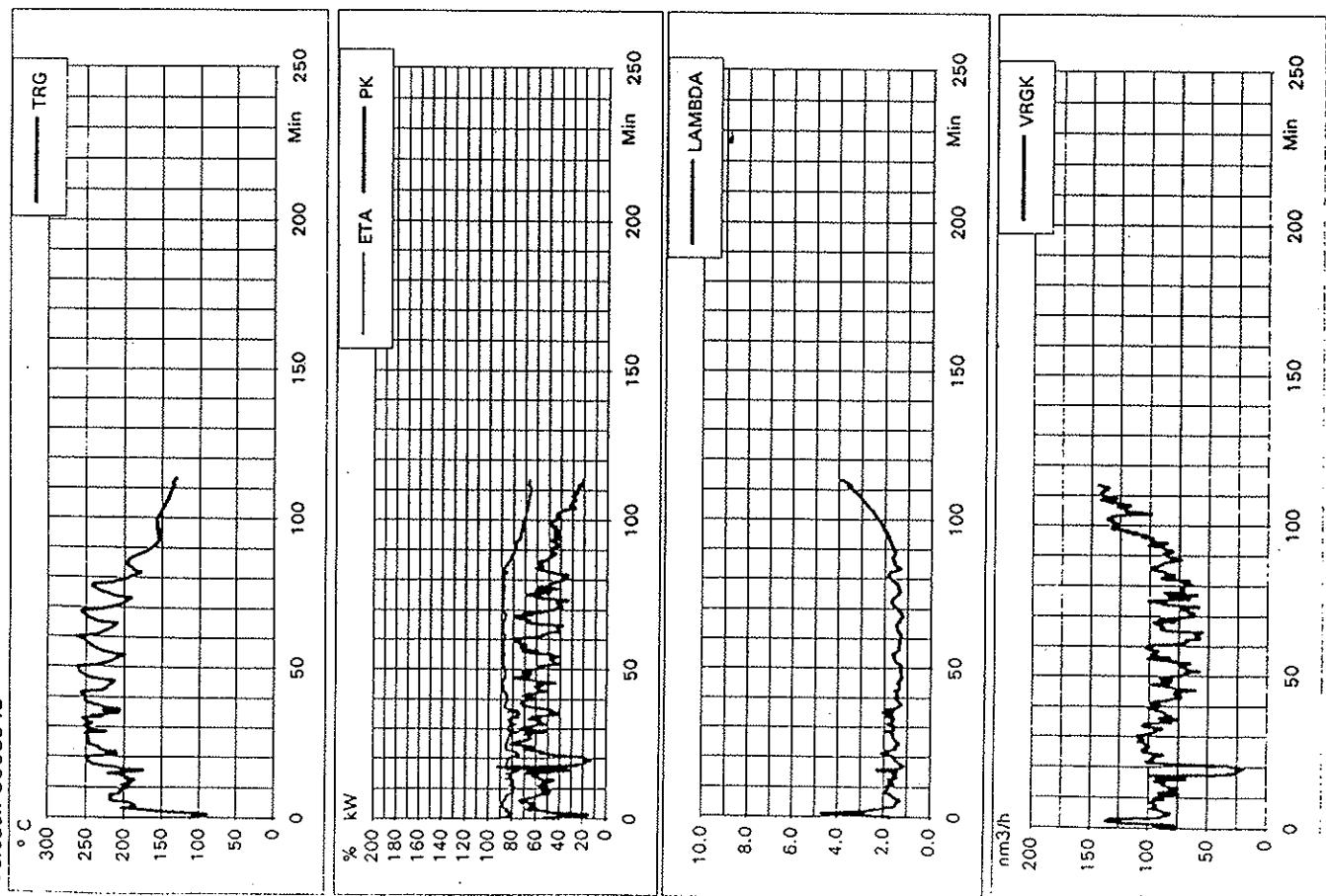


# IST Hackholz

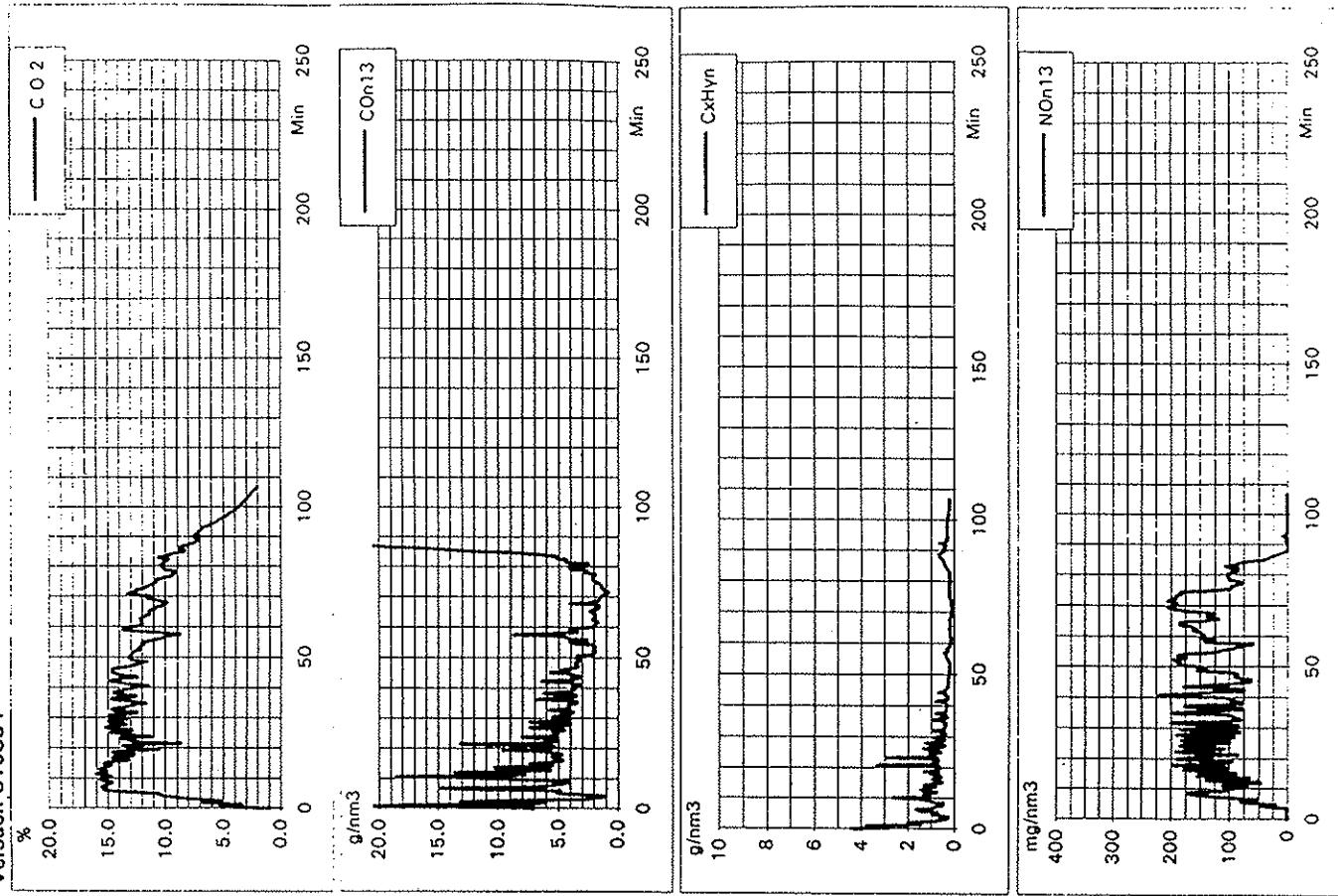
Versuch 300894B



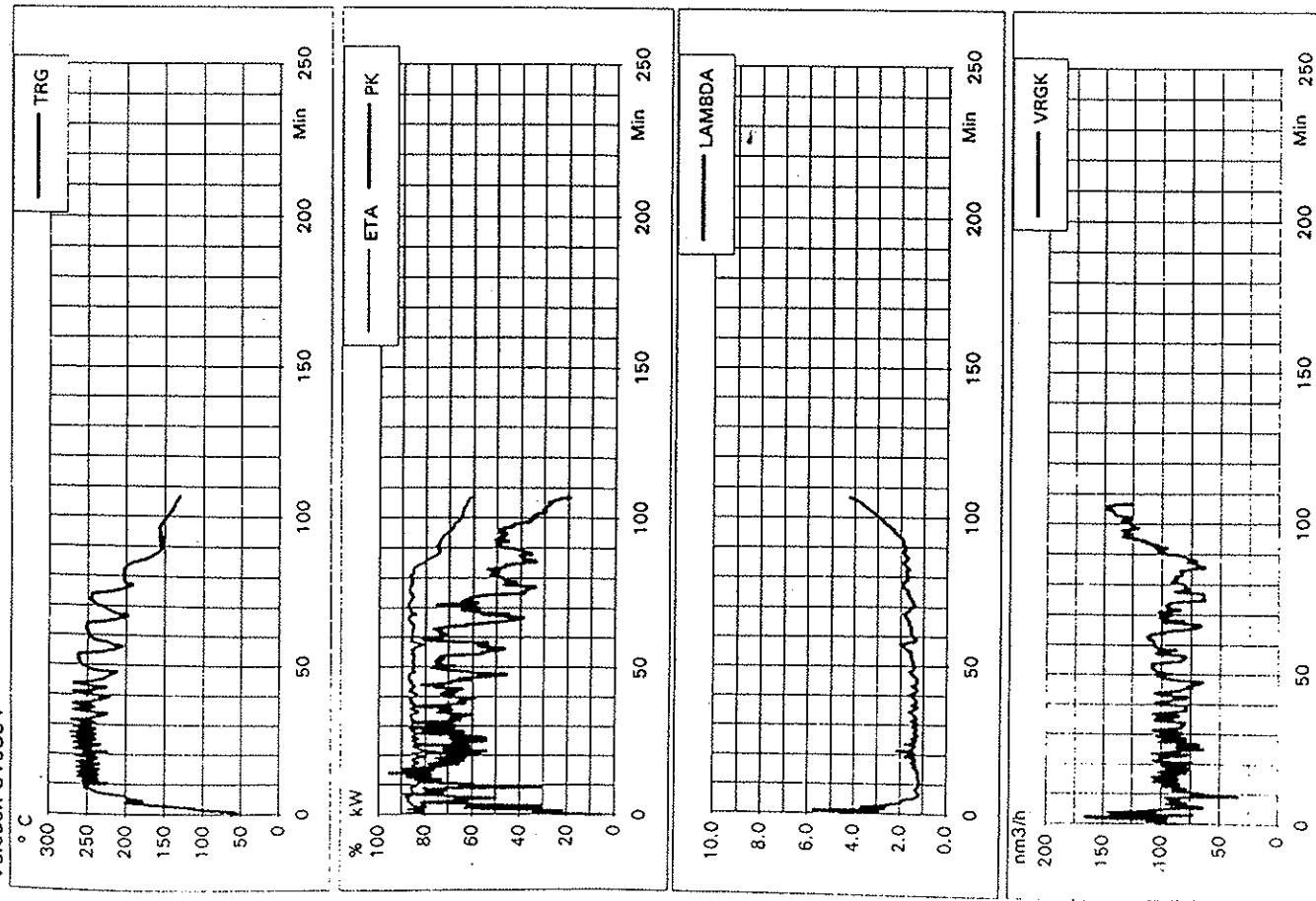
Versuch 300894B



Versuch 310894

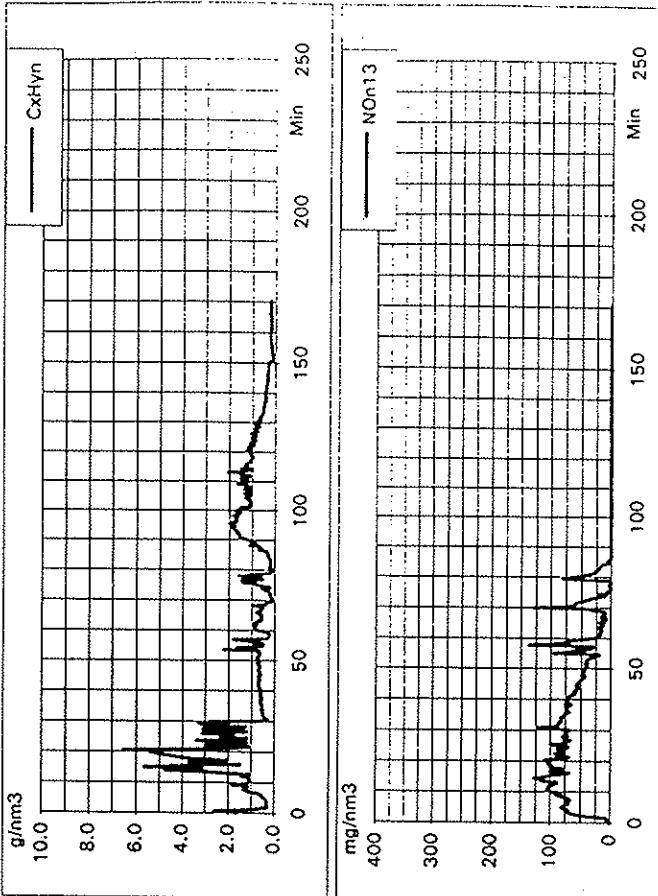
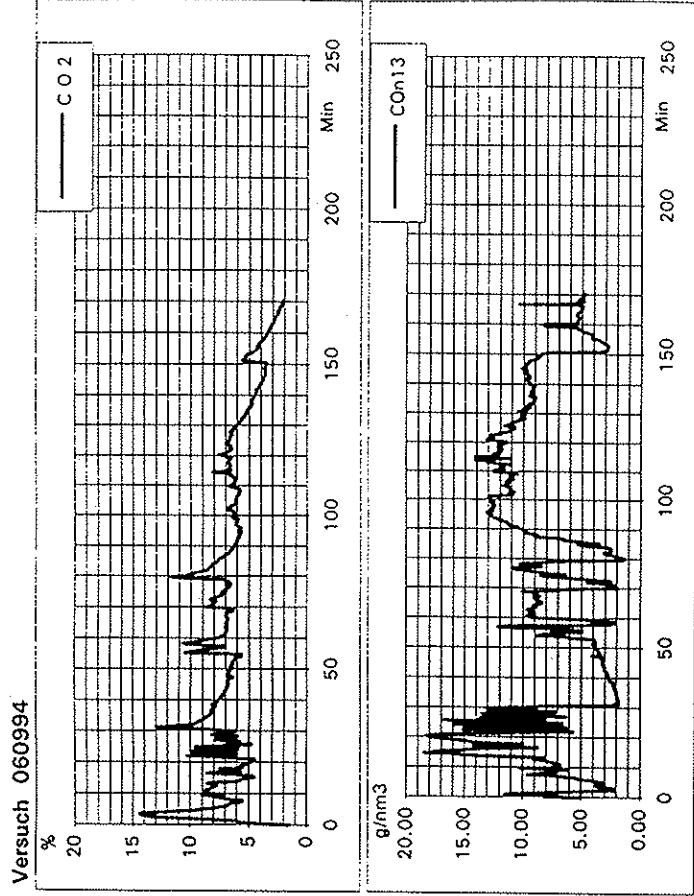
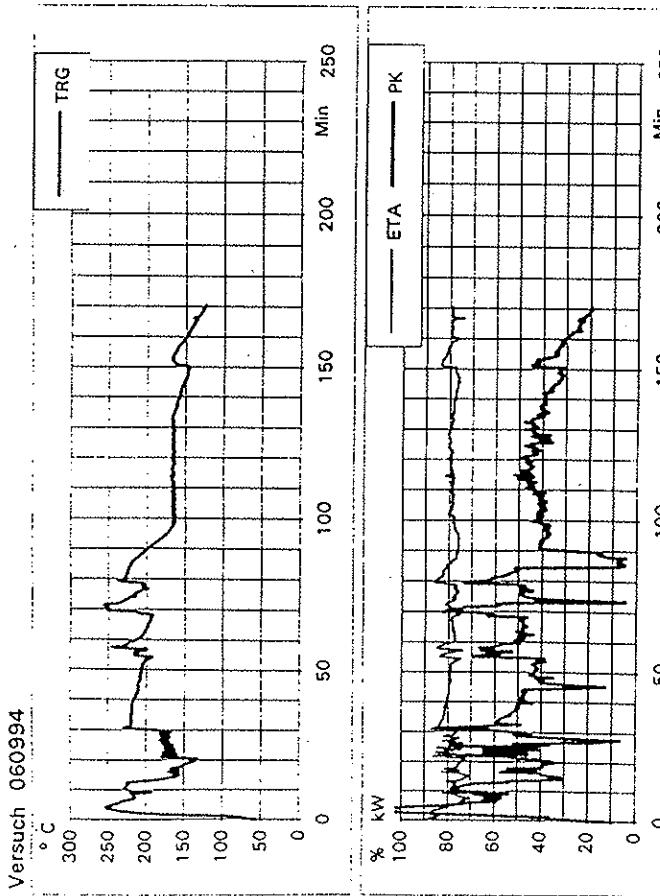


Versuch 310894



## Neuer Rost Phase A Weichholz

Versuch 060994

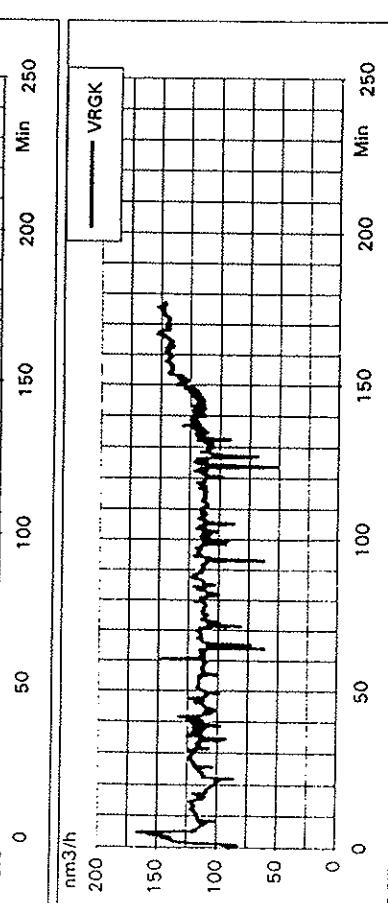
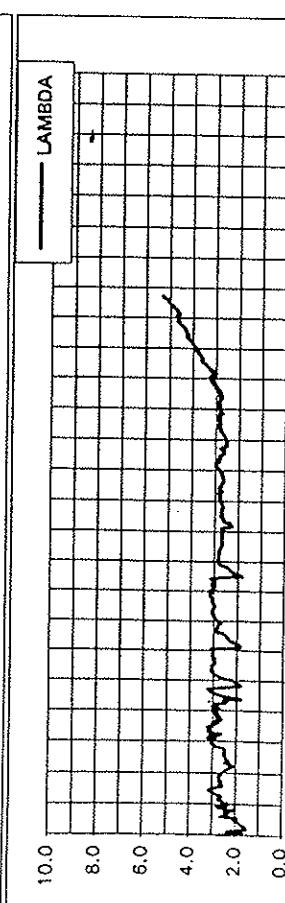
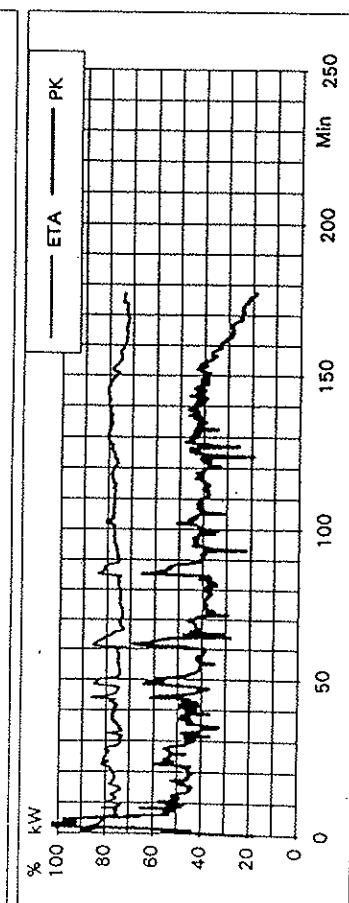
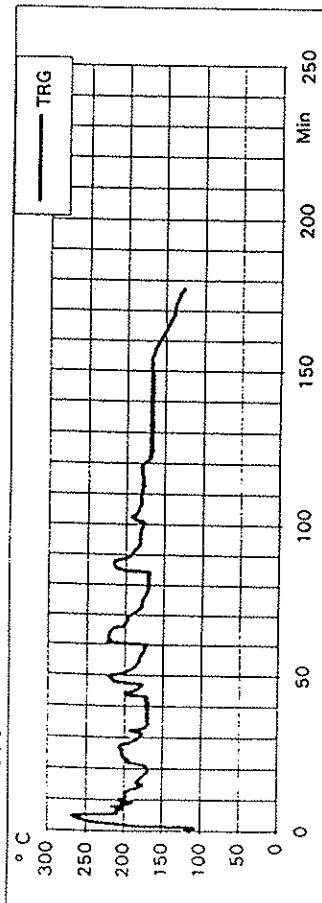


Versuch 060994

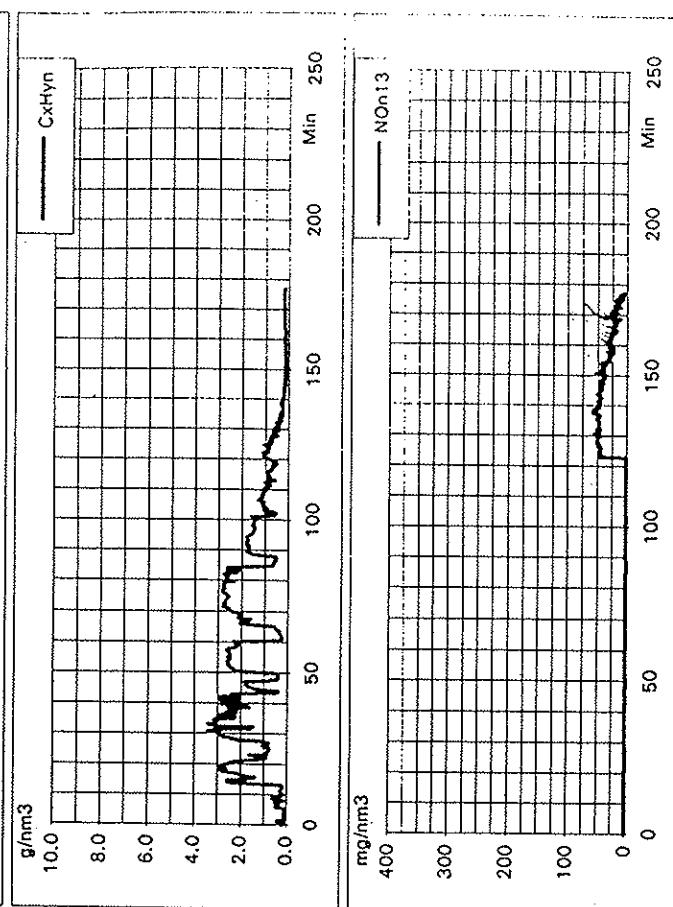
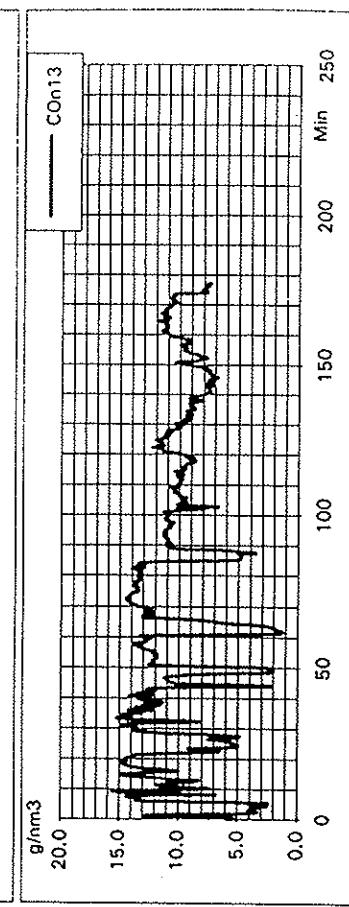
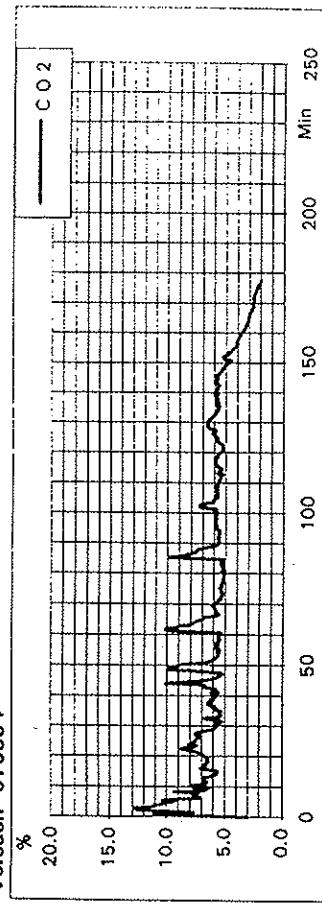
ETA: Wirkungsgrad, P: Leistung, LAMBDA: Luftüberschuss

## Versuch 070994

## Versuch 070994

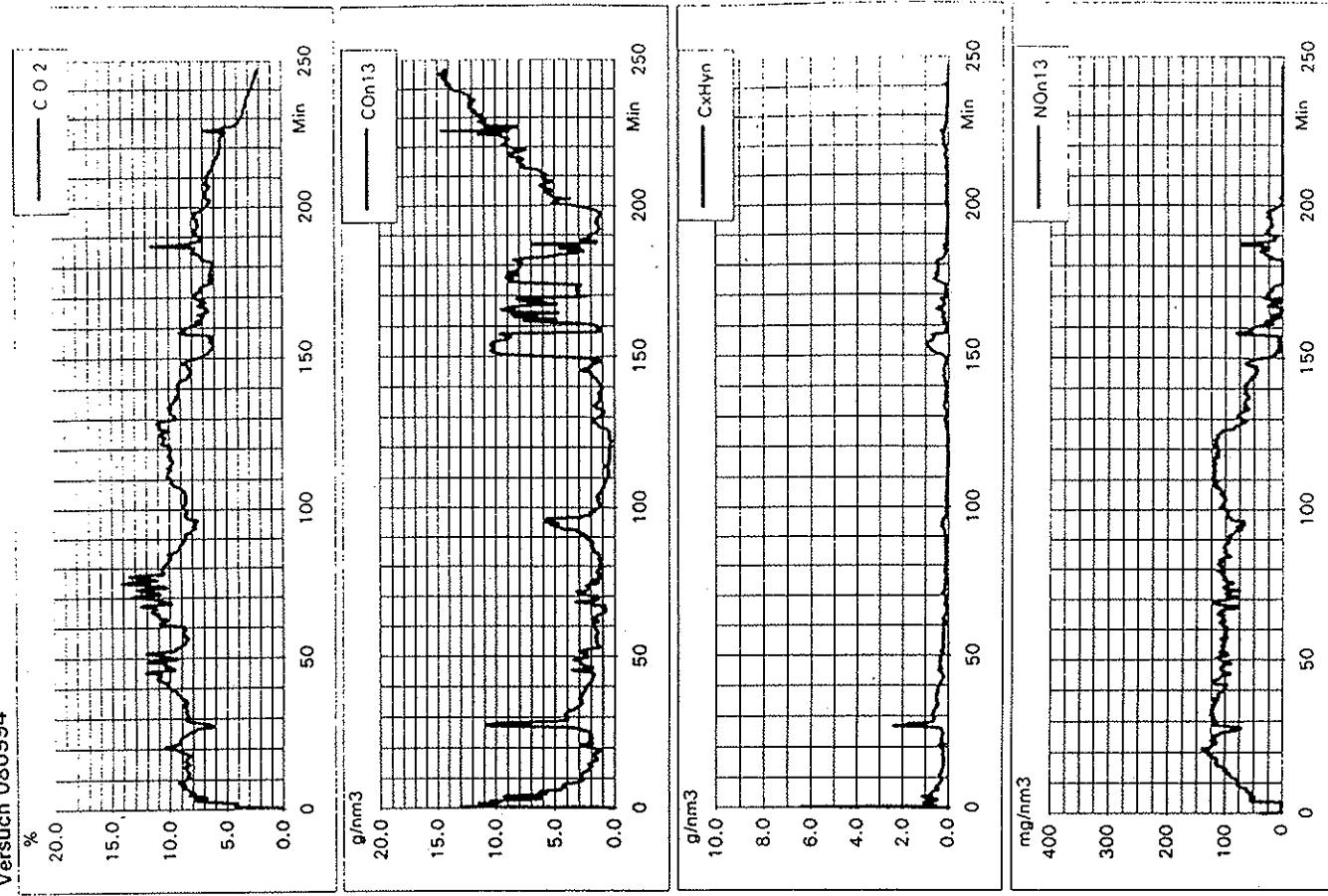


ETA: Wirkungsgrad; P: Leistung; LAMBDA: Luftüberschuss

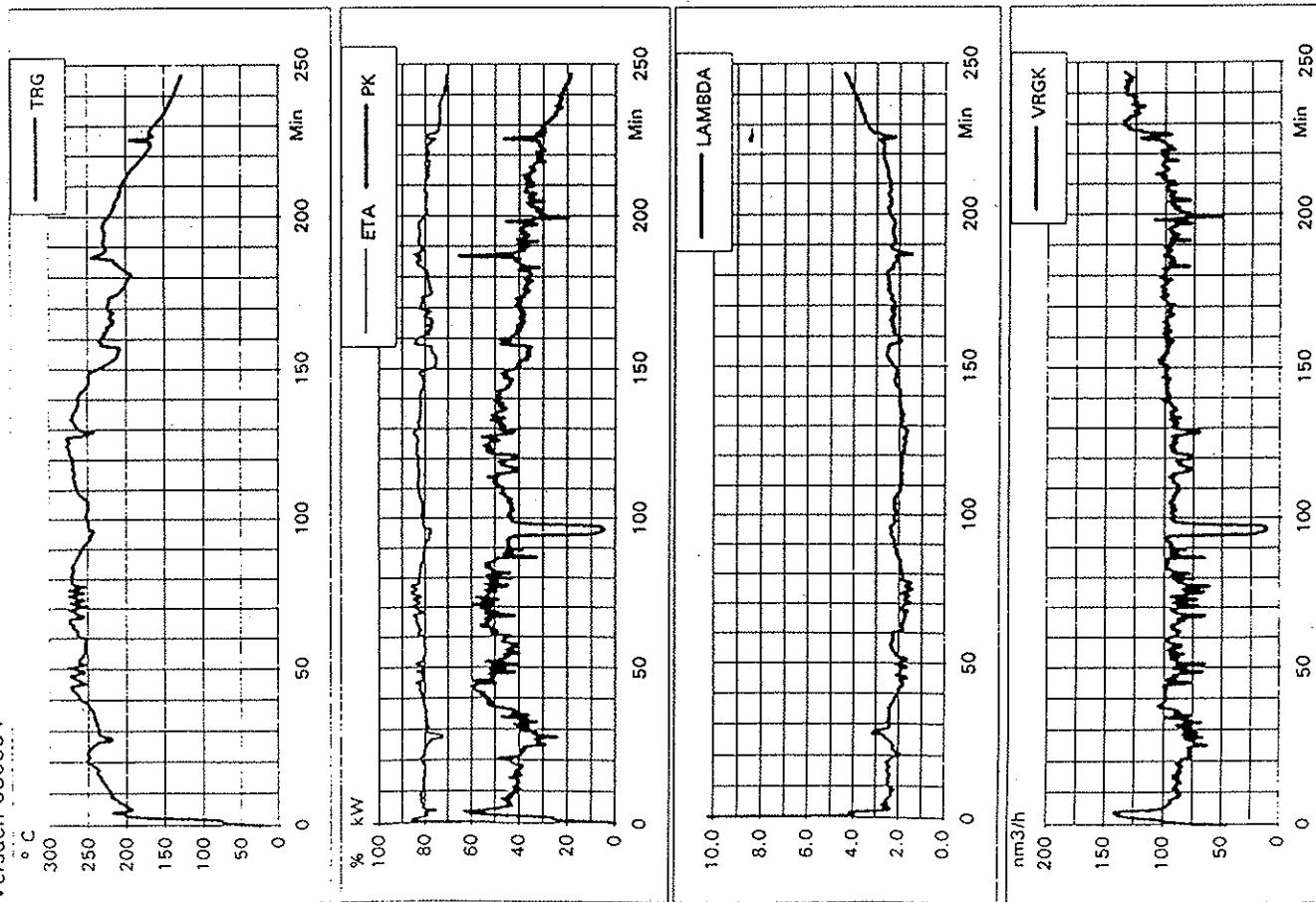


Neuer Rost Phase A Weichholz

Versuch 080994



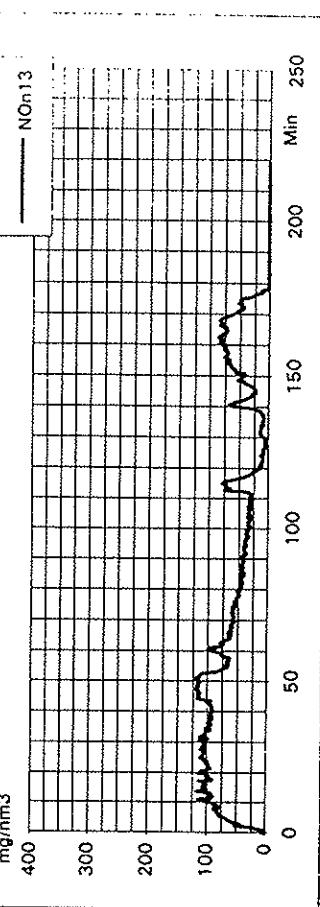
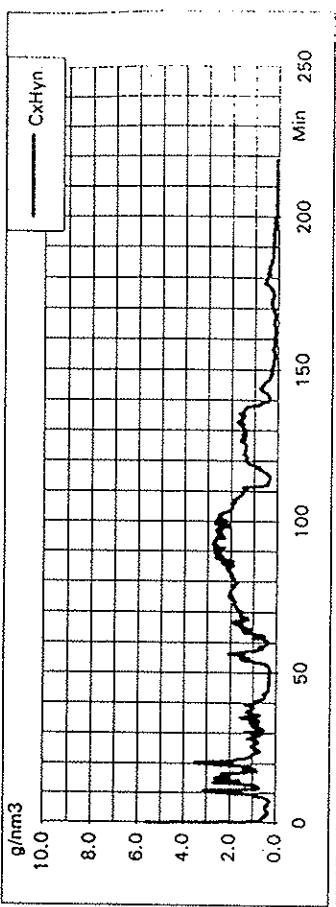
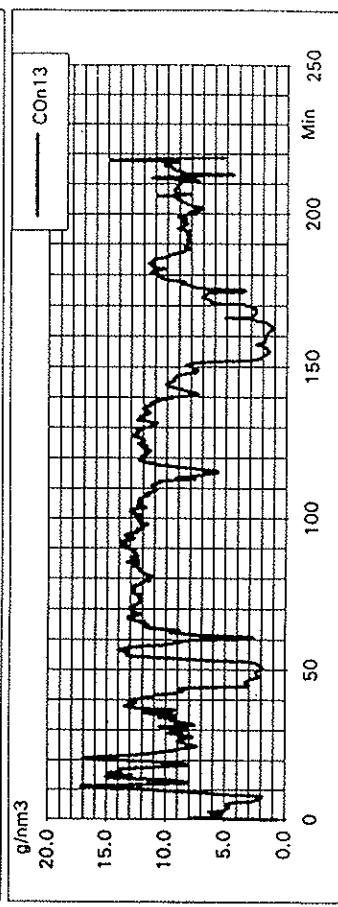
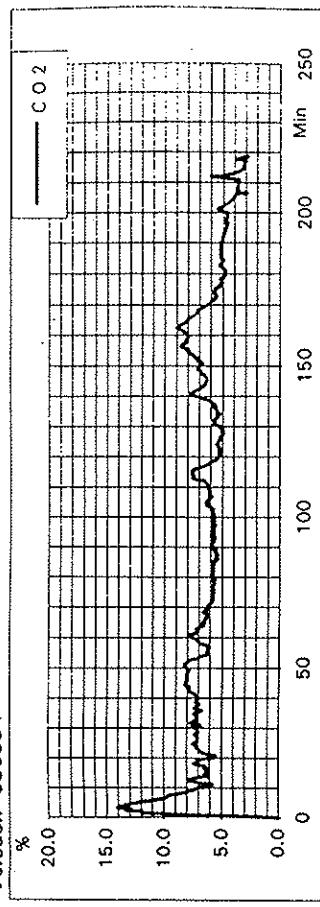
Versuch 080994



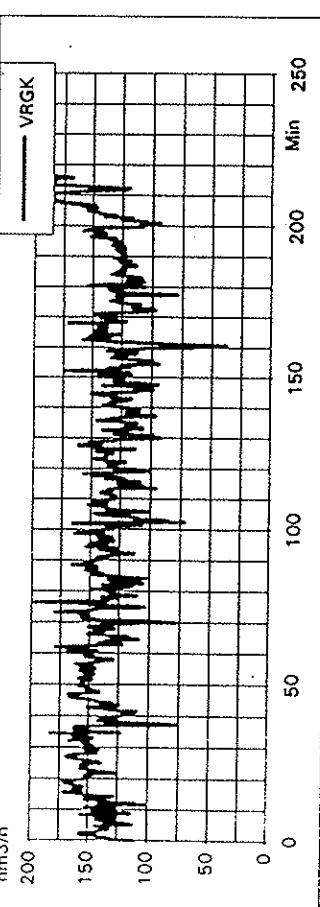
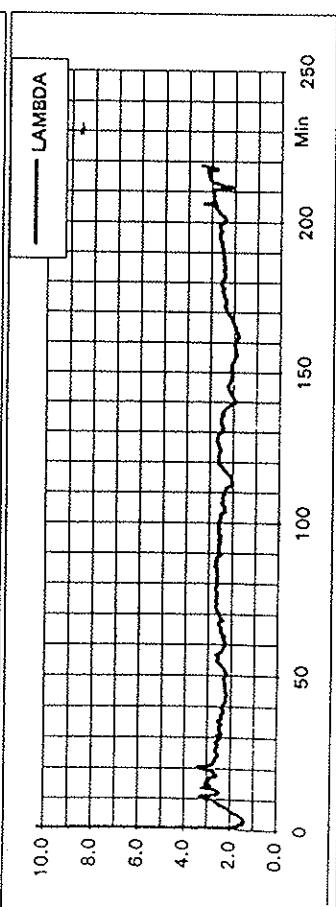
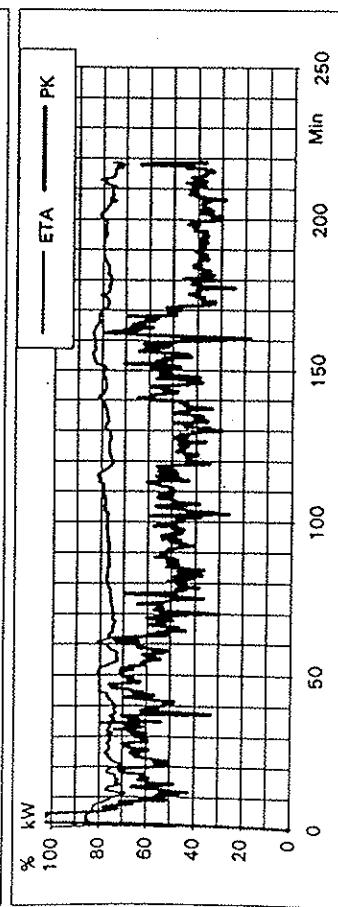
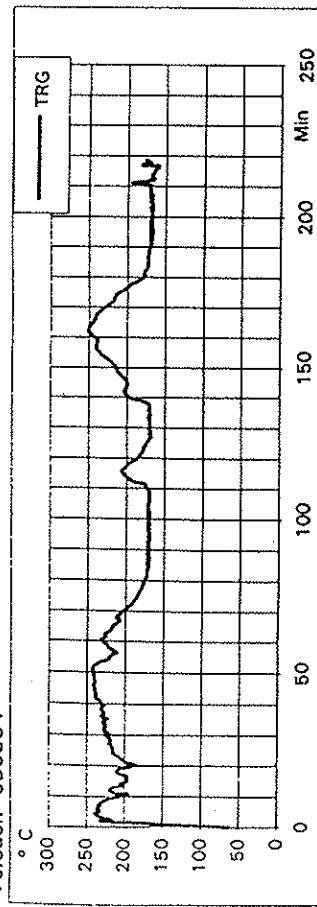
ETA: Wirkungsgrad; P: Leistung; LAMBDA: Luftfeuchte

Neuer Rost Phase A Hartholz

## Versuch 090994



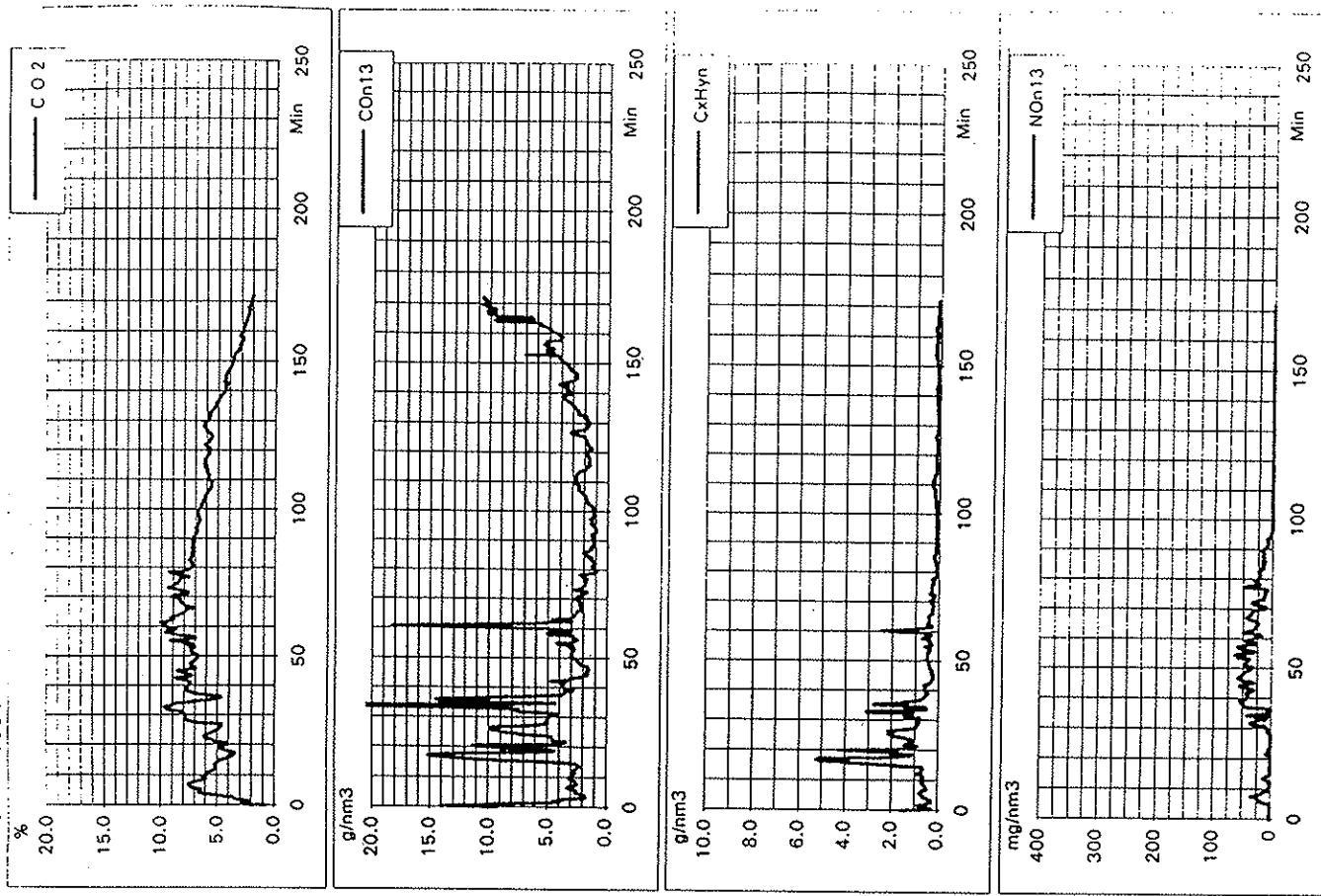
## Versuch 090994



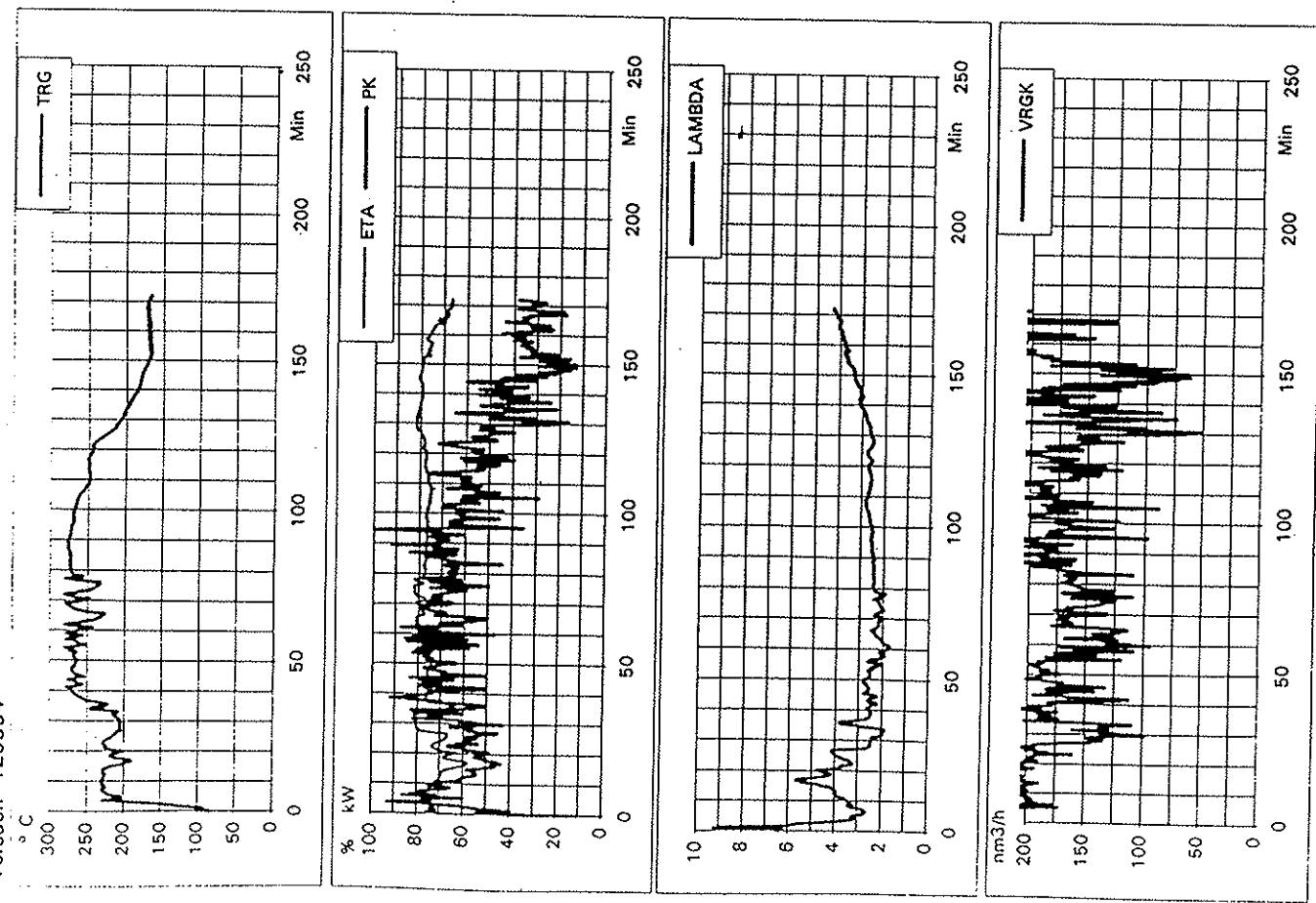
ETA: Wirkungsgrad, P: Leistung, LAMBDA: Luftüberschuss

## Neuer Rost Phase A Hartholz

## Versuch 120994



## Versuch 120994

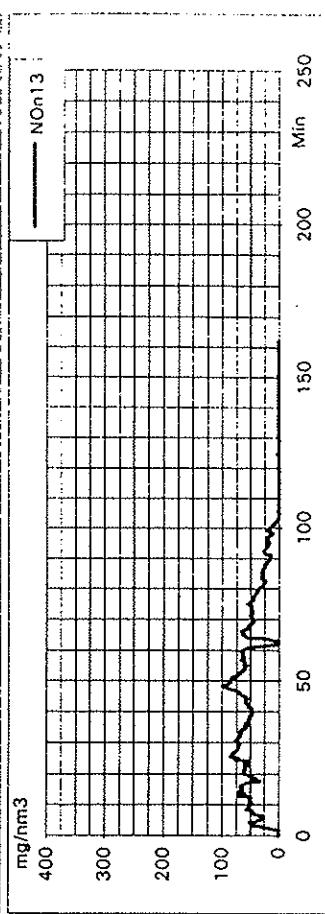
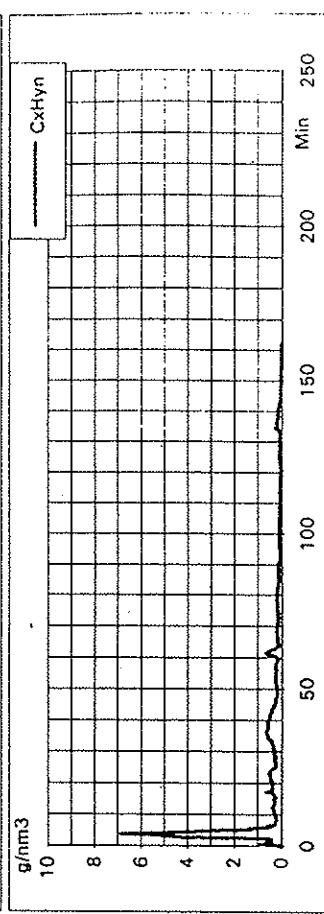
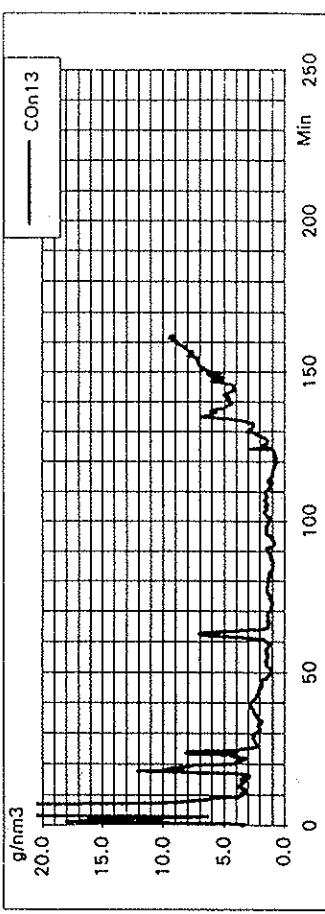
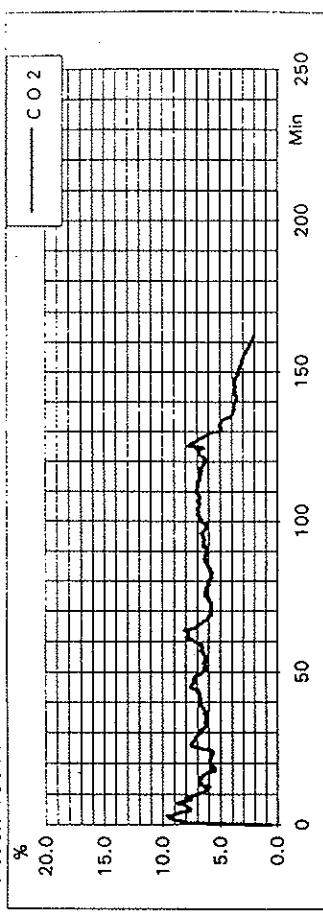


ETA: Wirkungsgrad, P: Leistung, LAMBDA: Luftüberschuss

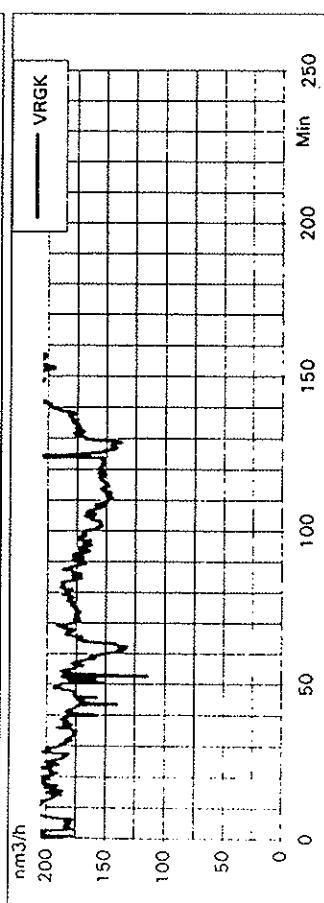
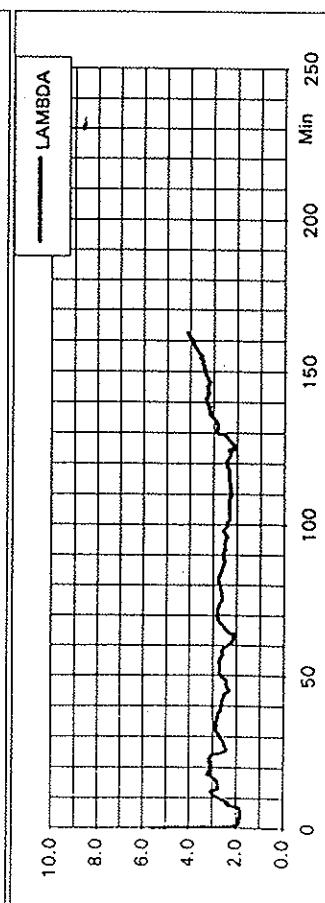
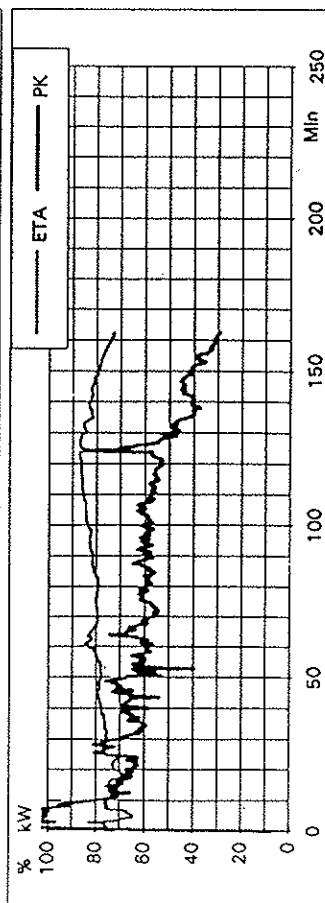
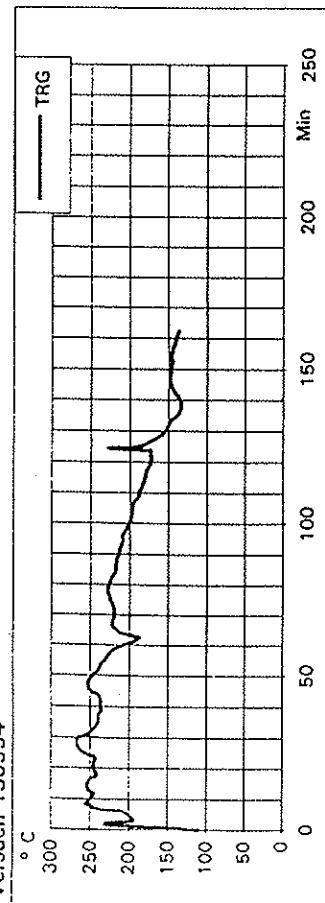
## Neuer Rost Phase B

## Hartholz

## Versuch 130994



## Versuch 130994

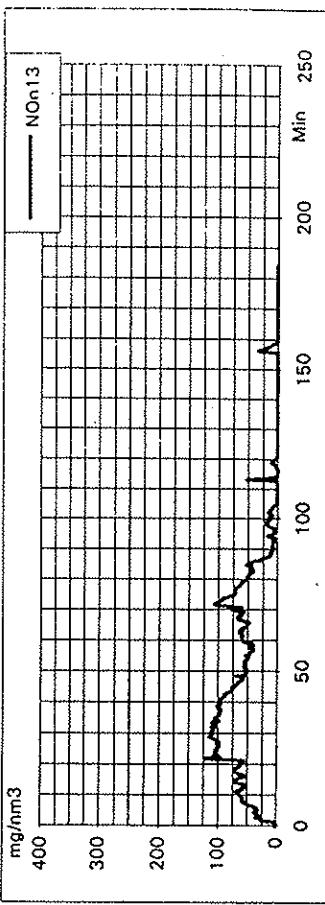
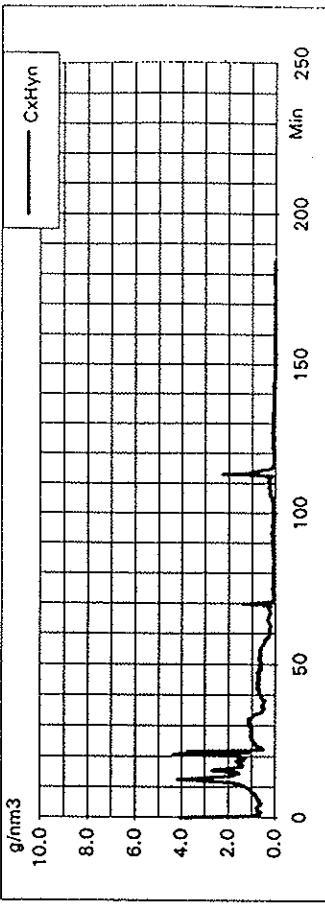
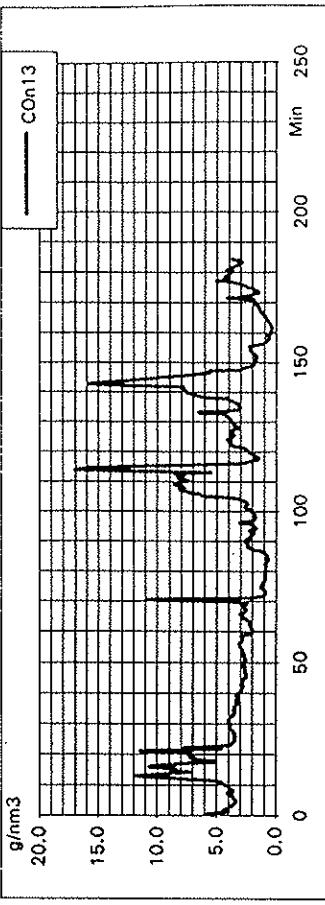
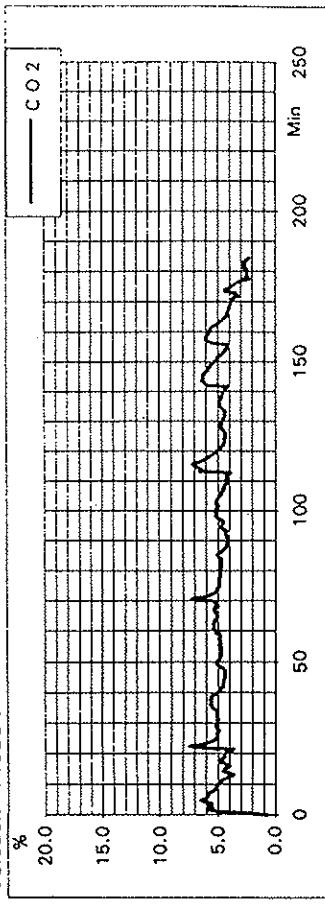


ETA: Wirkungsgrad, P: Leistung, LAMBDA: Luftüberschuss

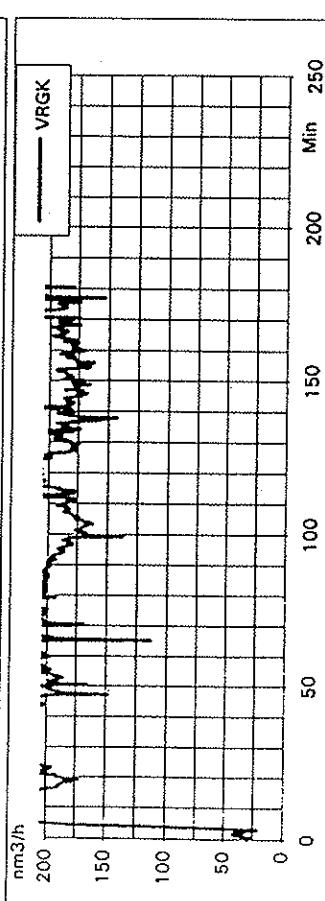
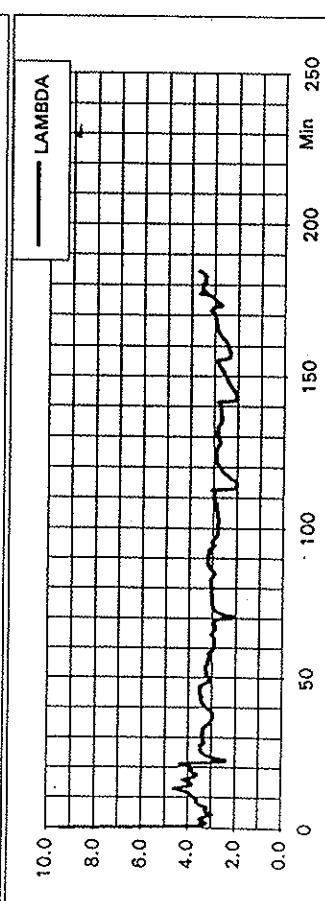
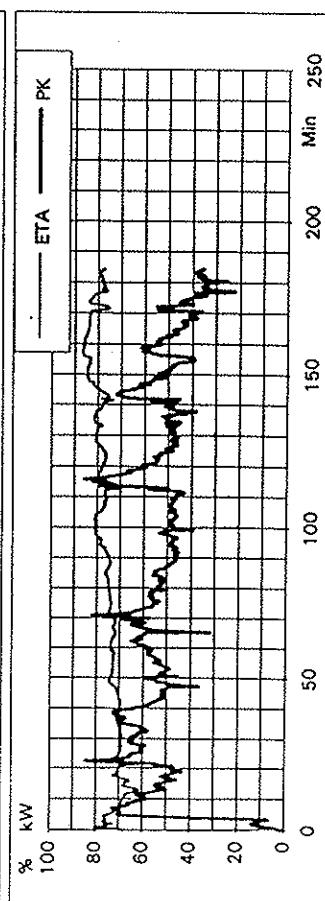
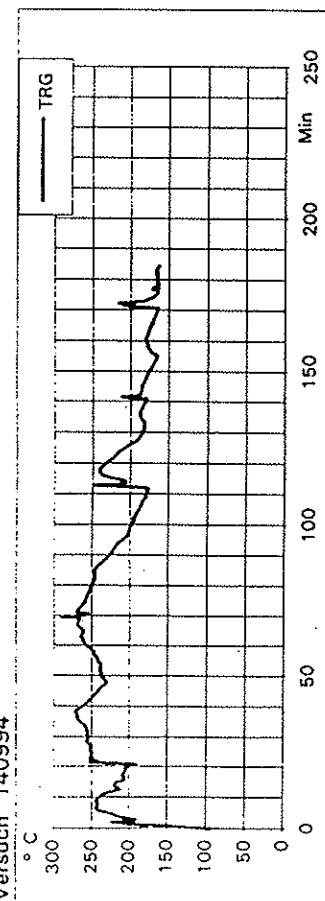
## Neuer Rost Phase B

## Hartholz

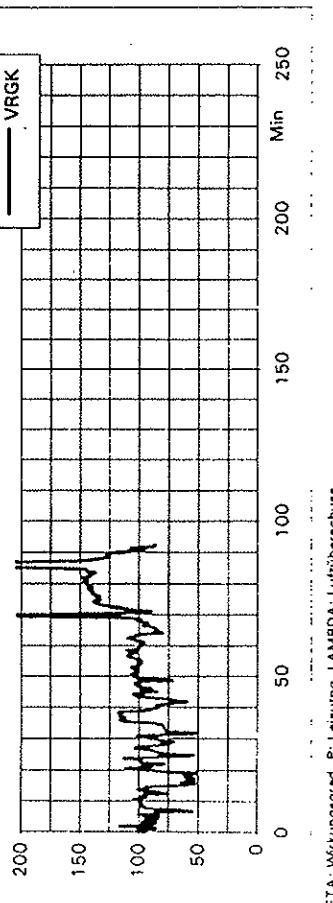
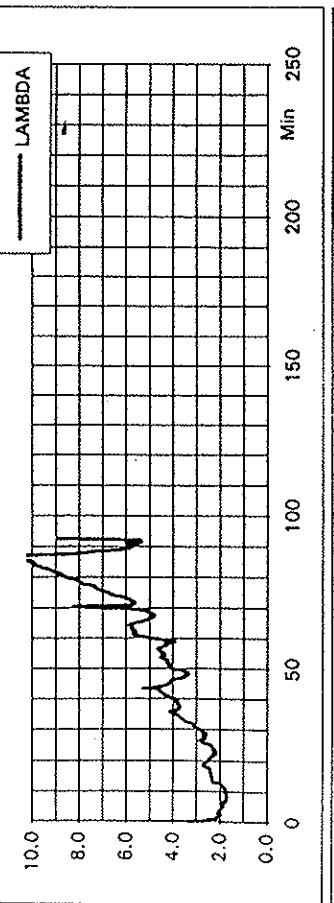
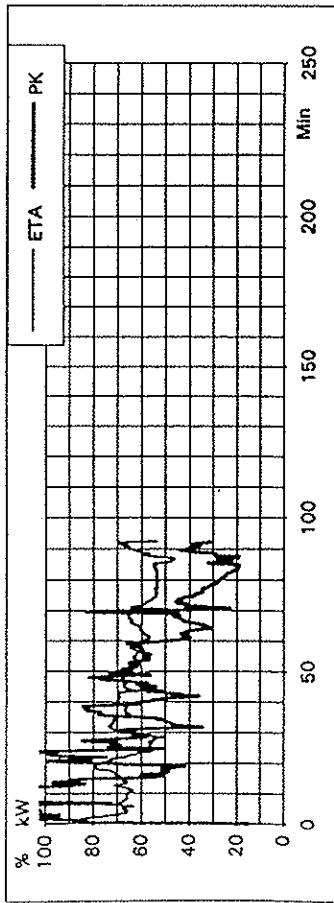
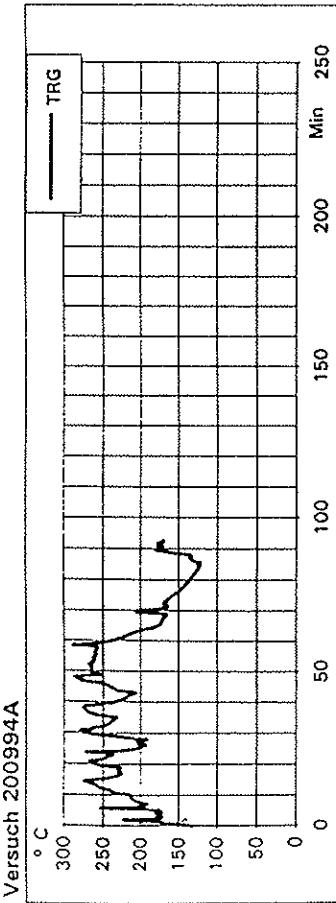
Versuch 140994



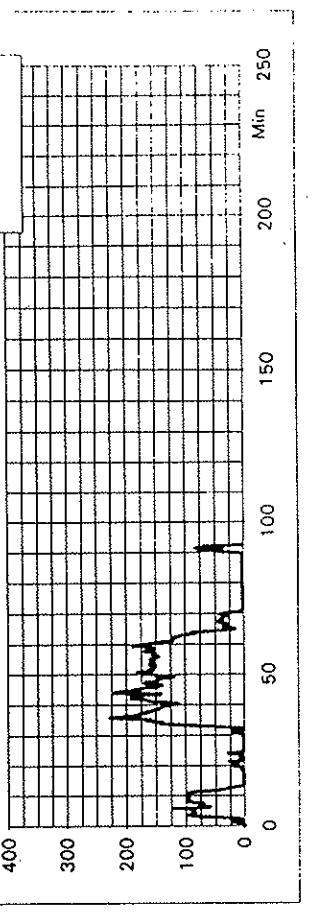
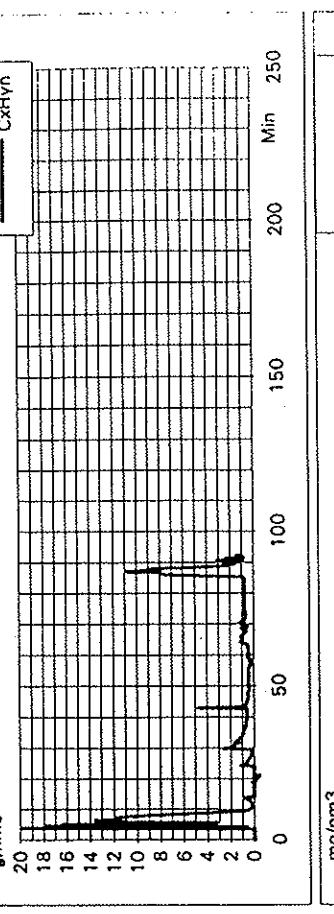
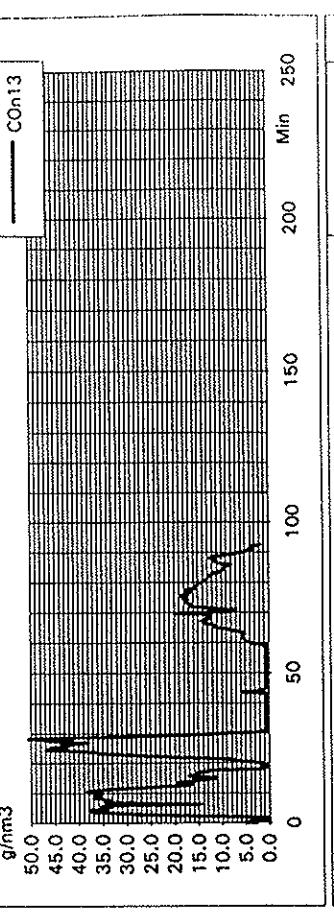
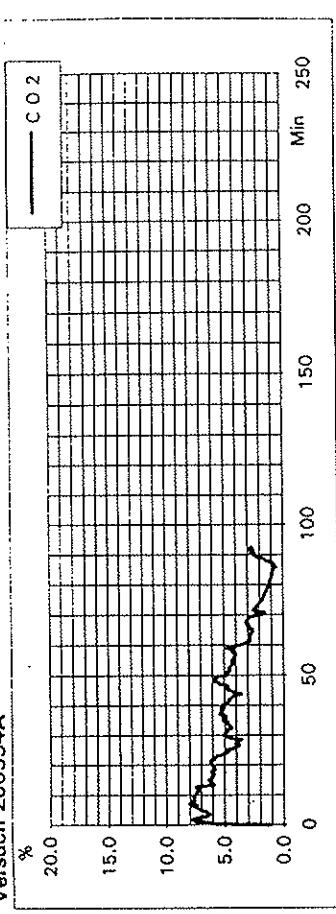
Versuch 140994



Versuch 200994A

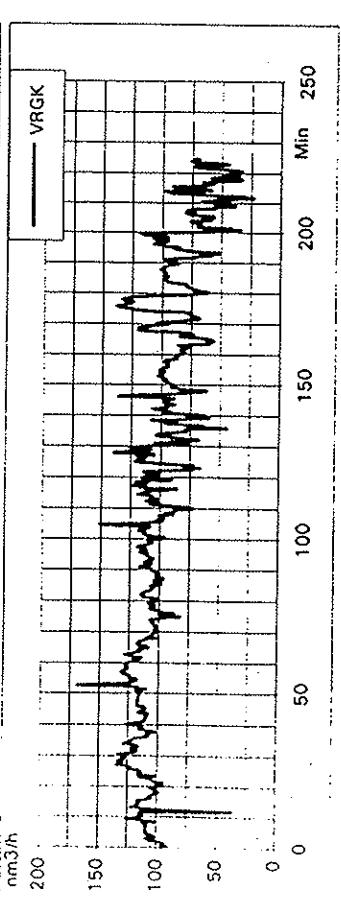
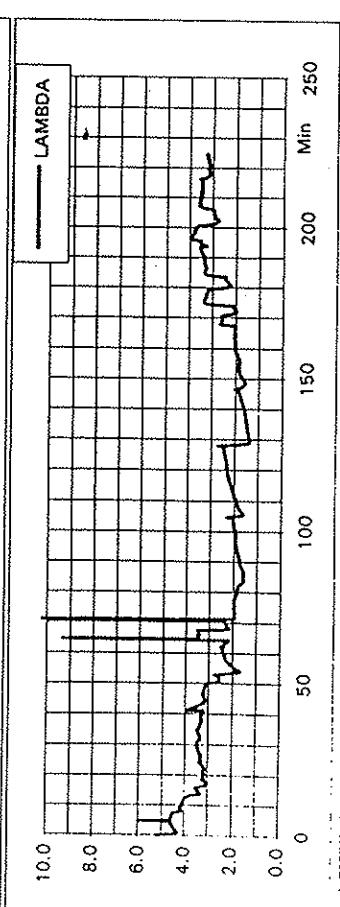
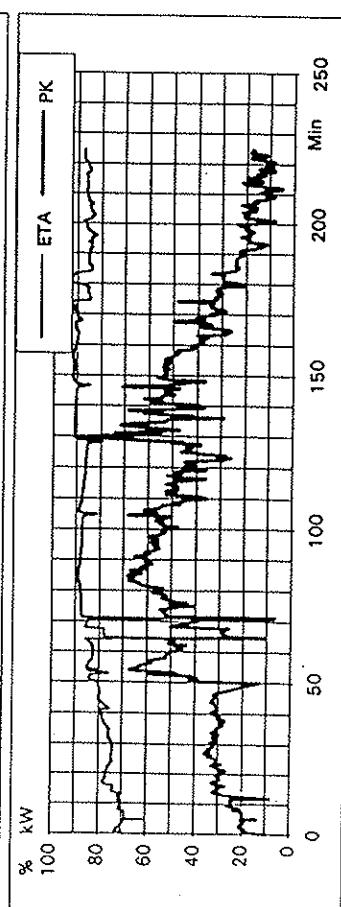
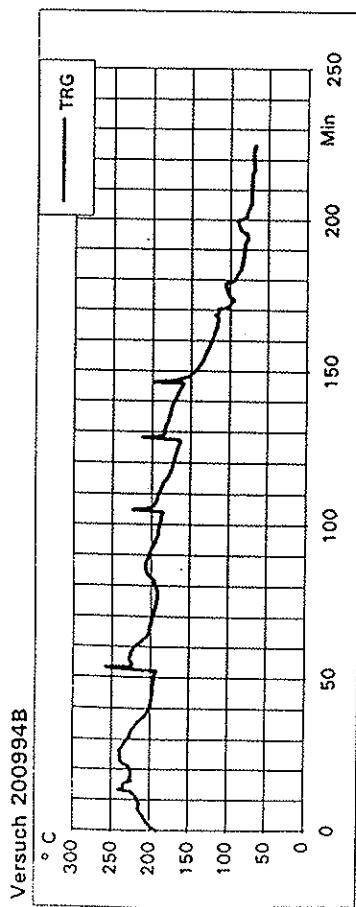


Versuch 200994A

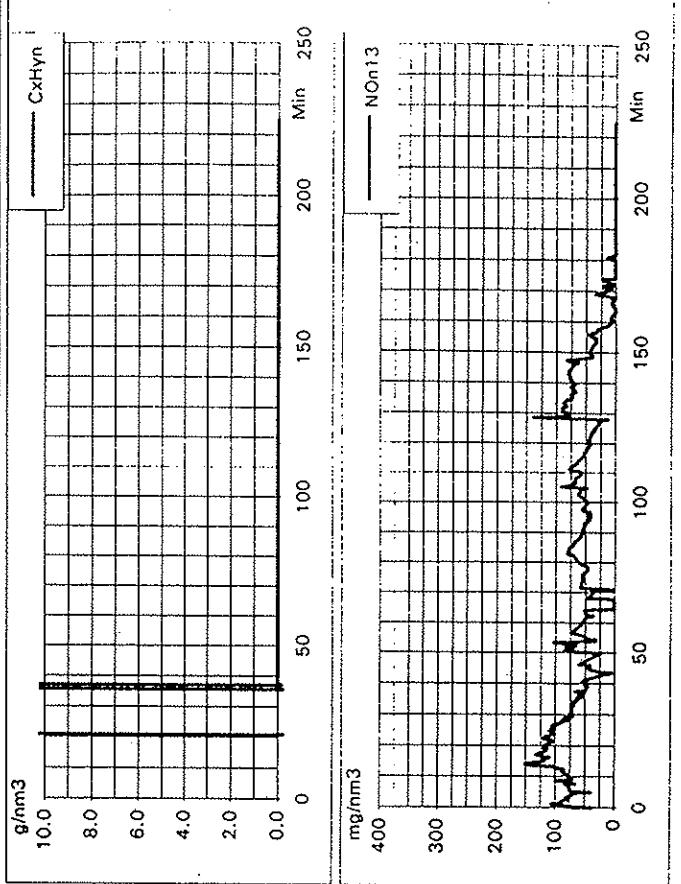
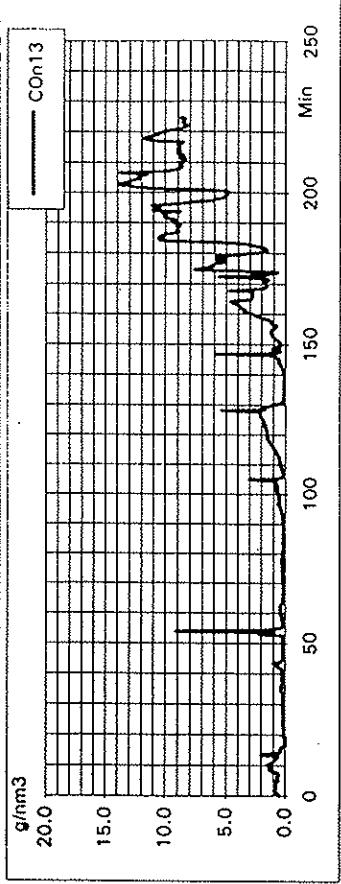
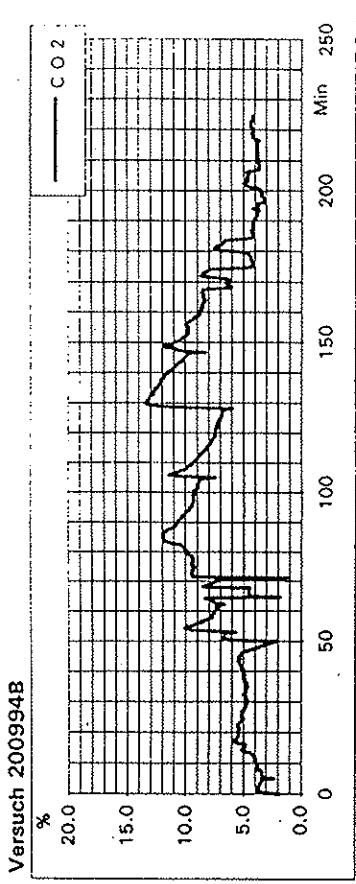


# Neuer Rost Phase C/Holznachlegen Hartholz

Versuch 200994B



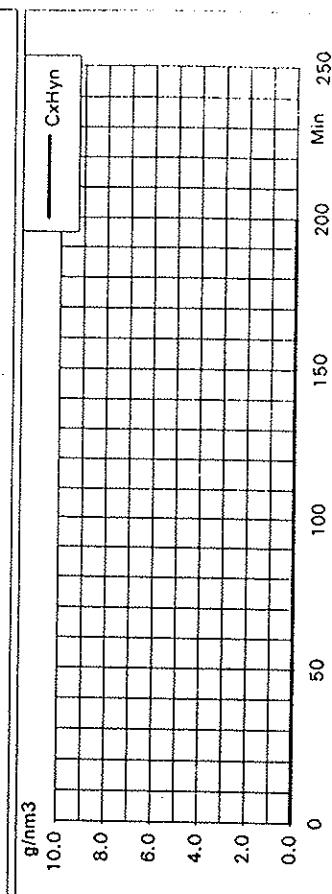
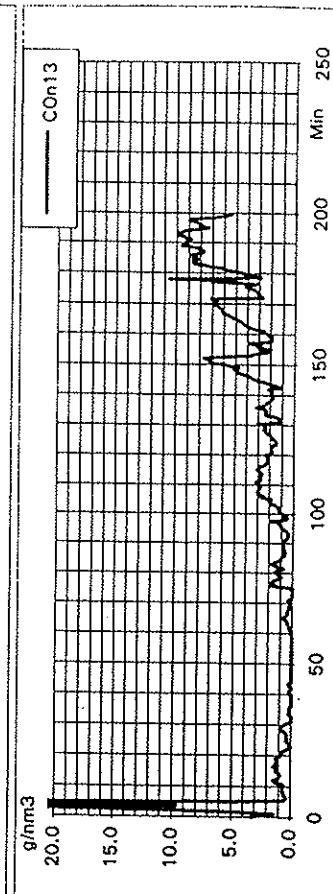
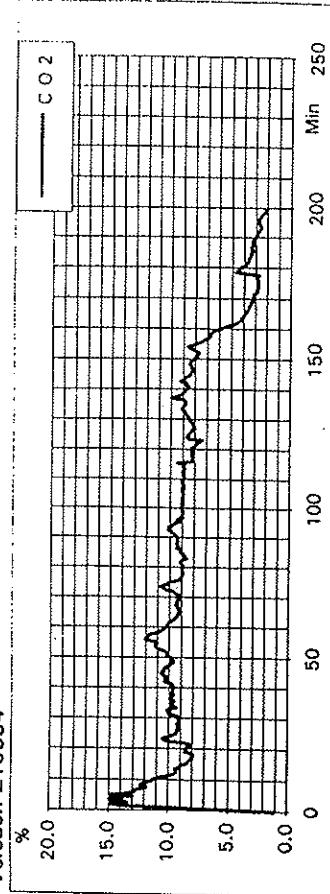
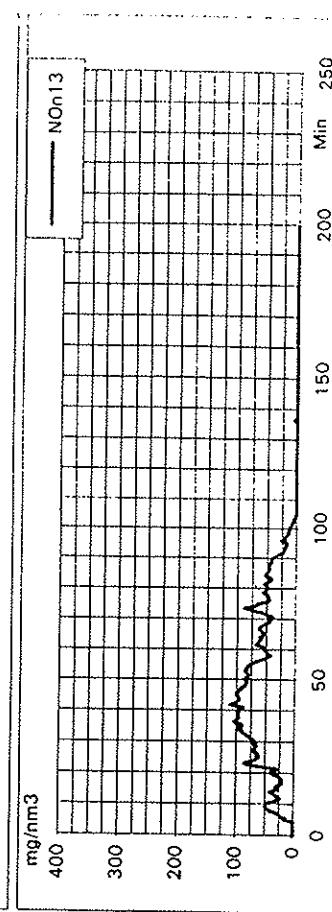
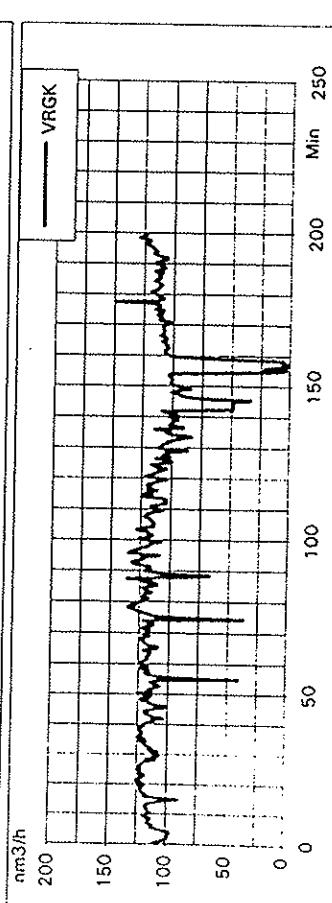
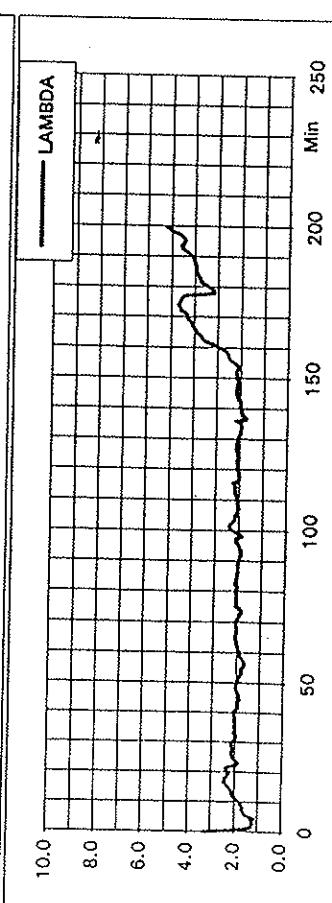
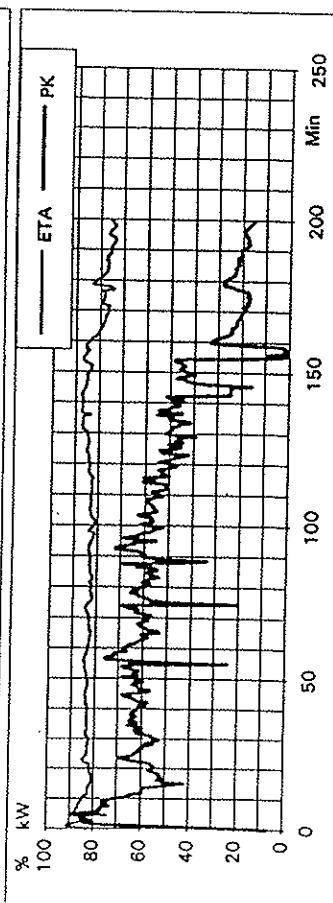
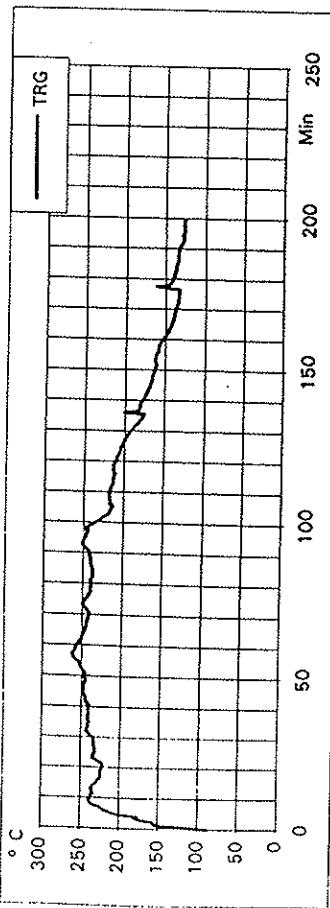
Versuch 200994B



ETA: Wirkungsgrad, P: Leistung, LAMBDA: Luftüberechse

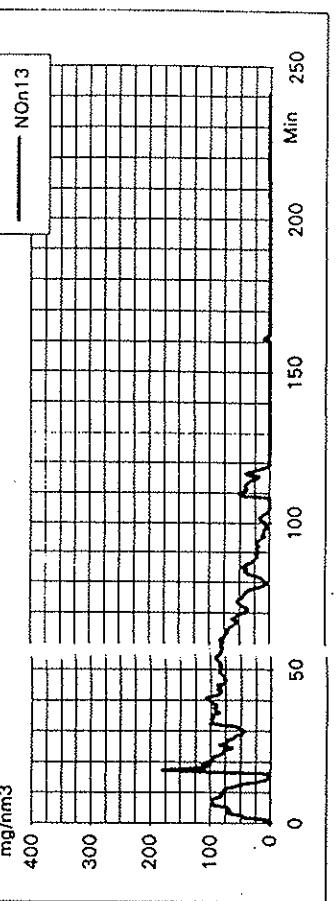
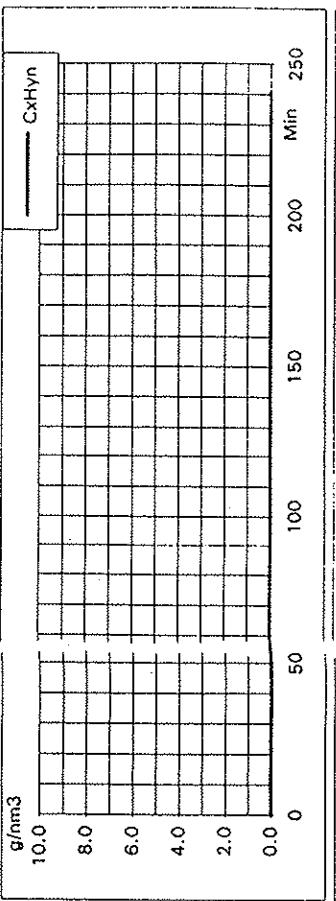
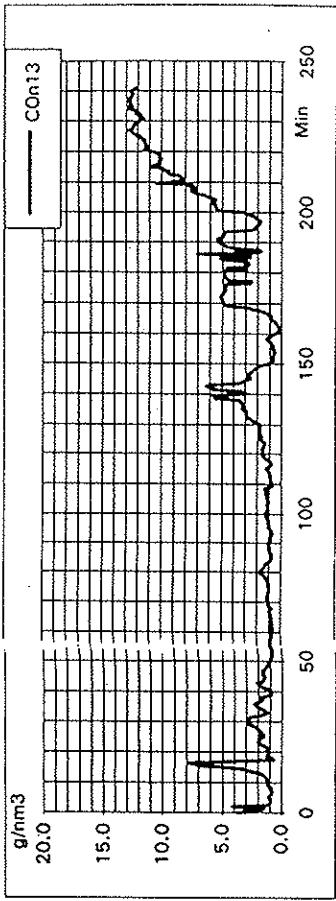
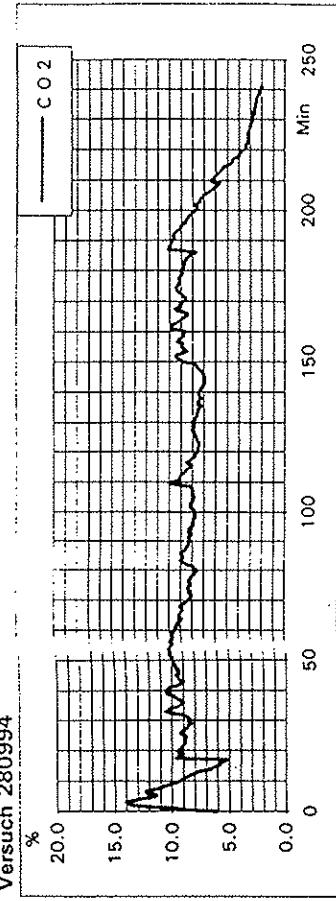
Versuch 210994

Versuch 210994

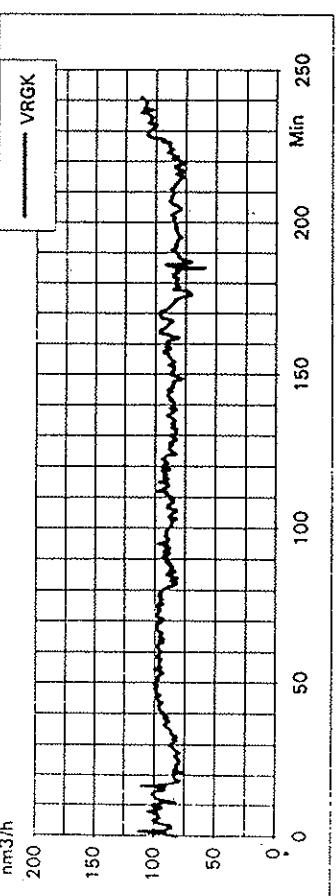
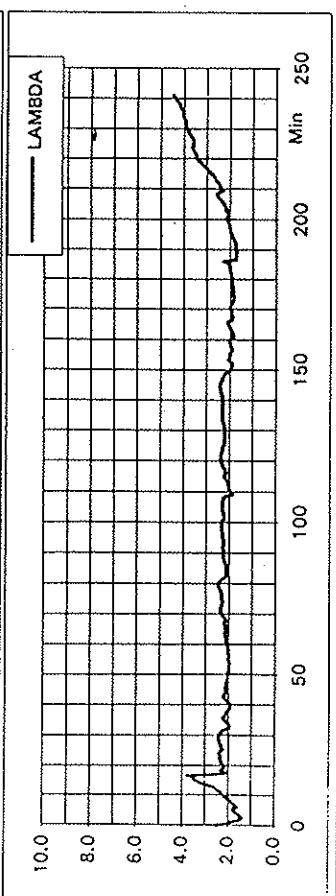
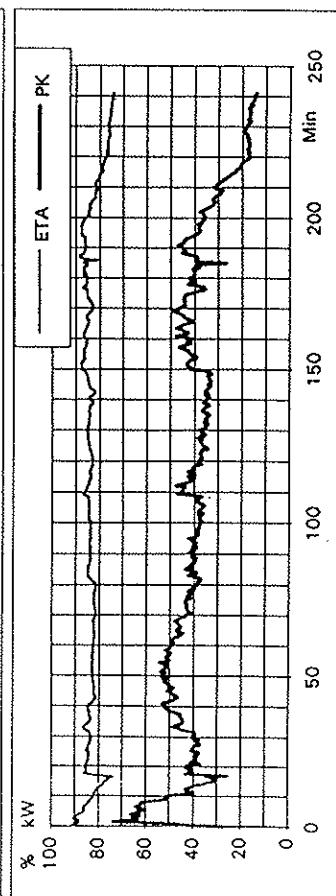
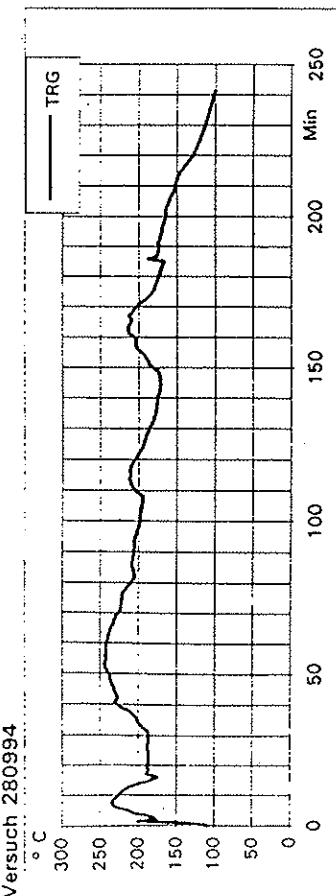


# Neuer Rost Phase C Hartholz

Versuch 280994

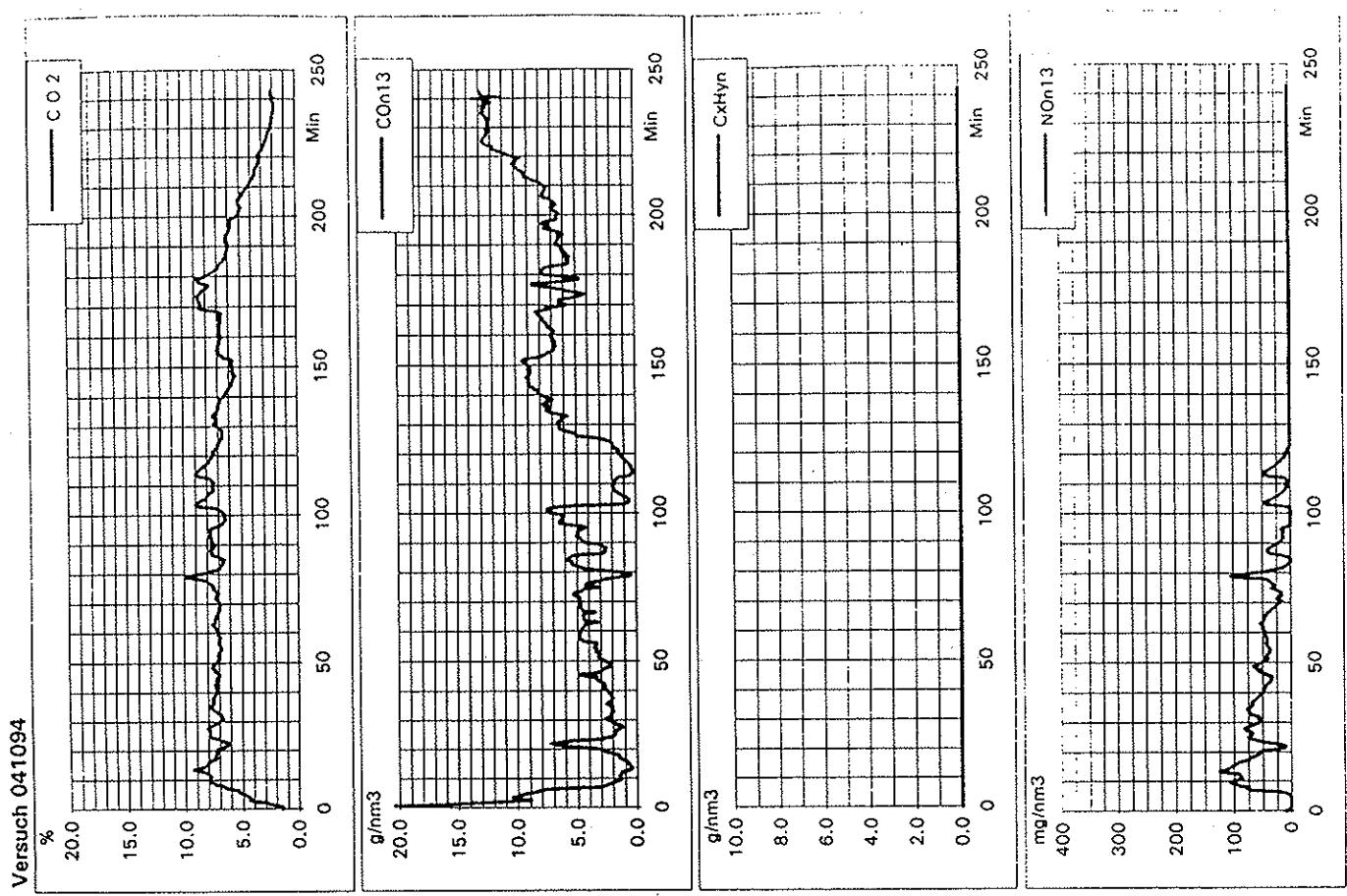
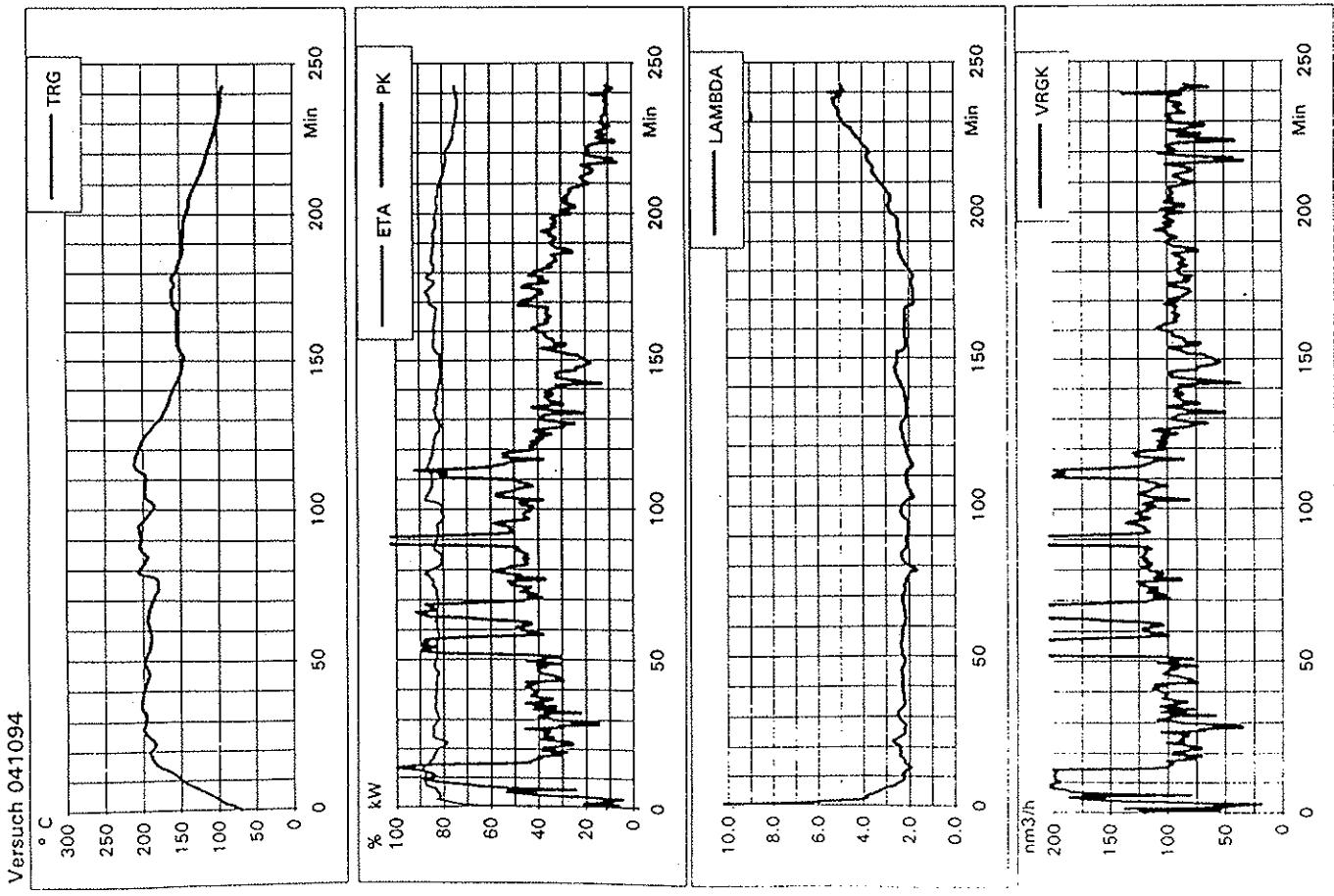


Versuch 280994



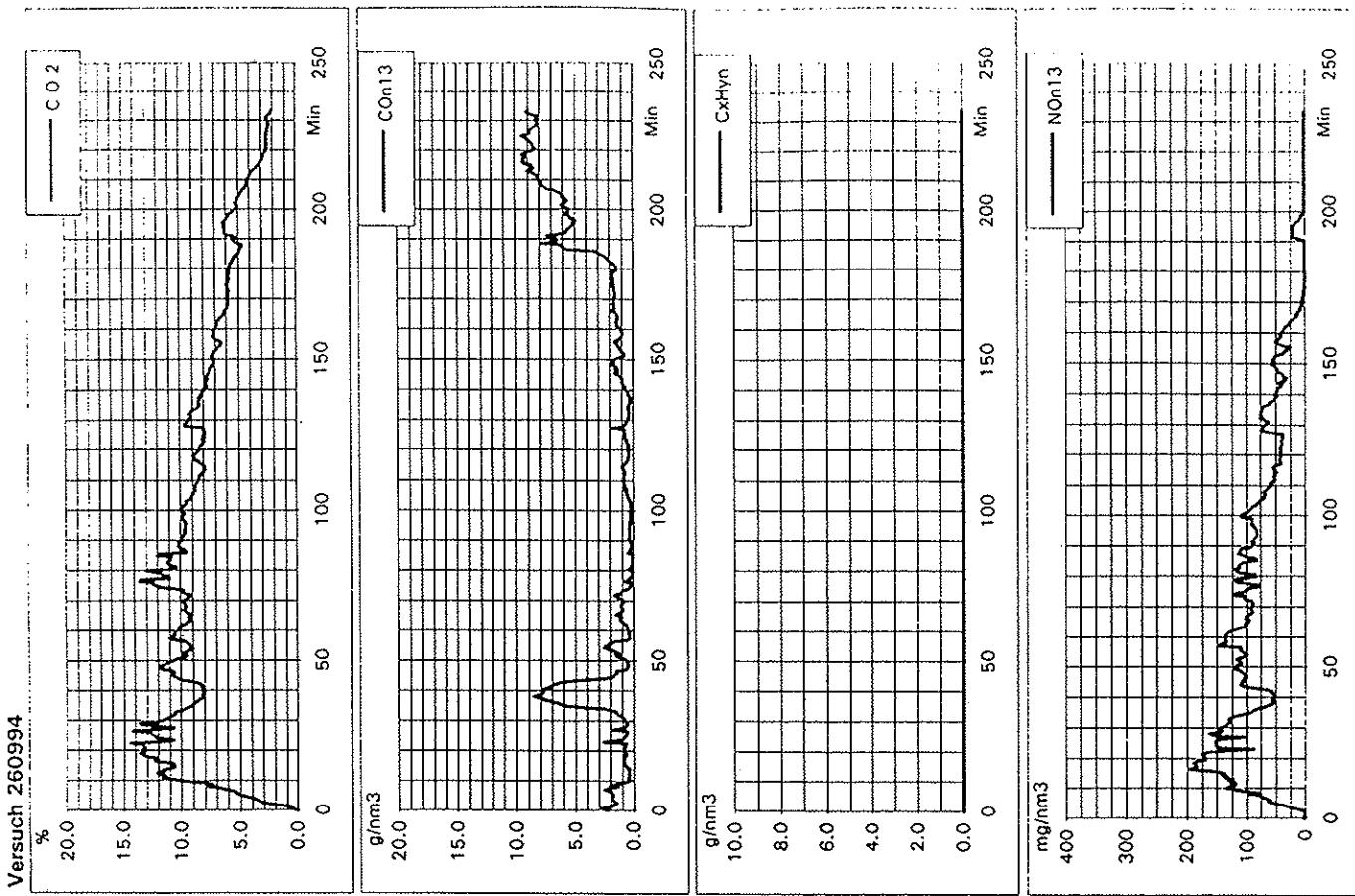
ETA: Wirkungsgrad, P: Leistung, LAMBDA: Luftüberdruck

Versuch 041094

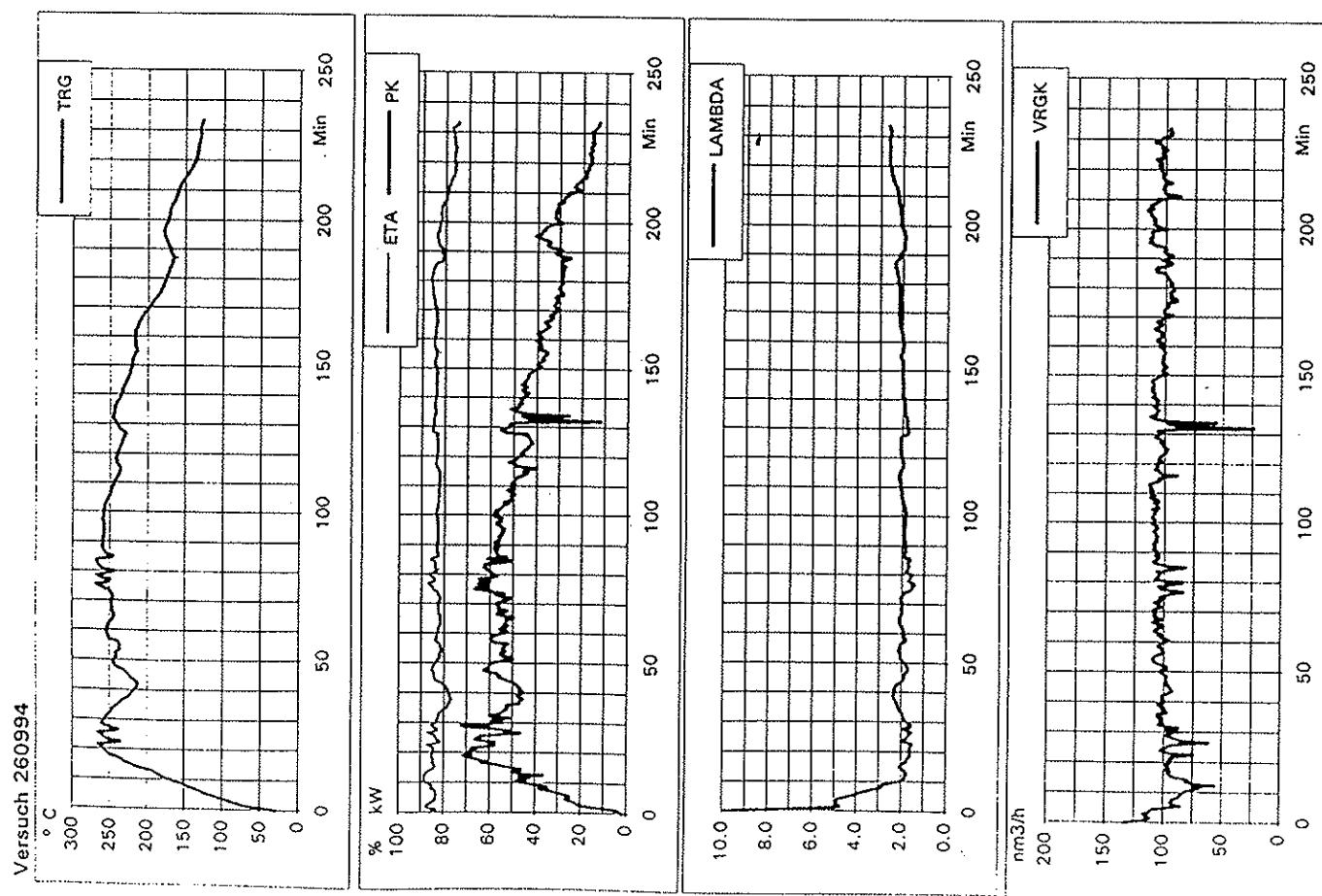


# Neuer Rost Phase C/Anfeuermodul Hartholz

Versuch 260994

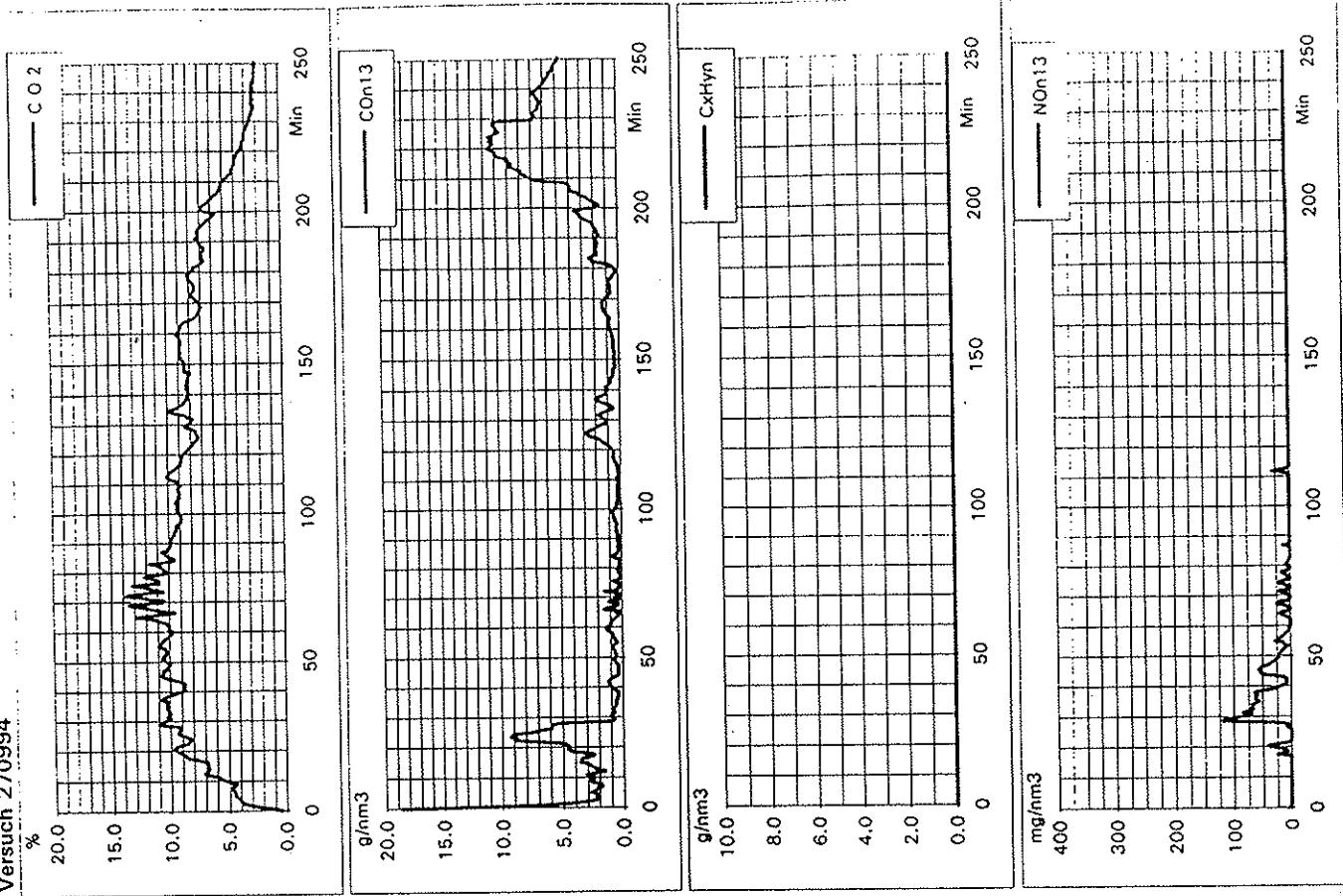


Versuch 260994

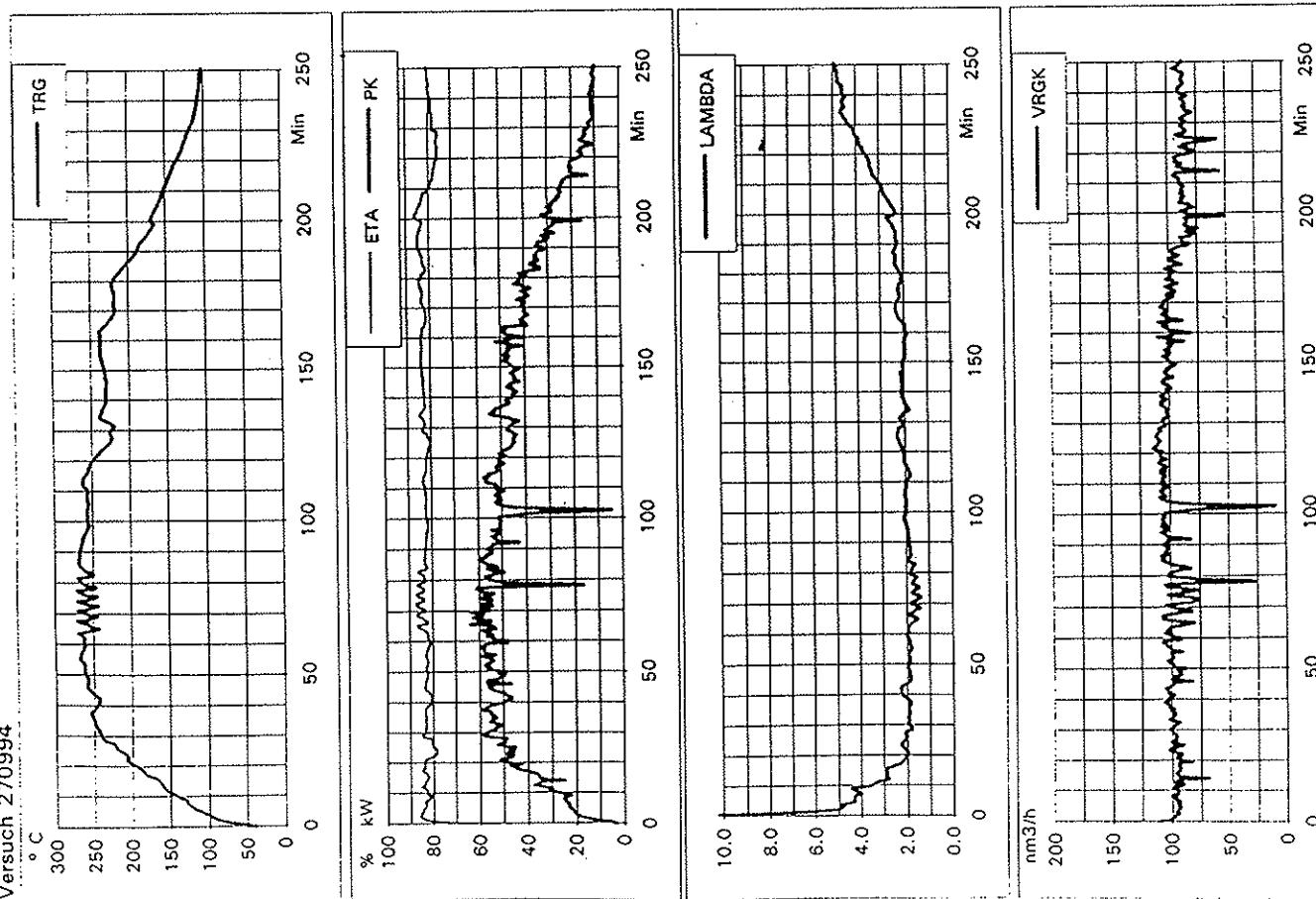


ETA: Wirkungsgrad, P: Leistung, LAMBDA: Luftaustausch

Versuch 270994



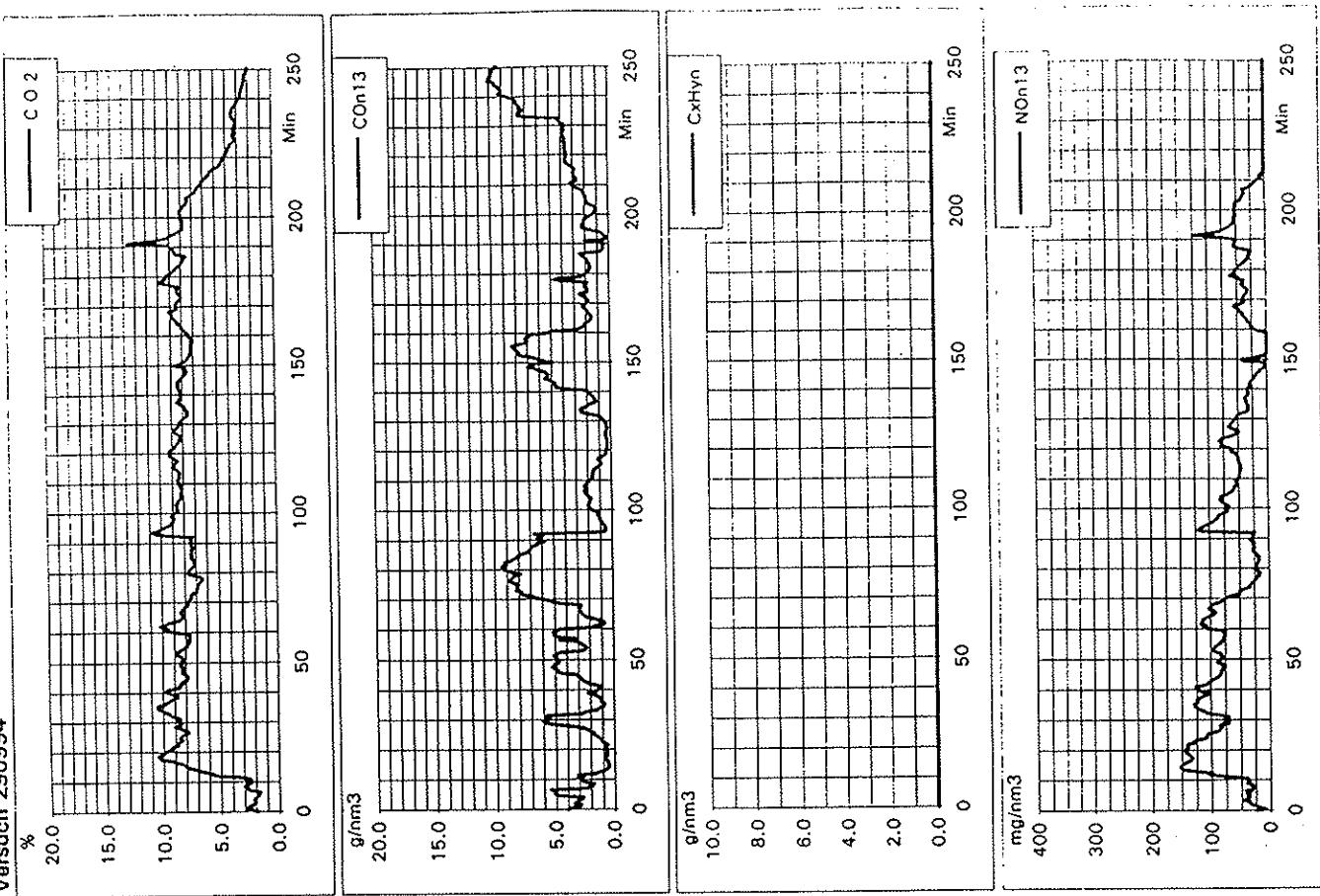
Versuch 270994



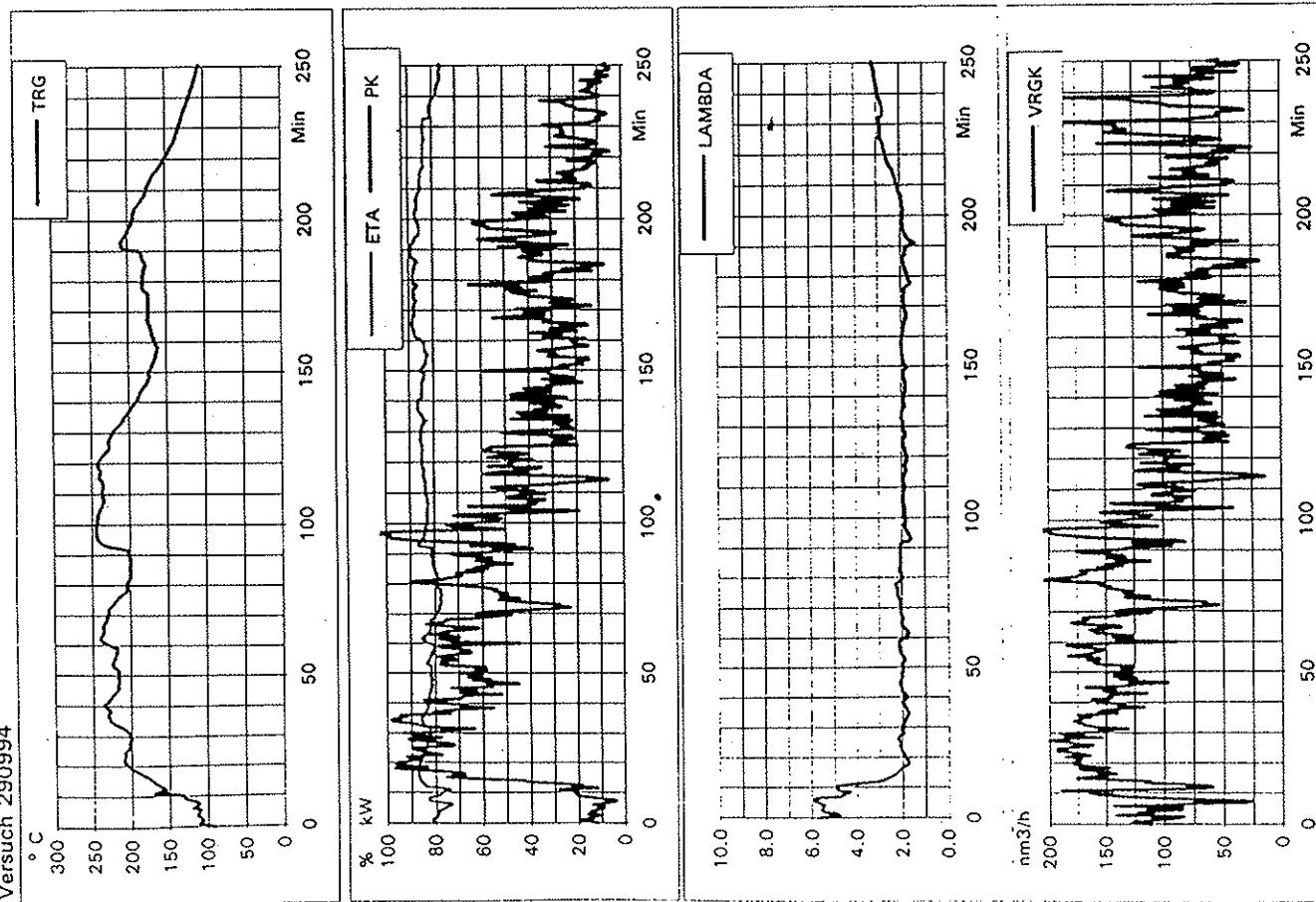
ETA: Wirkungsgrad; P: Leistung; LAMBDA: Luftüberschuss

Neuer Rost Phase C/Anfängermodul Hartholz

Versuch 290994



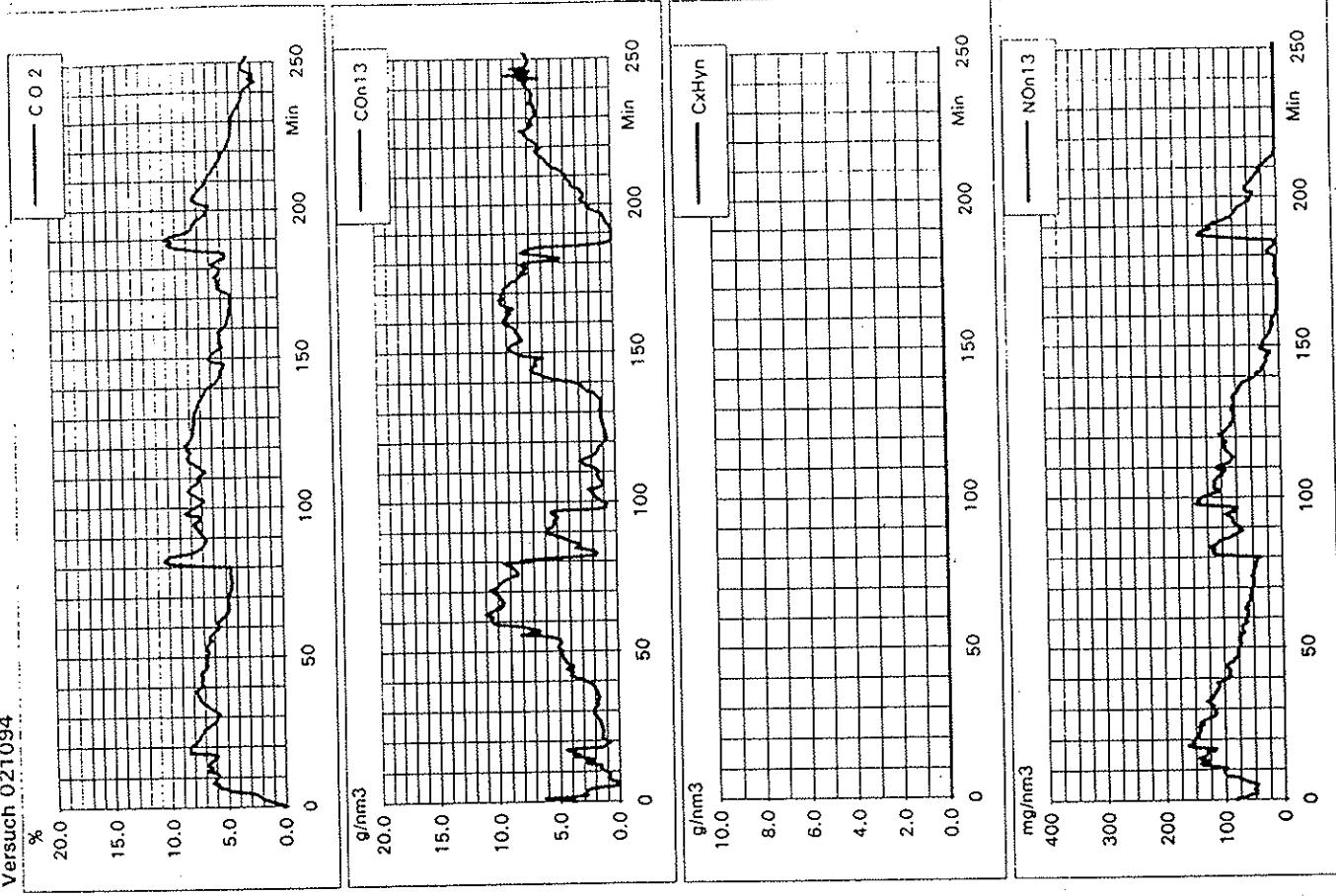
Versuch 290994



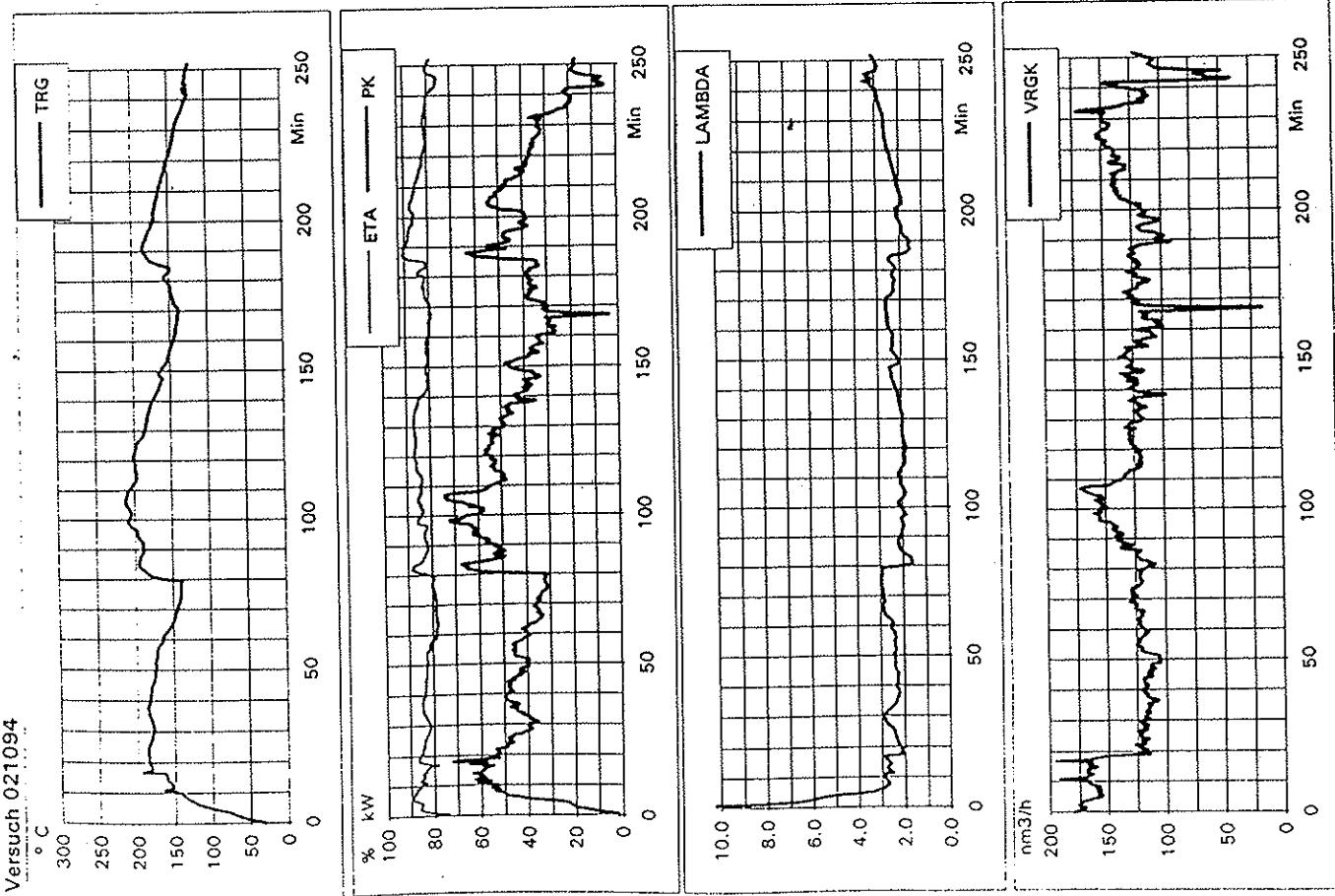
ETA: Wirkungsgrad, P: Leistung, LAMBDA: Luftüberschuss

Neuer Rost Phase C/Anfeuermodul Hartholz

## Versuch 021094



## Versuch 021094

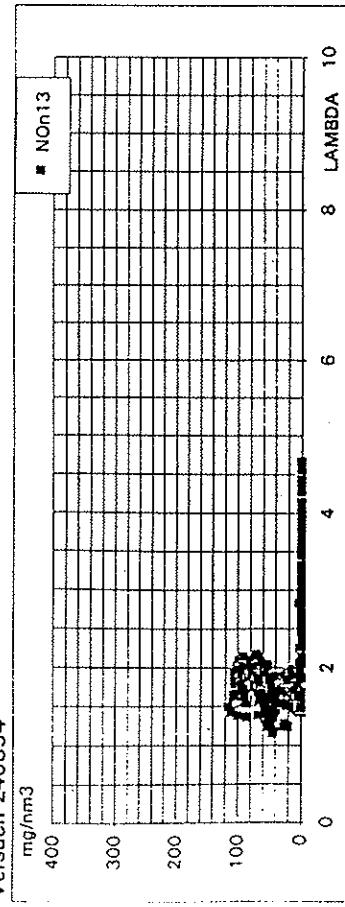


ETA: Wirkungsgrad, P: Leistung, LAMBDA: Luftüberschuss

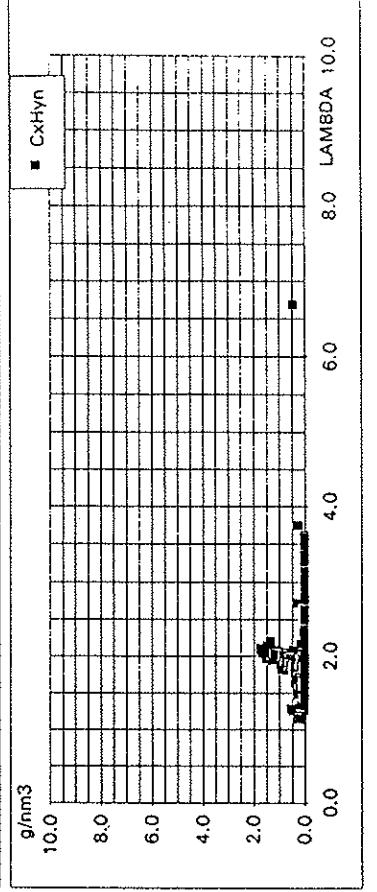
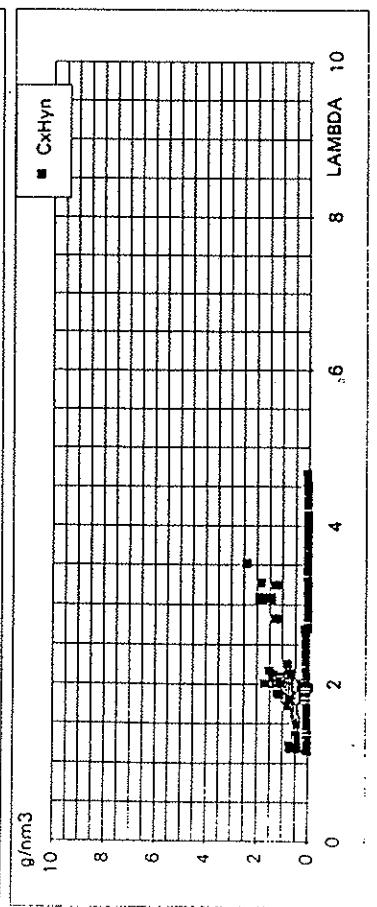
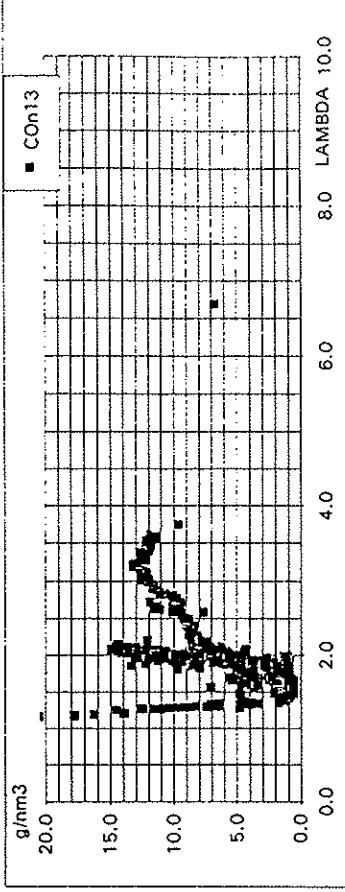
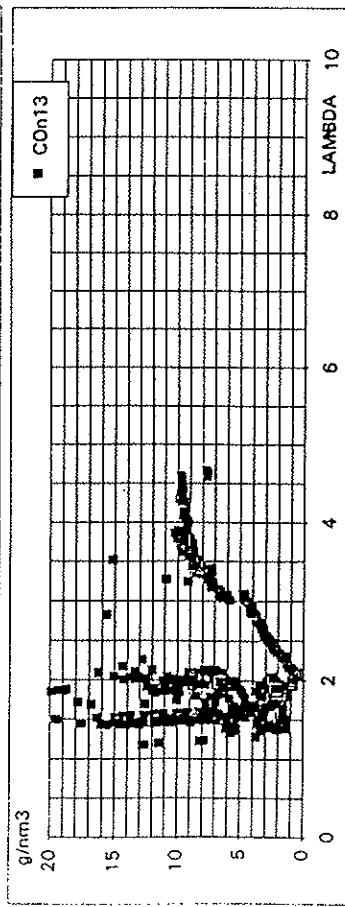
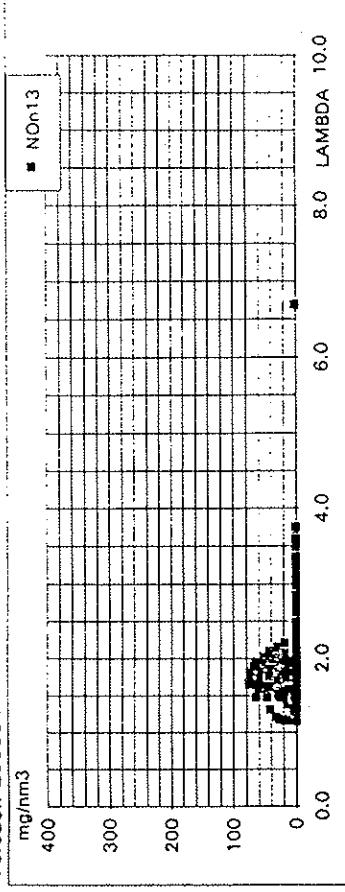
## Neuer Rost Phase C/Anfeuermodul Hartholz

## **ANHANG D: Korrelation**

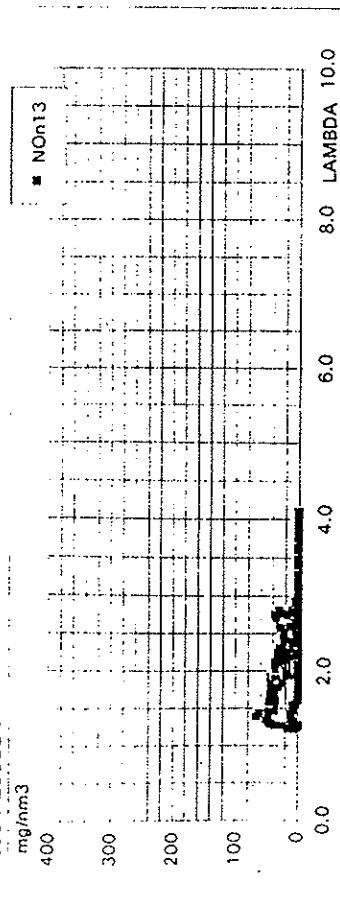
Versuch 240894



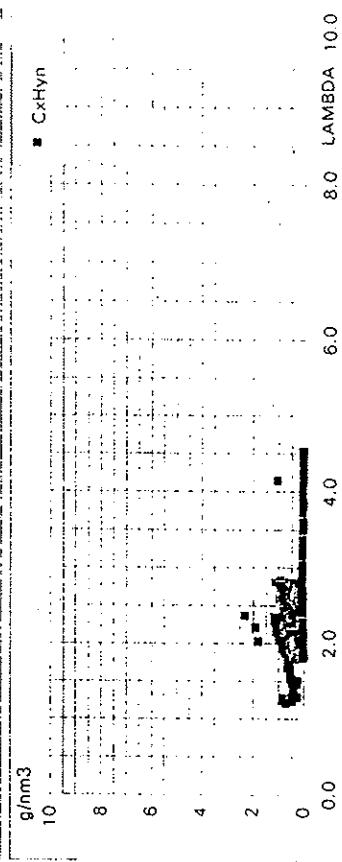
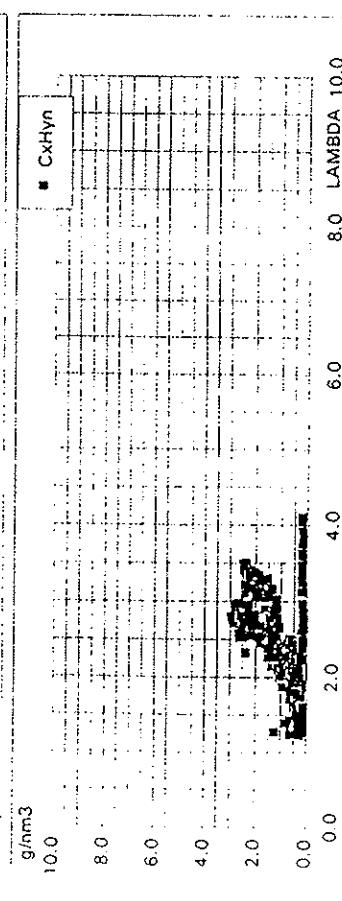
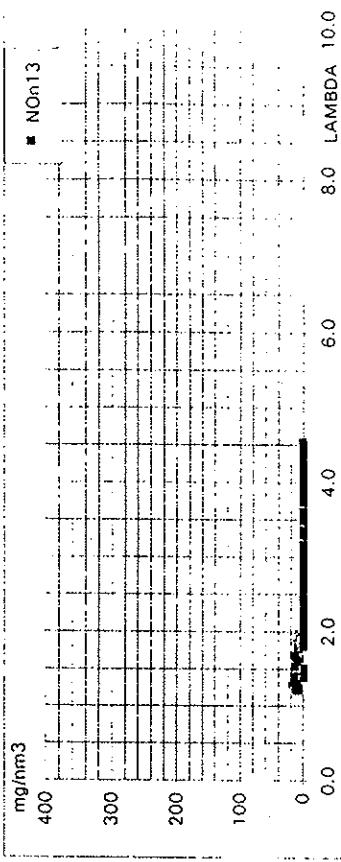
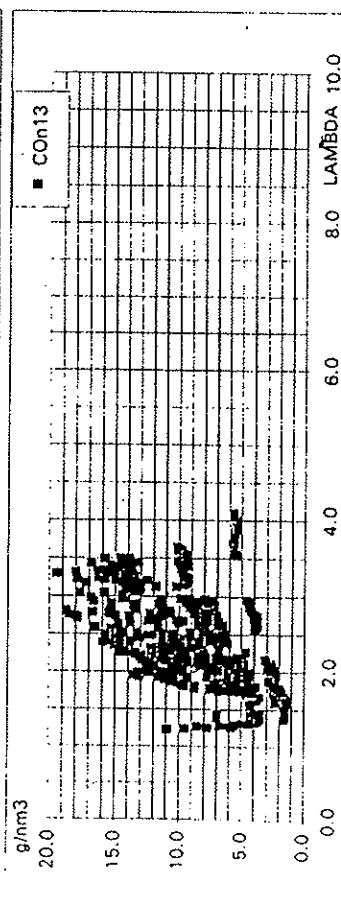
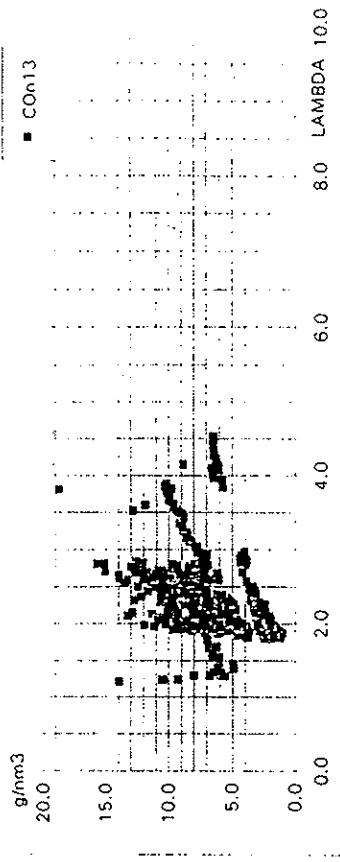
Versuch 250894



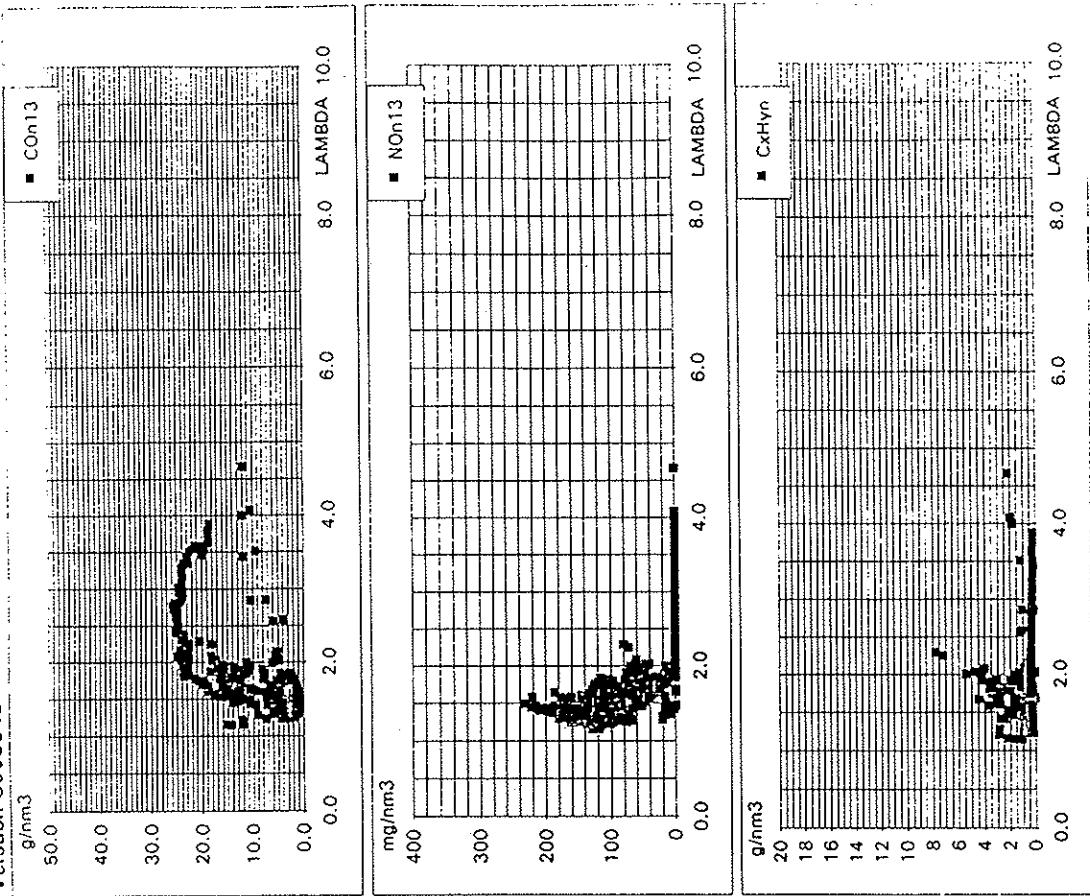
Versuch 260894



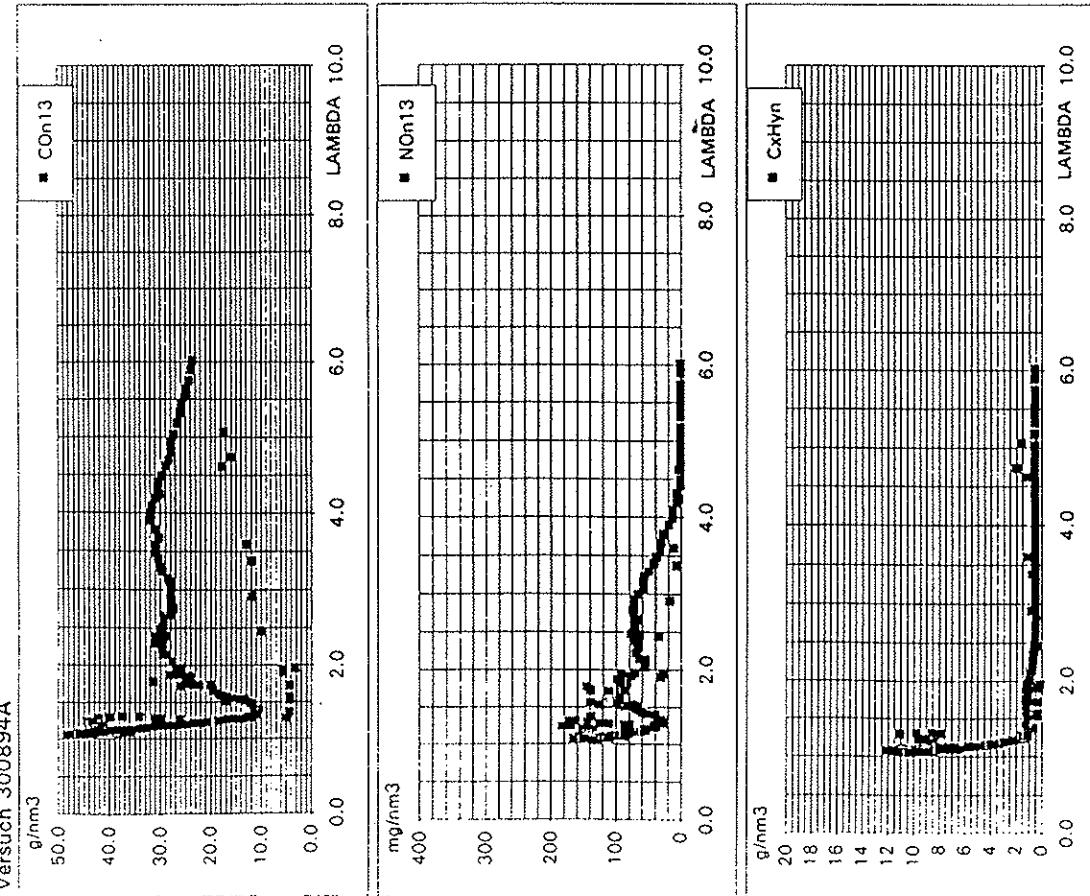
Versuch 290894



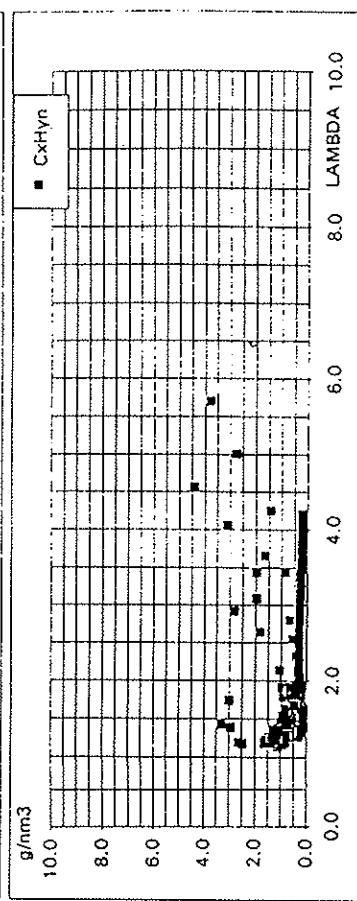
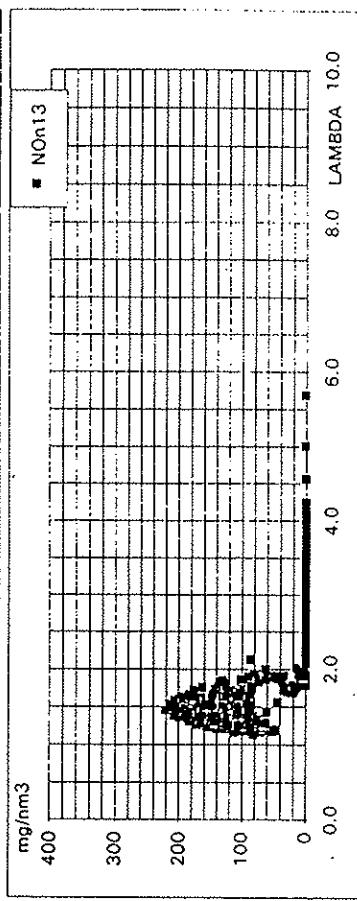
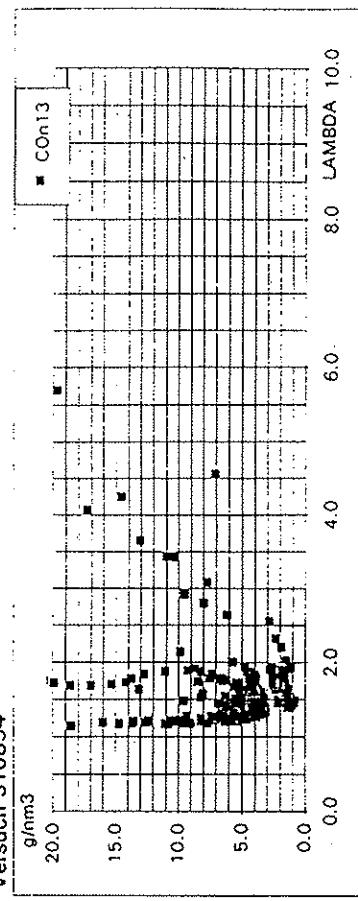
Versuch 300894A



Versuch 300894B

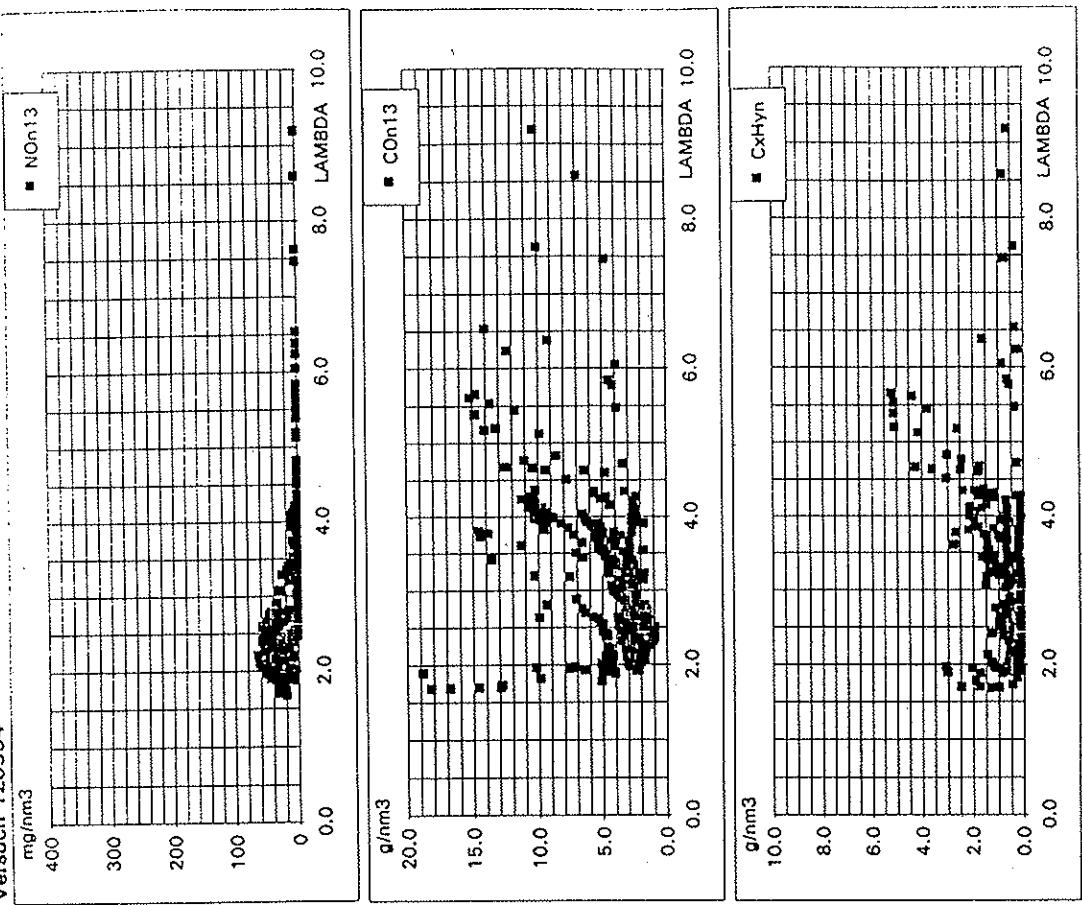


Versuch 310894



Versuch 070994

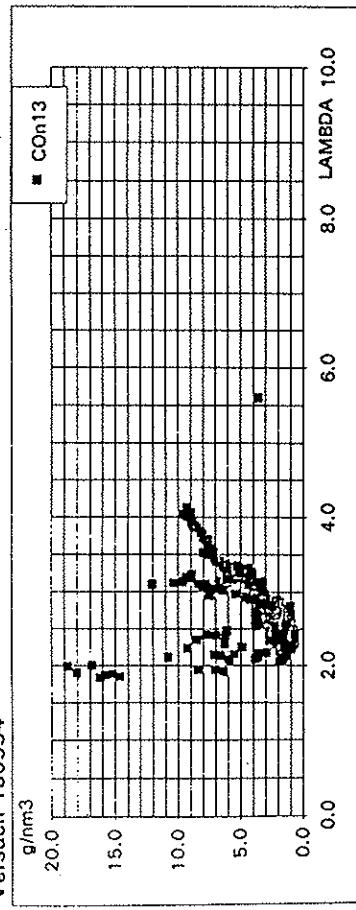
Versuch 120994



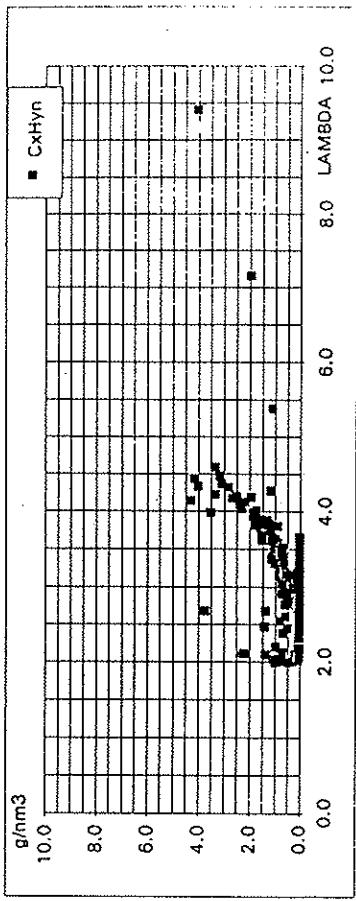
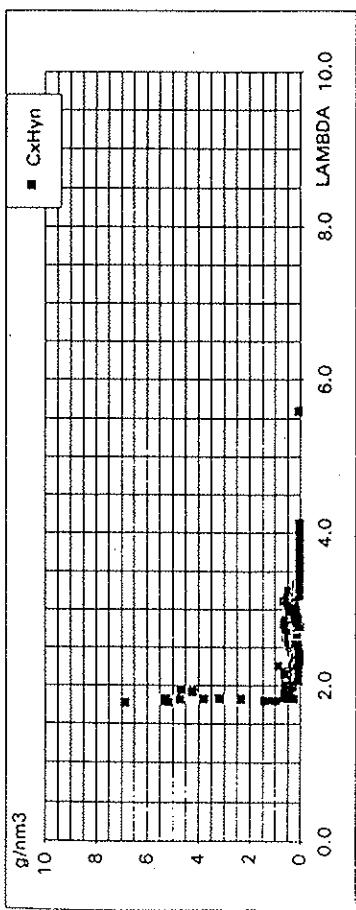
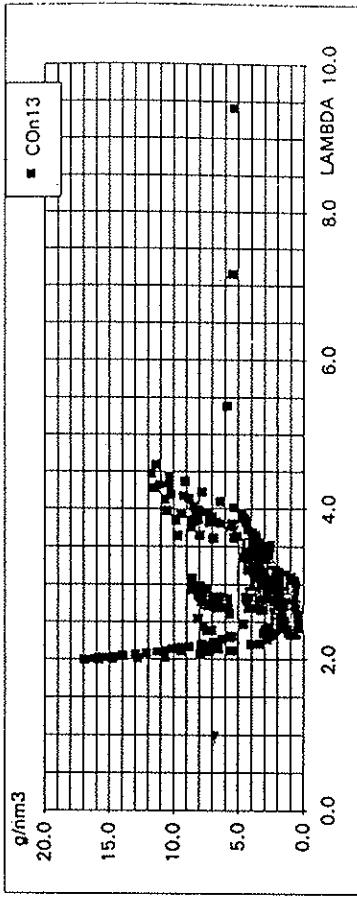
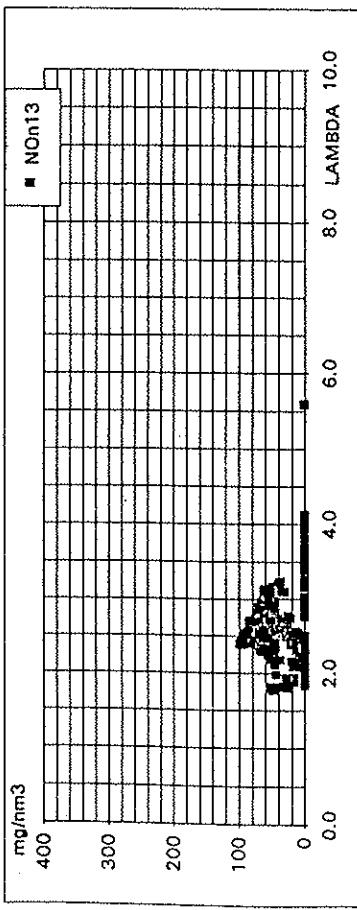
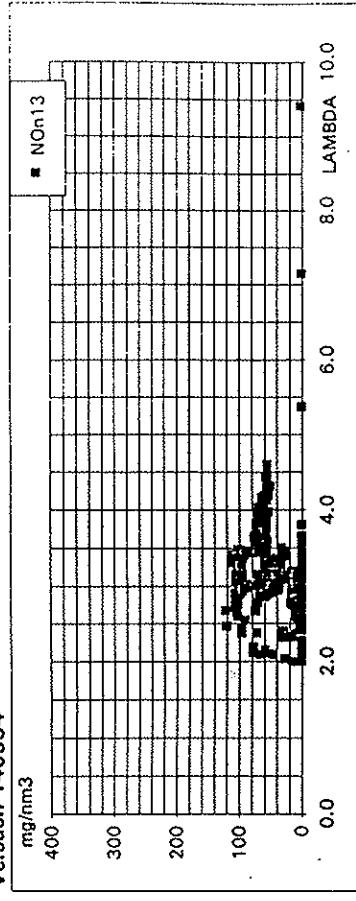
Neuer Rost Phase A Weichholz

Neuer Rost Phase B Hartholz

Versuch 130994



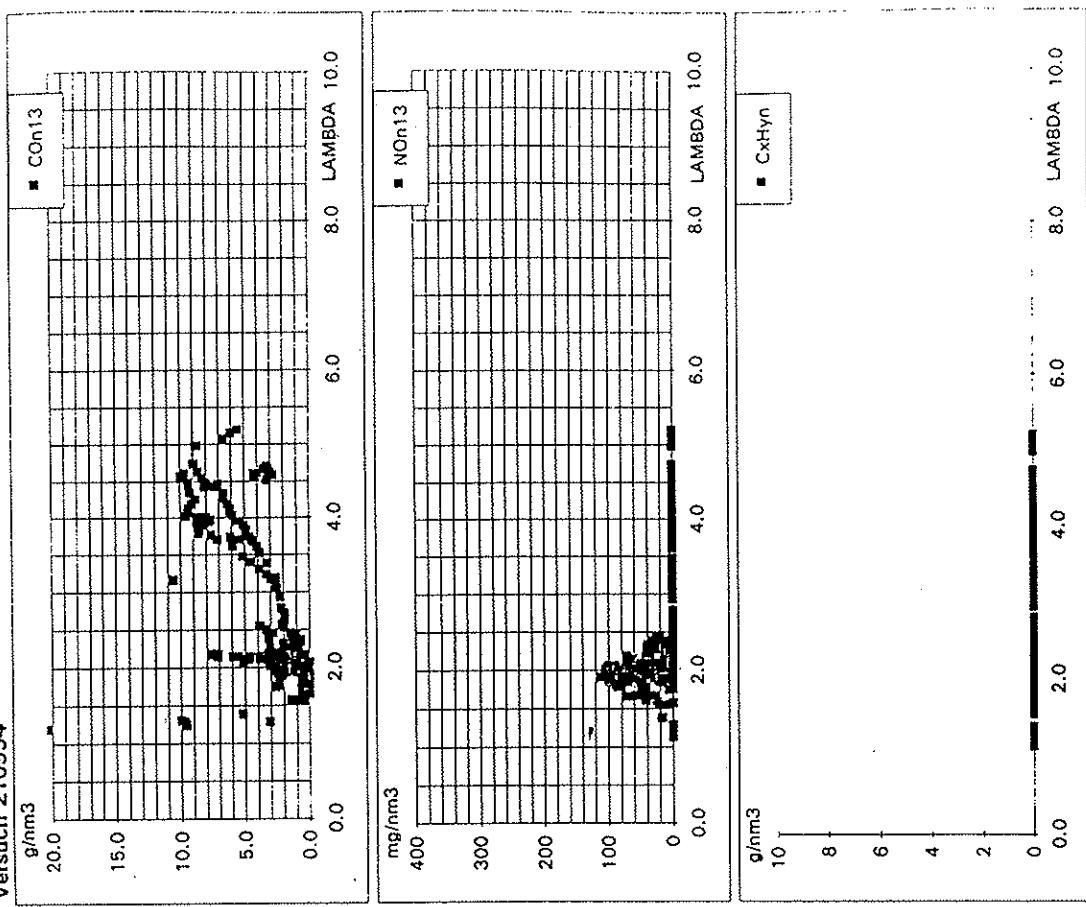
Versuch 140994



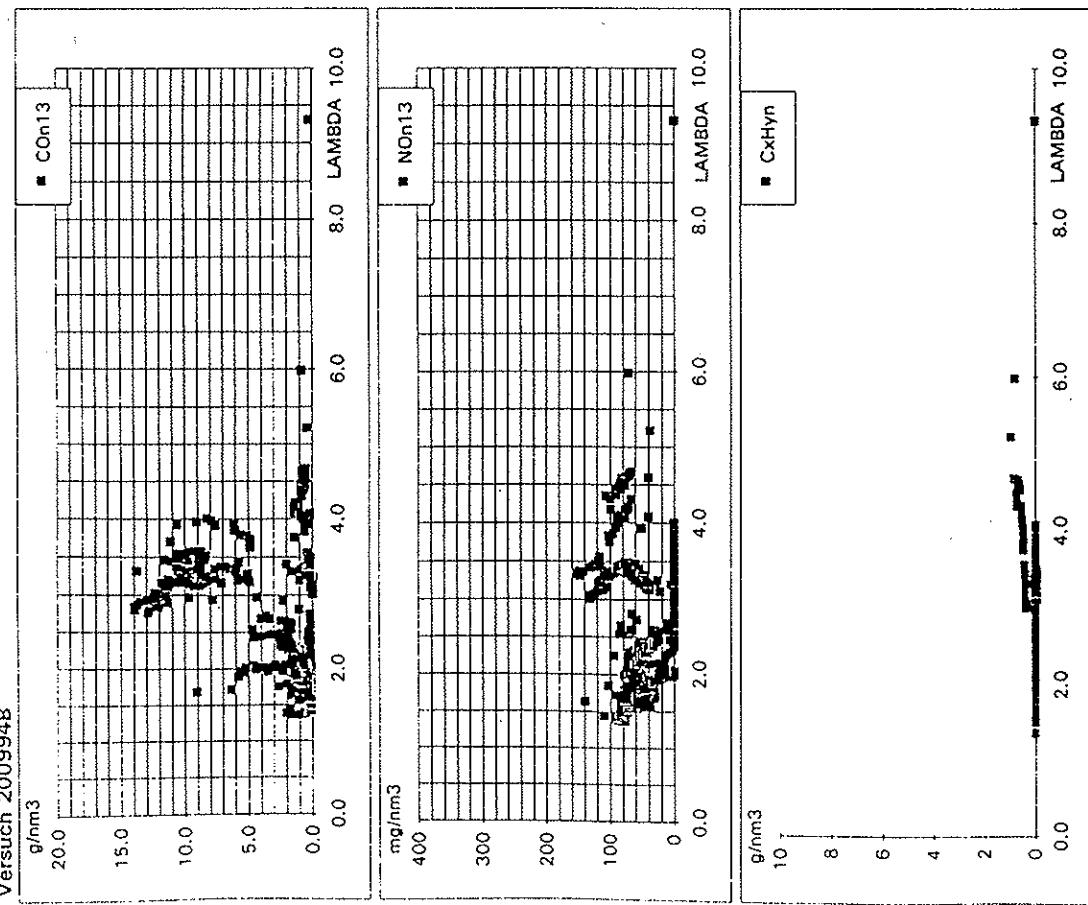
Neuer Rost Phase B

Hartholz

Versuch 210994



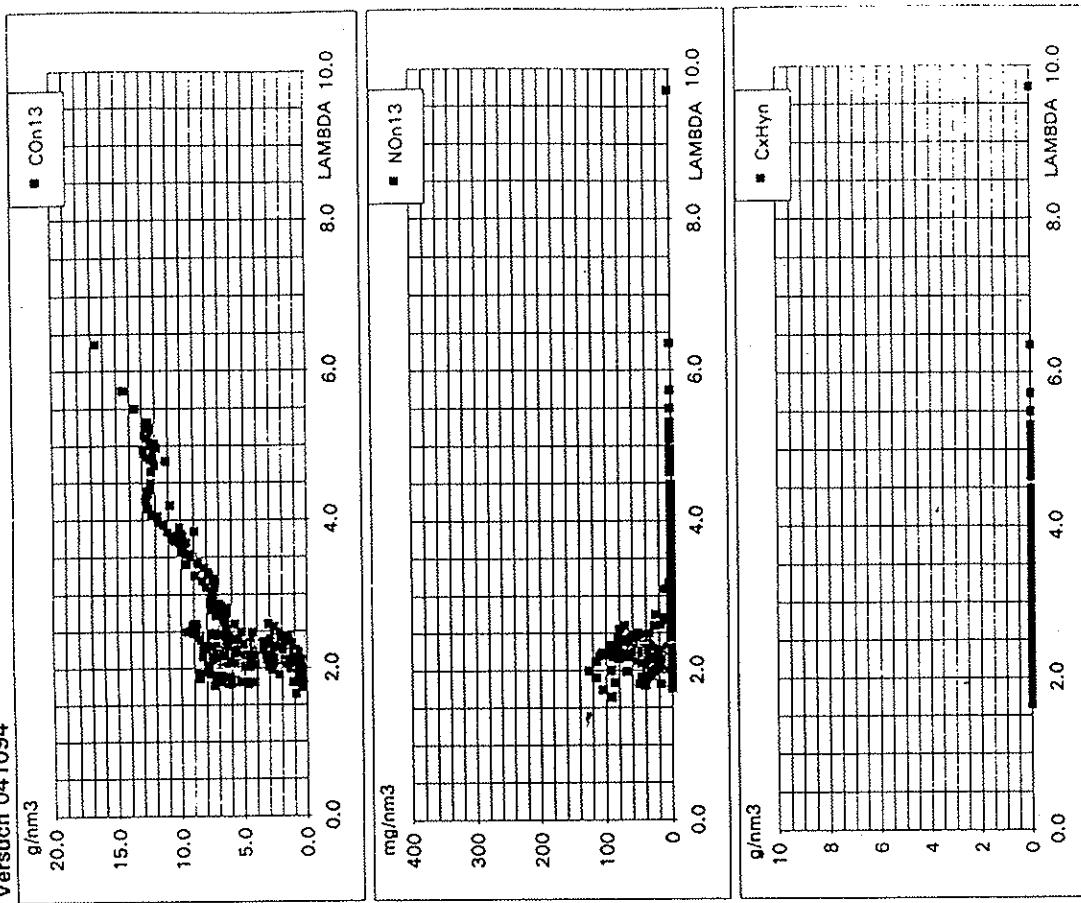
Versuch 200994B



Neuer Rost Phase C/Holznachlegen Hartholz

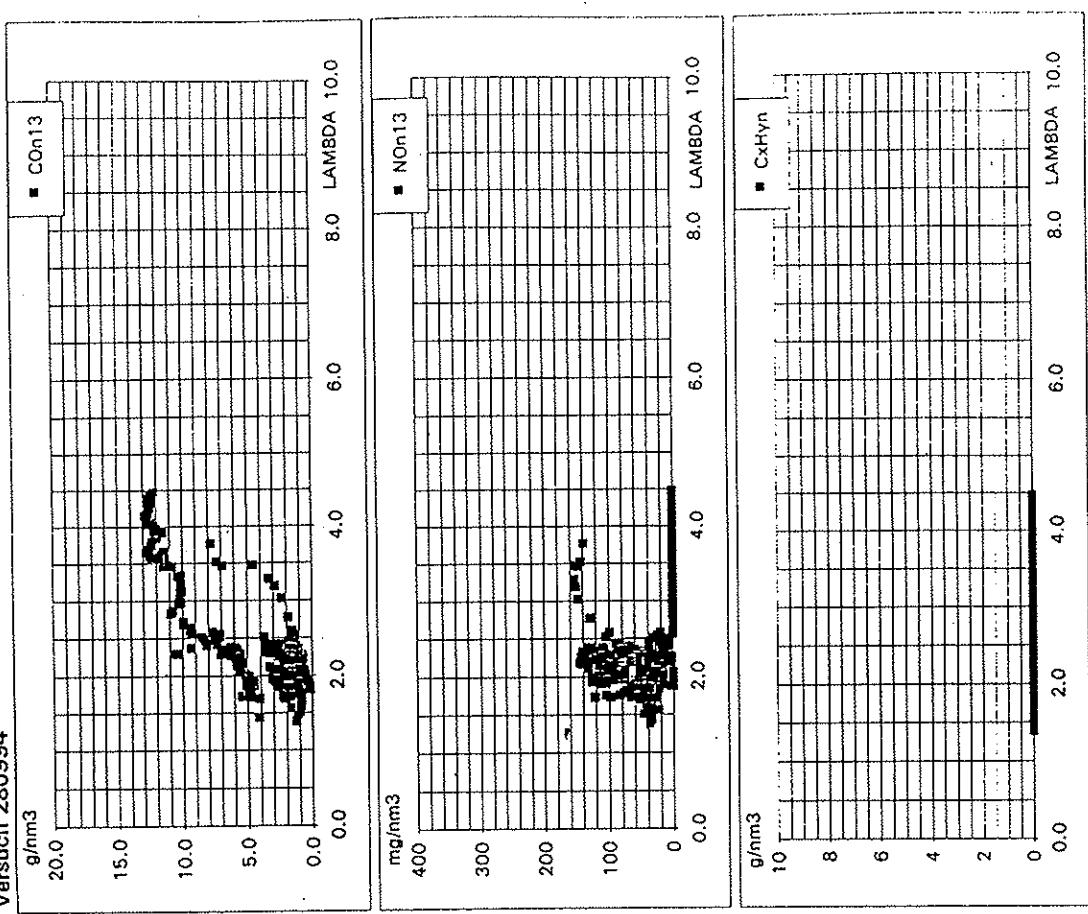
Neuer Rost Phase C Hartholz

Versuch 041094

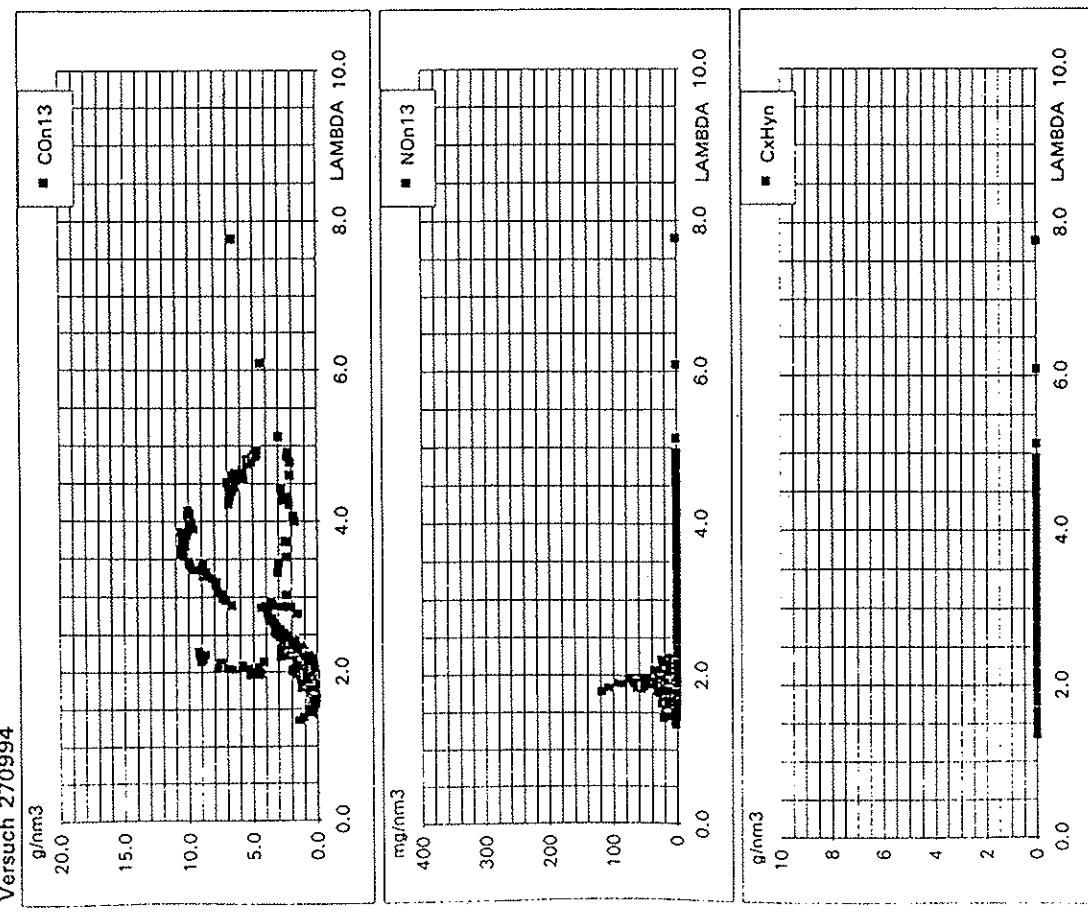


Neuer Rost Phase C/Holznachlegen Hartholz

Versuch 270994

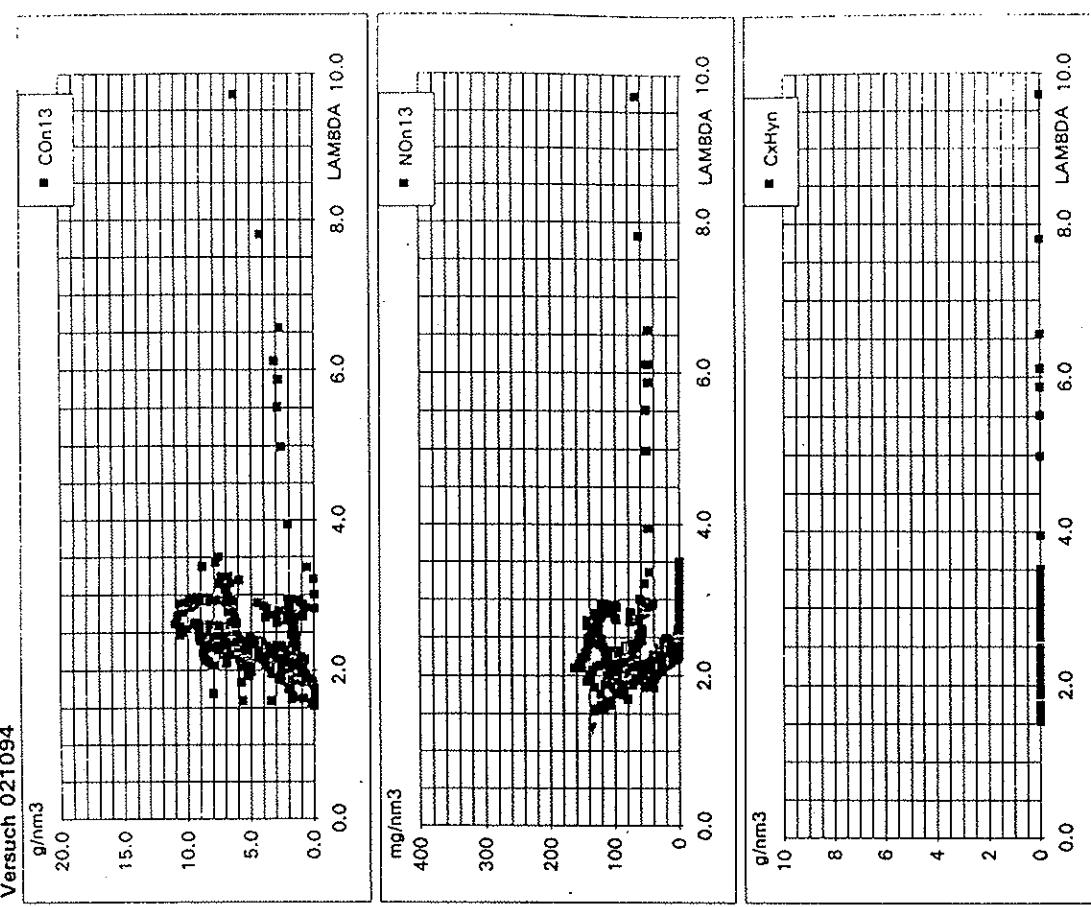


Versuch 280994

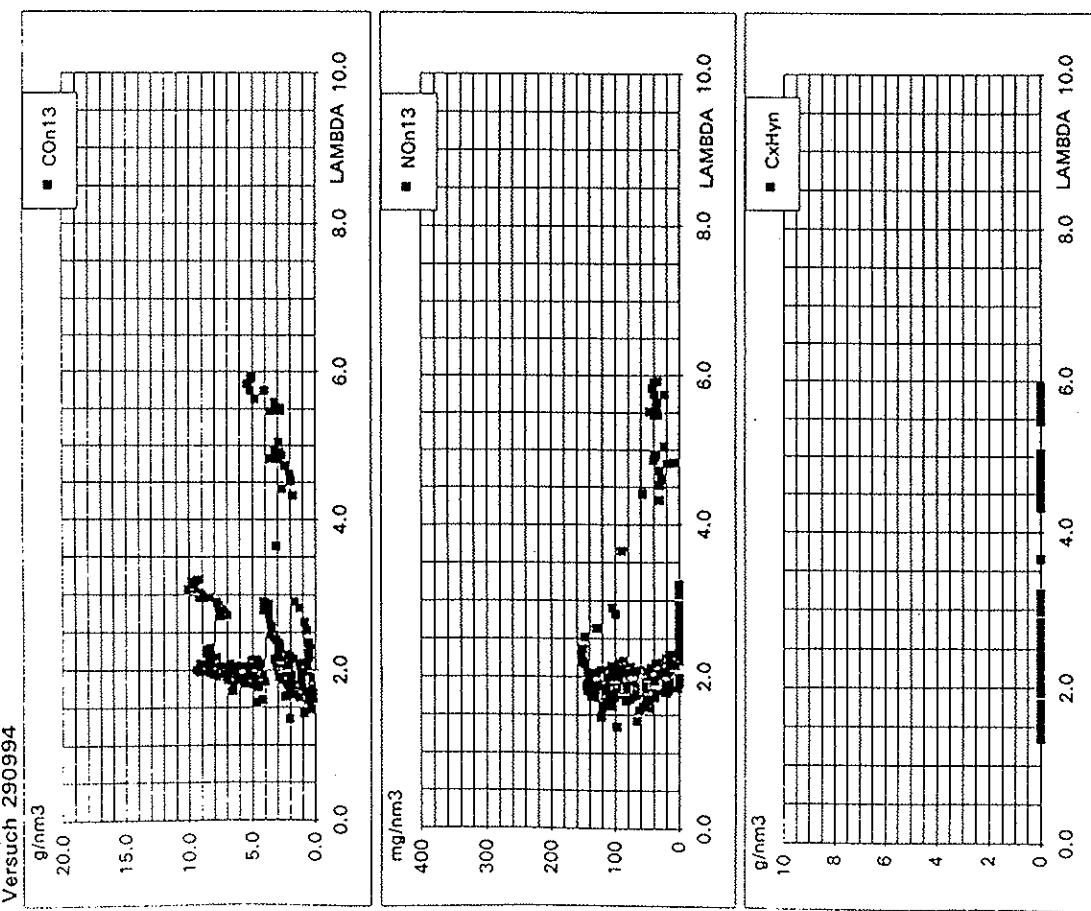


Neuer Rost Phase C/Anfeuermodul Hartholz

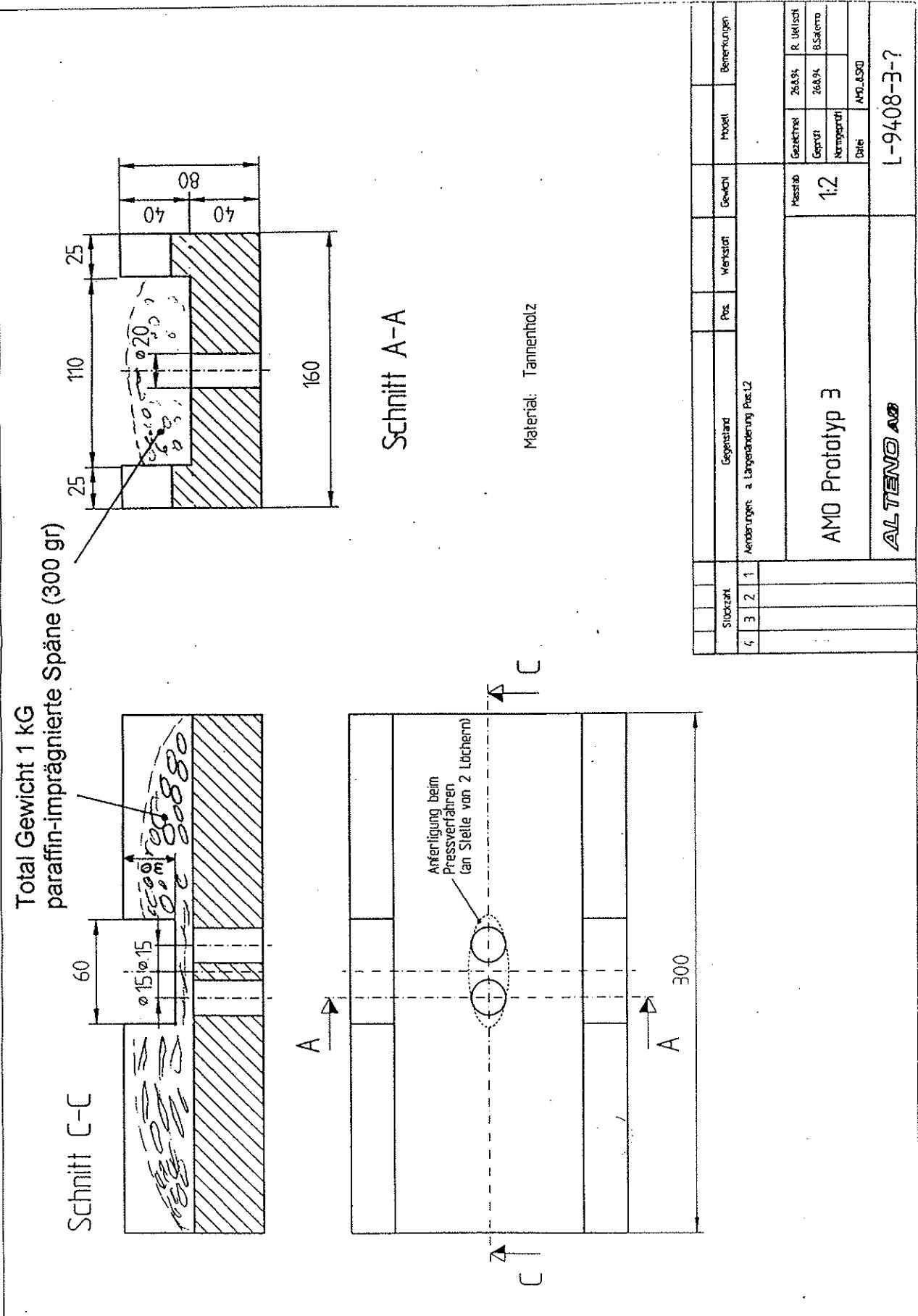
Versuch 021094



Versuch 290994



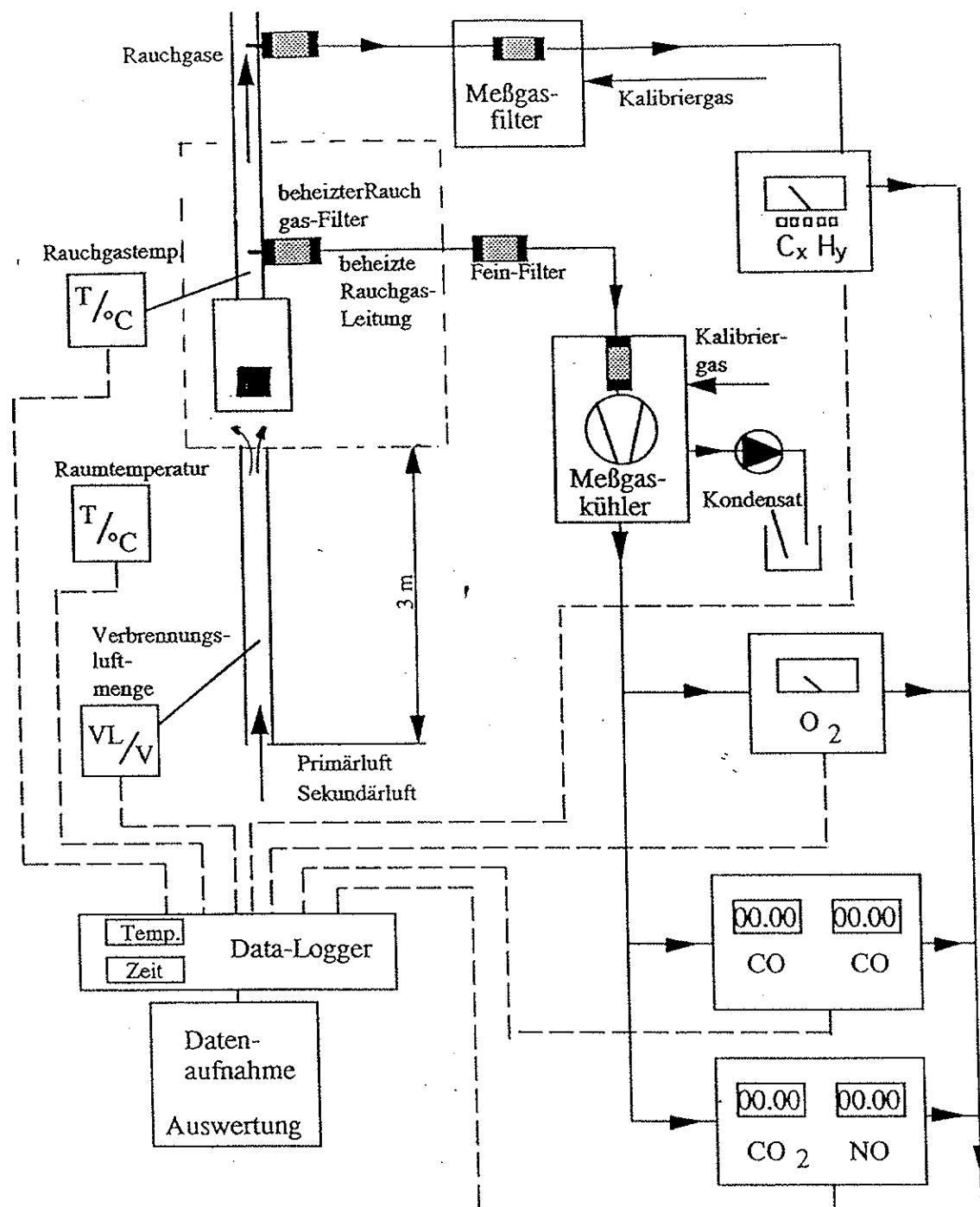
## ANHANG E: Anfeuermodul



## ANHANG F: Messinstallation

### Messgerätezusammenstellung der Abgasanalyse

Messgrösse	Messbereich	Genauigkeit	Messprinzip	Fabrikat	Modell
Kohlendioxid CO2	0-20 Vol %	+- .2 Vol%	nichtdispersive Infrarot-Absorption	Siemens Ultramat	22P
Stickstoffmonoxid NO	0-1500 mg/nm3	+- 15 mg/nm3	nichtdispersive Infrarot-Absorption	Siemens Ultramat	22P
Kohlenmonoxid CO	0-10 %	+- 0.1 Vol%	nichtdispersive Infrarot-Absorption	Siemens Ultramat	22P
Kohlenmonoxid CO	0-1000 ppm	+- 30 ppm	nichtdispersive Infrarot-Absorption	Siemens Ultramat	22P
Sauerstoff O2	0-30 %	+- 0.3 Vol%	Paramagnetische Eigenschaft von O2 im Magnetfeld	ASAG Instrument	OX-1
Abgas-temperatur	-1300 °C	+- 5 °C	Thermospannung	Thermocoax	TYP J
Raum-temperatur	-1300 °C	+- 5 °C	Thermospannung	Thermocoax	TYP J
Verbrennungsluftmenge	1-200 nm3/h	+- 1 nm3/h	Temperaturdifferenz zwischen angeströmten und nicht angeströmten Sensor	FCI	FR-72
Kohlenwasserstoffe CxHy	0-10'000 ppm		Flammen-Ionisationsdetektor	J. U. M.	FID VE 7



## ANHANG G: Berechnungsverfahren

### Mittelwertbildung

Für die Stoffkonzentrationen im Abgas ist die folgende Gleichung Basis für die Mittelwertbildung

$$X_M = \frac{\sum_{t=0}^{t=t1} X * V * \Delta t}{\sum_{t=0}^{t=t1} V * \Delta t}$$

X<sub>M</sub> Mittelwert von CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC, NO (mg/nm<sup>3</sup> oder ppm oder VOL %)  
X punktueller Wert von CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC, NO (mg/nm<sup>3</sup> oder ppm oder VOL %)  
V punktueller Wert Volumenstrom (nm<sup>3</sup>/h)  
Δt Zeit-Intervall (Min.)  
t Zeit  
t1 Zeitpunkt in dem CO<sub>2</sub> kleiner als 2% bleibt

### Normierung

$$X_n = X * \frac{21 - \%O_{2n}}{21 - \%O_2}$$

X<sub>n</sub> normierter Wert (punktuell oder Mittelwert)  
X punktueller Wert oder Mittelwert von CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC, NO (mg/nm<sup>3</sup> oder ppm oder VOL %)  
%O<sub>2n</sub> Norm-Konzentration Sauerstoff  
%O<sub>2</sub> Sauerstoffkonzentration (punktuell oder Mittelwert)

### Startphase

Die erste 20 Minuten eines Abbrand wurden unabhängig von der Emissionen als Starphase bezeichnet.

