

KfK 4923  
September 1991

# **Untersuchungen zum stationären und dynamischen Verhalten der Feuerung an der Versuchsanlage zur Müllverbrennung TAMARA**

**K. Mittag, H.-G. Dittrich**  
**Institut für Datenverarbeitung in der Technik**  
**Laboratorium für Isotopentechnik**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



*Kernforschungszentrum Karlsruhe*

*Institut für Datenverarbeitung in der Technik*

*Laboratorium für Isotopentechnik*

*KfK 4923*

**Untersuchungen zum  
stationären und dynamischen Verhalten der Feuerung  
an der Versuchsanlage zur Müllverbrennung  
TAMARA**

*K. Mittag, H.-G. Dittrich*

*Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe*

Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## **Zusammenfassung**

### ***Untersuchungen zum stationären und dynamischen Verhalten der Feuerung an der Versuchsanlage zur Müllverbrennung TAMARA***

Eine Voraussetzung für eine optimale Prozeßführung bei der Müllverbrennung ist die Kenntnis des dynamischen Verhaltens der Feuerung bei Änderungen von Prozeßzuständen. Hierzu wurden an der Versuchsanlage TAMARA Experimente durchgeführt, bei denen nach ausreichend langem stationärem Betrieb der Unterluftstrom und der Müllmassenstrom sprunghaft geändert wurden. Ebenso wurden einige Einstellungen bei Holz vorgenommen. Die Auswirkungen hiervon auf die Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration, auf die Feuerraum- und Rosttemperaturen sowie auf die Feuerlänge auf dem Rost wurden sowohl für das stationäre als auch für das dynamische Verhalten analysiert.

Bei Änderungen der Stellgröße Unterluftstrom ändern sich die Zustandsgrößen Sauerstoff-, Kohlendioxidkonzentration sowie Feuerraumtemperatur kurzzeitig von dem sich langfristig einstellenden stationären Zustand weg. Die Ursache hierfür ist eine kurzzeitig verstärkte oder verminderte Verbrennung durch die erhöhte oder verminderte Luftzufuhr, welche z.B. die Sauerstoffkonzentration anfangs kurzzeitig drastisch vermindert oder vermehrt.

Beispielhaft werden die Möglichkeiten der Korrelationsanalyse zur Bestimmung von zeitlichen Verzögerungen zwischen Zustandsgrößen und zur Störfallfrühdia-gnose aufgezeigt.

## **Abstract**

### ***Experiments towards the stationary and dynamical behavior of the combustion at the incineration research plant TAMARA.***

The knowledge of the dynamical behavior of the combustion concerning changes in process states is a necessary requirement for an optimal process control of an incineration plant. In this context experiments were run at the incineration research plant TAMARA in which the under-grate-air and the waste streams were changed in steps after sufficiently long stationary operation periods. In addition some experiments were done replacing the waste by wood. The resulting changes in oxygen and carbondioxide concentrations, on combustion and grate temperatures as well as on the length of the grate fire were analysed both for the stationary and for the dynamical behavior.

Sudden changes in the under-grate-air causes the combustion state described by oxygen and carbon dioxide concentrations as well as by combustion temperature to move temporarily into a direction opposite to the stationary state. This is caused by a suddenly and temporarily increased or decreased combustion on the grate due to the increased or decreased under-grate-air.

In addition the possibilities to use the correlation analysis for process control are demonstrated in determining the time delay between state variables and determining instrument faults.

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Einleitung	1
2. Versuchsbedingungen	1
3. Stationäre Zustände	2
4. Dynamisches Verhalten	3
4.1 Rosttemperaturen und Feuerlänge	3
4.2 Auswirkungen von impulsartiger Änderung des Unterluftstroms	4
4.3 Auswirkungen von sprungartiger Änderung des Unterluftstroms	4
5. Korrelationsanalysen von Zustandsgrößen	6
5.1 Verzögerungen zwischen Zustandsgrößen	6
5.2 Ursachen von Änderungen von Zustandsgrößen, Überwachung von Meßgrößen	6
6. Schlußfolgerungen	7
7. Literaturverzeichnis	7
8. Danksagung	7
9. Verzeichnis der Abbildungen	8

## 1. Einleitung

Eine Voraussetzung für eine optimale Prozeßführung bei der Müllverbrennung ist die Kenntnis des dynamischen Verhaltens der Feuerung bei Änderungen von Prozeßzuständen. Hierzu wurden an der Versuchsanlage TAMARA [1] Experimente durchgeführt, bei denen der Unterluftstrom und der Müllmassenstrom sprungartig geändert wurden. Ebenso wurden einige Einstellungen bei Holz vorgenommen. Die Auswirkungen hiervon auf die Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration sowie auf die Feuerraumtemperatur wurden mit Hilfe eines Softwarepakets [2] analysiert und im Folgenden beschrieben.

## 2. Versuchsbedingungen

Die unabhängigen Stellgrößen Unterluftstrom und Müllmassenstrom wurden jeweils über eine Zeitdauer von 6 h nach einer Parameteränderung konstant gehalten, um die stationären Zustände ausreichend genau bestimmen zu können. Danach wurde entweder der Luft- oder der Müllmassenstrom sprungartig geändert. Die Unterluft war auf 3 Zonen verteilt. Die relative Aufteilung des Luftstroms auf diese Zonen betrug während der ganzen Versuchsreihe 1 : 4 : 1. Das Versuchsprogramm ist in Tab. 1 zusammengestellt. Die Einstellungsänderungen sind in Abb. 1 - 5 als Funktion der Zeit aufgezeichnet. Zusätzlich wurde nach Erreichen des stationären Zustands bei einer Parametereinstellung der Unterluftstrom in der mittleren Rostzone kurzzeitig stark geändert, und zwar sowohl vergrößert als auch verkleinert (Abb. 5).

Die Änderung des Prozeßzustands wurde durch Messung der Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen sowie der Feuerraumtemperatur beobachtet. Die Sauerstoffkonzentration wurde sowohl im feuchten als auch im trockenen Rohgas (Meßstellen Q501 und O2\_1), die Kohlendioxidkonzentration nur im trockenen Rohgas (Meßstelle CO21) bestimmt. Die Feuerraumtemperatur wurde in der Nachbrennzzone im 1. Zug gemessen (Meßstelle T108).

Die wichtigsten Betriebsparameter für den Feuerungsteil, die während der ganzen Versuchszeit konstant gehalten wurden, waren:

Rosteinstellung	Hub	Totzeit
Rost 1	20 %	30 s
Rost 2	12,5 %	0 s
Seitenwandluft	200 m <sup>3</sup> /h	
Luftvorwärmung	140 C	
Temperatur nach LUVO	230 C	

Als Brennstoff wurde verwendet:

1. Holz-Hackschnitzel
2. 75% Hausmüll-Siebgut 0 - 25 mm + 25% Calomat

Tag	Zeit	Brennstoff (kg/h)	Primärluft (m <sup>3</sup> /h)	Nummer
anfahren Montag 17. 4. 89	11 Uhr	Holz 200	109/435/109 (109%)	1
	17 Uhr	Müll 250	109/435/109 (109%)	
	22 Uhr	Müll 263	109/435/109 (109%)	
Dienstag 18. 4. 89	8 Uhr	Müll 263	80/320/ 80 ( 80%)	2
	14 Uhr	Müll 263	60/240/ 60 ( 60%)	3
	20 Uhr	Müll 263	100/400/100 (100%)	4
Mittwoch 19. 4. 89	2 Uhr	Müll 238	100/400/100 (100%)	5
	8 Uhr	Müll 238	60/240/ 60 ( 60%)	6
	14 Uhr	Müll 238	40/160/ 40 ( 40%)	7
	20 Uhr	Müll 238	80/320/ 80 ( 80%)	8
Donnerstag 20. 4. 89	2 Uhr	Müll 238	100/400/100 (100%)	9
	8 Uhr	Müll 238	120/480/120 (120%)	10
	14 Uhr	Holz 238	120/480/120 (120%)	11
	20 Uhr	Holz 238	100/400/100 (100%)	12
Freitag 21. 4. 89	2 Uhr	Holz 238	90/360/ 90 ( 90%)	13
	8 Uhr	Holz 238	40/160/ 40 ( 40%)	14
	14 Uhr	Holz 238	60/240/ 60 ( 60%)	15
	abfahren 17 Uhr	Holz 238	60/240/ 60 ( 60%)	

Tab. 1 Versuchsprogramm

### 3. Stationäre Zustände

Der Ofen ist mit einem 2-Zonen- Vorschubrost ausgerüstet. Die beiden Roste sind durch eine Abbruchkante getrennt. Rost 1 besteht aus 7, Rost 2 aus 6 Reihen von Stäben. Die Verweildauer des Brennstoffs auf dem Rost beträgt etwa 30 Minuten. Ein Maß dafür, wie lange es dauert, bis sich nach den Sprüngen der Regelgrößen jeweils konstante Zustände eingestellt haben, sind die Rosttemperaturen. In den Abb. 6 - 10 sind einige Rosttemperaturen für den Verlauf der Meßreihen dargestellt. Es zeigt sich, daß, abgesehen vom Anfahrverhalten, es 4 bis 6 Stunden dauert, bis die Rosttemperaturen als stationär angesehen werden können.

Der Einfluß des Unterluft- und des Müllmassenstroms auf die Zustandsgrößen Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration sowie Feuerraumtemperatur ist in den Abb. 11 - 14 zusammengefaßt. Die eingetragenen Punkte wurden durch lineare Regression der Meßdaten ermittelt. Hierzu wurden Zeitintervalle ausgewählt, während derer die Zustandsgrößen sich schon weitgehend ihrem Grenzwert angenähert hatten. Für jeden der drei eingestellten Müllströme wurden an die so erhaltenen Ergebnisse nochmals Regressionsgeraden angepaßt und diese in die Abbildungen eingezeichnet. Außerdem wurde zu jedem Punkt die Nummer der Einstellung geschrieben, aus der entnommen werden kann, in welcher Reihenfolge die Einstellungen vorgenommen wurden. Diese Nummern sind auch in der Tab. 1 enthalten.

Die Zustandsgrößen sind als Funktion der Summe der drei Unterluftströme aufgetragen, da diese jeweils gemeinsam um denselben Faktor geändert wurden. Eine genauere Analyse des Einflusses der verschiedenen Unterluftzonen auf die Verbrennung bleibt weiteren Messungen vorbehalten.

Die Feuerung wurde mit Luftüberschuß gefahren. Daher nimmt - wie erwartet - mit zunehmendem Unterluftstrom die Sauerstoffkonzentration zu und die Kohlendioxidkonzentration sowie die Feuerraumtemperatur ab, letztere weil die überschüssige Luft erwärmt werden muß. Umgekehrt verhält es sich bei Zunahme des Müllstroms, wobei mehr Sauerstoff verbraucht wird, mehr Kohlendioxid entsteht und mehr Wärme freigesetzt wird.

An Abb. 14 fällt auf, daß die bei konstantem Müllmassenstrom von 238 kg/h durchgeführten Einstellungen über einen Zeitraum von 30 h nicht reversibel verlaufen (Einstellungen 5 bis 10). Ursachen hierfür können Heizwertschwankungen des Mülls - z.B. durch sich ändernde Feuchte - oder eine hohe Zeitkonstante bei der Änderung der Temperatur der Feuerraumwände sein, die über Strahlungswärme einen sich nur über einen Zeitraum von mehreren Stunden bemerkbar machenden Einfluß auf die Feuerraumtemperatur hat.

#### **4. Dynamisches Verhalten**

##### **4.1 Rosttemperaturen und Feuerlänge**

Die Abb. 6 und 9 zeigen deutlich das unterschiedliche Abbrandverhalten von Holzschnitzeln und Müll. Das Temperaturmaximum befindet sich bei Holz auf der hinteren Hälfte des Rostes 1, wogegen es sich beim Übergang auf Müll auf die vordere Hälfte des Rostes 2 verschiebt. Dies ist eine Folge des unterschiedlichen Zündverhaltens der beiden Brennstoffarten.

Aus den Abb. 7 - 9 kann man für den Brennstoff Müll das Wandern des Feuers auf den Rosten bei Veränderung des Unterluftstroms ablesen. Bei hoher Luftzufuhr ist der Ausbrand im vorderen Teil des Rostes 2 bereits abgeschlossen. Wenn die Luftzufuhr verringert wird, steigt die Temperatur auf Rost 2 sehr deutlich an, das Maximum der Wärmefreisetzung verlagert sich zu seinem Ende hin.

Es zeigt sich also, daß die Rosttemperatur als eine Zustandsgröße zur Überwachung der Feuerlänge herangezogen werden kann. Dies ist wichtig um sicherzustellen, daß der Ausbrand am Rostende vollständig abgeschlossen ist. Allerdings reagiert die Rosttemperatur wegen der großen Wärmekapazität des Rostes stark verzögert auf Verschiebungen des Feuers, so daß die Überwachung des Feuers mit Video- oder Infrarotkameras sicher vorzuziehen ist.

Bemerkenswert ist außerdem, daß bei einer Verringerung der Luftzufuhr die Temperatur am Ende von Rost 1 zunächst deutlich abfällt und erst etwa 1 Stunde nach dem Parametersprung wieder zu steigen beginnt, schließlich bis über die Temperatur vor dem Sprung hinaus (z.B. Abb. 8). Umgekehrt verhält es sich bei Erhöhung der Luftzufuhr. Dies kann nicht als Folge einer Verlagerung der Hauptbrandzone erklärt werden, sondern es resultiert aus den dynamischen Eigenschaften der Feuerung, was in den nächsten Abschnitten beschrieben ist.

#### **4.2 Auswirkungen von impulsartiger Änderung des Unterluftstroms**

Eine kurzzeitige drastische Erhöhung oder Erniedrigung des Unterluftstroms gibt interessante Hinweise auf die Dynamik des Abbrandes auf dem Rost. Ergebnisse hierzu sind in den Abb. 15 - 24 zusammengestellt. Verändert wurde bei diesem Experiment nur der Luftstrom in der mittleren Unterluftzone. In diesen Abbildungen sind als Funktion der Zeit der mittlere Unterluftstrom, die Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen sowie die Feuerraumtemperatur wiedergegeben.

Es zeigt sich, wie sich beim genaueren Studium der Rosttemperaturen zuvor schon angedeutet hatte, daß die Erhöhung des Luftstroms anfänglich zu einer Erniedrigung der Sauerstoffkonzentration und einer Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration und Feuerraumtemperatur kommt (Abb. 17, 19, 21, 23). Das Verringern des Luftstroms ruft umgekehrte Folgen hervor (Abb. 18, 20, 22, 24). Beim Ende des kurzzeitigen Luftstromimpulses drehen sich dann die Verhältnisse genau um.

Diese Zustandsänderungen verhalten sich genau entgegengesetzt zu denen, die sich bei Änderungen der Unterluft schließlich als stationäre Zustände einstellen (Abb. 11 - 14) und sind daher für ein einfaches Regelsystem nur durch Einstellung hinreichend großer Zeitkonstanten zu beherrschen.

Die Erklärung für dieses dynamische Verhalten hängt mit dem zusammen, was man vom Anfachen eines Feuers durch kräftiges Zuführen von Luft kennt. Durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit der zugeführten Luft kann diese schneller zu den glühenden Brennstoffteilchen transportiert werden und sie dringt auch tiefer in die Mikrostrukturen des Gutbettes ein. Dadurch wird die Abbrandrate kurzzeitig stark erhöht, so daß es trotz vermehrter Luftzufuhr zu einer Verringerung der Sauerstoffkonzentration in den Verbrennungsgasen kommt. Einher geht damit die Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration und der Rauchgastemperatur.

Im anderen Fall der Verringerung der Luftzufuhrrate erniedrigt sich die Strömungsgeschwindigkeit der Luft, die glühenden Brennstoffteilchen erhalten weniger Luft als zuvor, können daher nicht mehr so schnell verbrennen und überdies dringt die Luft nicht mehr so tief in die Mikrostrukturen des Gutbetts ein und erreicht damit nur noch Bereiche, die schon weitgehend oxidiert sind. Daher erhöht sich anfangs die Sauerstoffkonzentration im Abgas, obwohl doch weniger Luft zugeführt wurde, und Kohlendioxidkonzentration und Rauchgastemperatur sinken.

#### **4.3 Auswirkungen von sprungartiger Änderung des Unterluftstroms und des Müllstroms**

Die im vorigen Abschnitt beschriebene Dynamik des Abbrandverhaltens stellt man natürlich auch bei den sprungartigen Änderungen des Unterluftstroms fest, wie sie in dem Versuchsprogramm durchgeführt und in Abb. 1 - 5 dargestellt wurden. Beispielhaft sind für einen Sprung des Luftstroms die Änderungen von Sauerstoff-, Kohlendioxidkonzentration und Temperatur als Funktion der Zeit in Abb. 25 - 29 wiedergegeben. Deutlich ist wiederum zu erkennen, daß als Antwort auf den Sprung des Luftstroms sich die Zustandsgrößen kurzzeitig von dem sich später einstellenden stationären Zustand entfernen.

Die Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen erreichen etwa 0.5 Stunden nach dem Sprung den neuen stationären Zustand. Bei der Feuerraumtemperatur dauert dies etwa doppelt solange.

Um das beschriebene dynamische Regelverhalten etwas mehr zu quantifizieren, wurden die damit verbundene Zeitkonstante und die Größe der Sprungänderung für jeden durchgeführten Parametersprung ermittelt. Als Maß für die Zeitkonstante wurde die Zeit bestimmt, die vom Beginn der Parameteränderung bis zum darauffolgenden Maximum oder Minimum der Zustandsgröße verstrich. Diese Auswertung wurde für die Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 30 als Funktion der Sprungänderung der Unterluft gezeigt. An die so erhaltenen Meßergebnisse wurde eine Ausgleichsgerade angepaßt. Wegen des Einstellverhaltens der Luftregler war es nicht möglich, eine ideale Sprungfunktion in der Luftänderung vorzunehmen, sondern es dauerte einige Zeit, bis der neue Sollwert eingestellt war. Zum Vergleich ist diese Einstellzeit zwischen Sprungende und Sprunganfang ebenfalls eingezeichnet. Die sich ergebene Zeitkonstante von etwa 10 min liegt im Bereich der Einstellzeiten, so daß sie nur als obere Grenze betrachtet werden kann.

Die Größe der Sprungänderungen von Sauerstoff-, Kohlendioxidkonzentration und Feuerraumtemperatur als Funktion der Sprungänderung des Unterluftstroms sind in Abb. 31 - 34 wiedergegeben. Deutlich erkennbar ist, daß die Steigung der Ausgleichsgeraden dem stationären Verhalten (Abb. 11 - 14) entgegen läuft. Bei der Bestimmung dieser Ausgleichsgeraden wurde ein Meßpunkt für Holz, Sprungänderung der Unterluft  $147 \text{ m}^3/\text{h}$ , nicht berücksichtigt, da er wesentlich vom Verhalten der anderen abweicht. Dieser Punkt beschreibt den Übergang von Zustand Nummer 14 zu 15 (siehe Kap. 2). Eine mögliche Ursache hierfür könnte sein, daß wegen der lockereren Packung der Holzschnitzel im Vergleich zum Müll bei Änderungen des Luftstroms die Änderung der Eindringtiefe der Luft in das Gutbett für Holz größer als für Müll ist. Je nach Packungsdichte und Brennstoffs wären danach andere funktionale Abhängigkeiten zu erwarten.

In Abb. 31 - 34 sind die absoluten Änderungen aufgetragen. Parameter sind wiederum die unterschiedlichen Müllströme. Das oben beschriebene mikroskopische Modell legt es nahe, die Zustandsgrößen als Funktion der absoluten Änderung des Luftstroms zu untersuchen, da der Luftstrom der Strömungsgeschwindigkeit der Luft annähernd proportional ist und letztere für das unterschiedliche Eindringen der Luft in die Mikrostrukturen des Gutbetts und die Sauerstofftransportgeschwindigkeit verantwortlich ist. Die Auftragung als Funktion der prozentualen Änderung ergibt allerdings eine sehr ähnliche Information.

Die vorgenommenen sprungartigen Änderungen des Müllstroms ergaben wegen unzureichender Statistik keine gesicherten Erkenntnisse.

## 5. Korrelationsanalysen von Zustandsgrößen

Die Korrelationsanalyse stationärer Zustände, denen zufällig verteilte Vorgänge überlagert sind, kann zum Auffinden systematischer Zusammenhänge zwischen Zustandsgrößen herangezogen werden.

### 5.1 Verzögerungen zwischen Zustandsgrößen

In Abb. 35 sind für einen längeren Zeitraum die Sauerstoffkonzentration und die Feuerraumtemperatur aufgetragen. Ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Zuständen und den ihnen überlagerten Schwankungen wird deutlich, wenn man den Korrelationskoeffizienten als Funktion der zeitlichen Verschiebung zwischen den beiden Meßergebnissen aufträgt (Abb. 36). Die Normierung ist so vorgenommen, daß die Autokorrelation der einzelnen Größen den Wert 1 ergibt. Es zeigt sich, daß Sauerstoffkonzentration und Feuerraumtemperatur stark korreliert sind und daß letztere etwa 5 min gegenüber ersterer verzögert ist. Für eine schnelle Regelung ist die Sauerstoffkonzentration als Zustandsgröße also besser geeignet als die Feuerraumtemperatur. Eine analoge Analyse ergibt, daß die beiden Meßstellen für die Sauerstoffkonzentration und diejenige für die Kohlendioxidkonzentration ohne signifikante Verzögerung gegeneinander anzeigen.

### 5.2 Ursachen von Änderungen von Zustandsgrößen, Überwachung von Meßgrößen

Abb. 37 gibt die gemessenen Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen über einen Zeitraum wieder, an dessen Ende die Meßgeräte Q501 und CO21 gegen 10 Uhr ausfielen. Dies ist an den Korrelationskoeffizienten zwischen diesen drei Meßsignalen deutlich zu erkennen, welche in Abb. 38 als Funktion der Zeit dargestellt sind. Hierzu wurde die Korrelation über ein Zeitfenster von 2 h berechnet, dessen Endpunkt von 9 bis 11 Uhr in Schritten von 5 min verschoben wurde. Von 7 bis 10 Uhr ist die Korrelation nahezu vollständig. Danach weist ihre deutliche Verringerung auf eine wesentliche Änderung hin. Ein Überwachungssystem zur Störfallfrüherkennung könnte diese Information weiterverarbeiten und einen Alarm auslösen.

Interessant ist auch die vollständige Korrelation zwischen den drei Zustandsgrößen im Zeitraum von 7 bis 10 Uhr, welche zeigt, daß die Schwankungen der Meßwerte gemeinsame Ursachen haben. Da es sich zum Teil um vollständig voneinander verschiedene Meßgeräte handelt, sind Meßfehler als Ursache der Schwankungen auszuschließen. Die Ursachen sind im Verbrennungsprozeß zu suchen. In Betracht kommen Heizwertschwankungen, ungleichmäßige Brennstoffzufuhr durch das Doppelklappensystem, welches den Müll schubweise in den Ofen befördert, sowie Schüren des Feuers durch die Bewegung der Roste oder durch Abwurf von Glut über die Abbruchkante zwischen Rost 1 und Rost 2. Auch bei vollständig homogenem Brennstoff lassen sich daher mehr oder weniger periodische, beim ersten Anschein statistisch verteilt erscheinende Zustandsschwankungen nicht vermeiden.

## **6. Schlußfolgerungen**

Mit Temperaturfühlern im Vorschubrost ist es möglich das Wandern der Hauptbrandzone entlang des Rostes festzustellen. Diese Information könnte ein Regelsystem verwenden, um sicherzustellen, daß die Hauptbrandzone weit genug vom Rostende entfernt ist. Allerdings sind die Verzögerungen zwischen Verlagerung des Feuers und der Temperaturänderung des Rosts wegen seiner großen Wärmekapazität erheblich. Moderne elektronische Infrarot- oder Videokamerasysteme mit anschließender Aufarbeitung der Bilder durch elektronische Bildverarbeitung sind daher dem einfachen Thermoelement im Rost überlegen.

Bei Änderungen der Regelgröße Unterluftstrom ändern sich die Zustandsgrößen Sauerstoff-, Kohlendioxidkonzentration sowie Feuerraumtemperatur kurzzeitig von dem sich langfristig einstellenden stationären Zustand weg. Die Ursache hierfür ist eine kurzzeitig verstärkte oder verminderte Verbrennung durch die erhöhte oder verminderte Luftzufuhr, welche z.B. die Sauerstoffkonzentration kurzzeitig drastisch vermindert oder vermehrt. Mit herkömmlichen Regelbausteinen (PID) bekommt man dieses Verhalten nur durch hinreichend lange Zeitkonstanten in den Griff. Wenn die Aufgabe gestellt wird, die Änderungen der Zustandsgrößen über die hiermit erreichbaren Werte hinaus zu verringern, müssen intelligentere Methoden der Prozeßführung angewendet werden.

Die Korrelationsanalyse ist geeignet, bei der Störungsfrühdiagnose auf Ausfälle von Meßgeräten hinzuweisen.

## **7. Literaturverzeichnis**

1. TAMARA - ein Forschungsinstrument des Kernforschungszentrums Karlsruhe zur Abfallverbrennung  
A. Merz, H. Vogg, Abfallwirtschaftsjournal 1 (1989) 111
2. PRO-MATLAB, The Math Works, Inc., South Natick, MA, USA

## **8. Danksagung**

Herr G. Kimmig und seine Betriebsmannschaft waren bei der Durchführung der Experimente sehr hilfreich. Herr Dr. A. Lubecki hat zusammen mit Herrn J. Depta für die Datenübetragung von dem Datenerfassungssystem der TAMARA zu dem verwendeten VAX-Rechner gesorgt. Herr J. Depta hat bei der Einarbeitung in die VAX-Computer-Welt und in die Sprache von MATLAB wertvolle Hilfestellung gegeben.

## 9. Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1 - 5. Summe der Unterluftströme und Müllmassenstrom als Funktion der Zeit  
Abb. 6 - 10. Rosttemperaturen als Funktion der Zeit  
Abb. 11. Sauerstoffkonzentration (trocken) als Funktion des Unterluftstroms  
(Stationäre Zustände)  
Abb. 12. Sauerstoffkonzentration (feucht) als Funktion des Unterluftstroms  
(Stationäre Zustände)  
Abb. 13. Kohlendioxidkonzentration als Funktion des Unterluftstroms  
(Stationäre Zustände)  
Abb. 14. Feuerraumtemperatur als Funktion des Unterluftstroms  
(Stationäre Zustände)  
Abb. 15 - 16. Mittlerer Unterluftstrom als Funktion der Zeit  
(Impulsartige Änderung)  
Abb. 17 - 18. Sauerstoffkonzentration (trocken) als Funktion der Zeit  
(Impulsartige Änderung)  
Abb. 19 - 20. Sauerstoffkonzentration (feucht) als Funktion der Zeit  
(Impulsartige Änderung)  
Abb. 21 - 22. Kohlendioxidkonzentration als Funktion der Zeit  
(Impulsartige Änderung)  
Abb. 23 - 24. Feuerraumtemperatur als Funktion der Zeit  
(Impulsartige Änderung)  
Abb. 25. Mittlerer Unterluftstrom als Funktion der Zeit  
(Sprungartige Änderung)  
Abb. 26. Sauerstoffkonzentration (trocken) als Funktion der Zeit  
(Sprungartige Änderung)  
Abb. 27. Sauerstoffkonzentration (feucht) als Funktion der Zeit  
(Sprungartige Änderung)  
Abb. 28. Kohlendioxidkonzentration als Funktion der Zeit  
(Sprungartige Änderung)  
Abb. 29. Feuerraumtemperatur als Funktion der Zeit  
(Sprungartige Änderung)  
Abb. 30. Zeit zwischen Sprunganfang und Extremum  
als Folge der sprungartigen Änderung der Unterluft  
Abb. 31. Änderung der Sauerstoffkonzentration (trocken)  
als Folge der sprungartigen Änderung der Unterluft  
Abb. 32. Änderung der Sauerstoffkonzentration (feucht)  
als Folge der sprungartigen Änderung der Unterluft  
Abb. 33. Änderung der Kohlendioxidkonzentration  
als Folge der sprungartigen Änderung der Unterluft  
Abb. 34. Änderung der Feuerraumtemperatur  
als Folge der sprungartigen Änderung der Unterluft  
Abb. 35. Sauerstoffkonzentration und Feuerraumtemperatur als Funktion der Zeit  
Abb. 36. Korrelationskoeffizienten zwischen  
Sauerstoffkonzentration und Feuerraumtemperatur  
als Funktion der zeitlichen Verschiebung der Meßreihen gegeneinander  
Abb. 37. Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen als Funktion der Zeit  
Abb. 38. Korrelationskoeffizienten zwischen  
Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen Funktion der Zeit

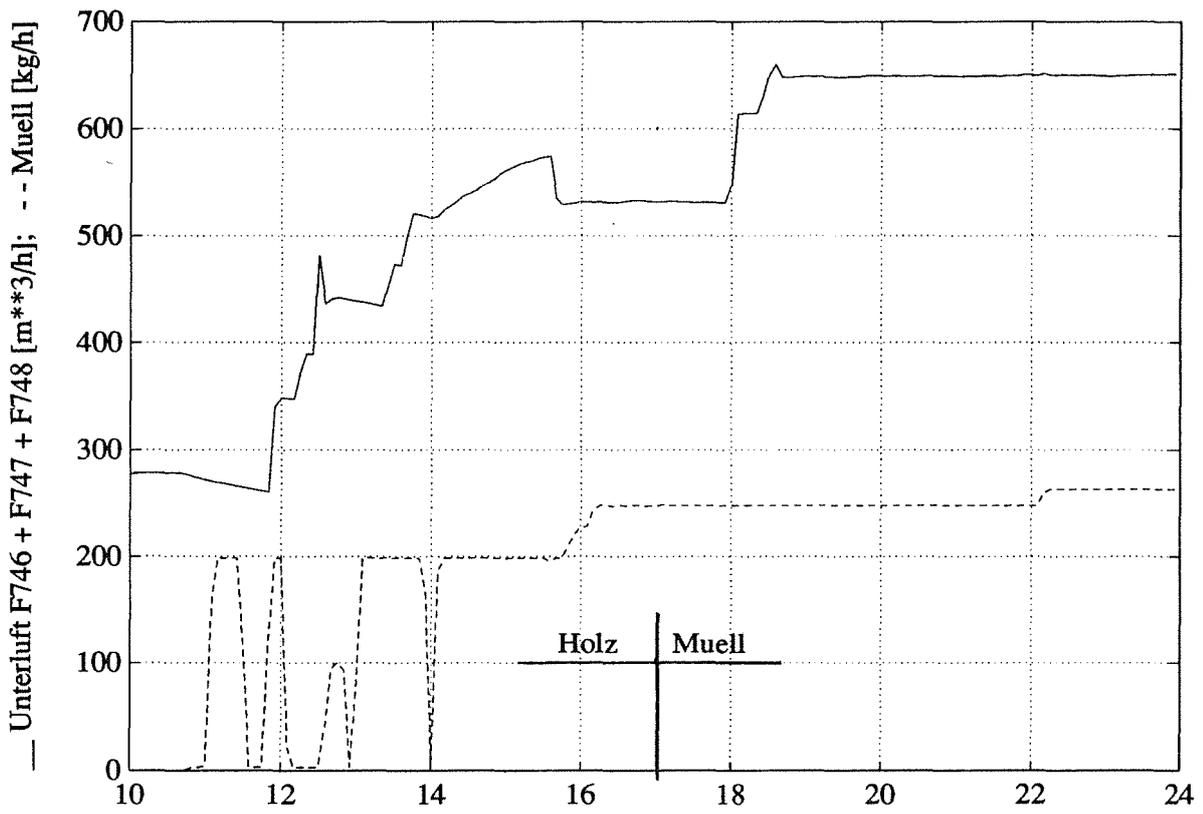


Abb. 1

Zeit(h) am 17apr

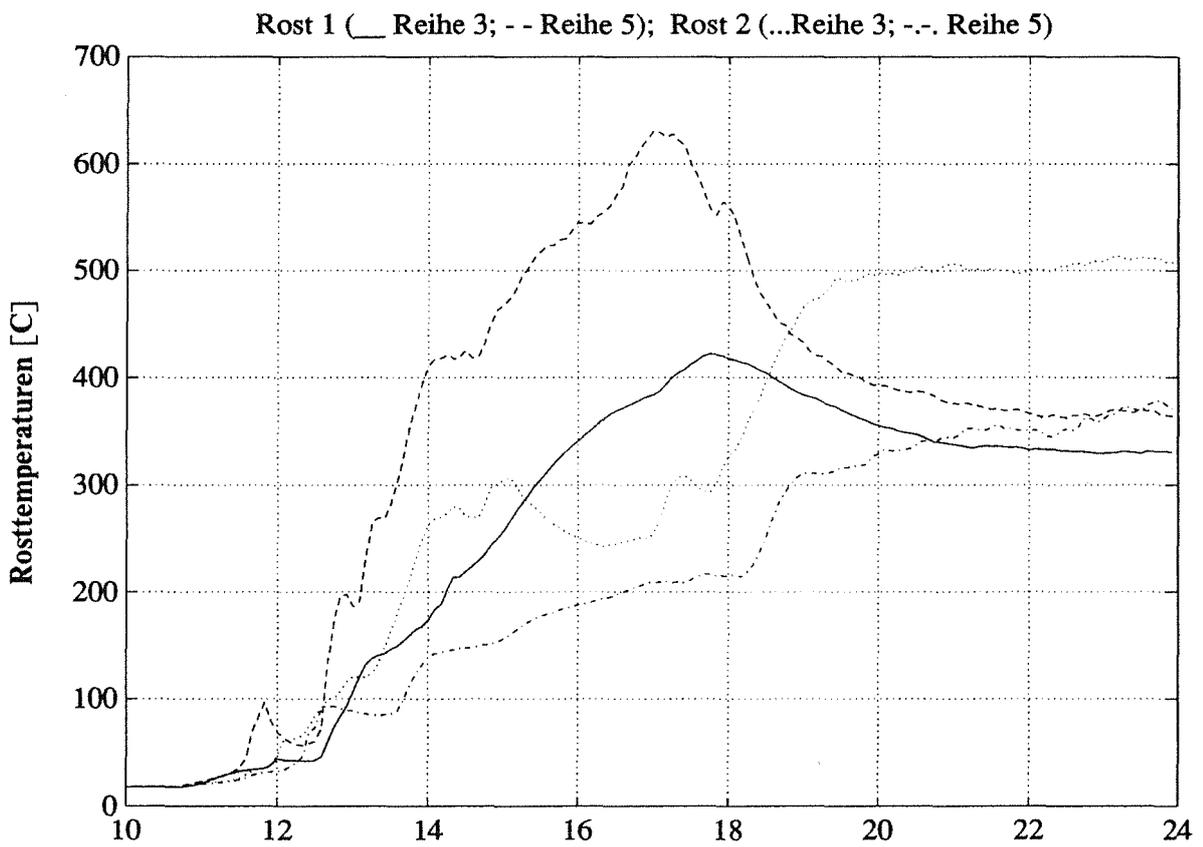


Abb. 6

Zeit(h) am 17apr

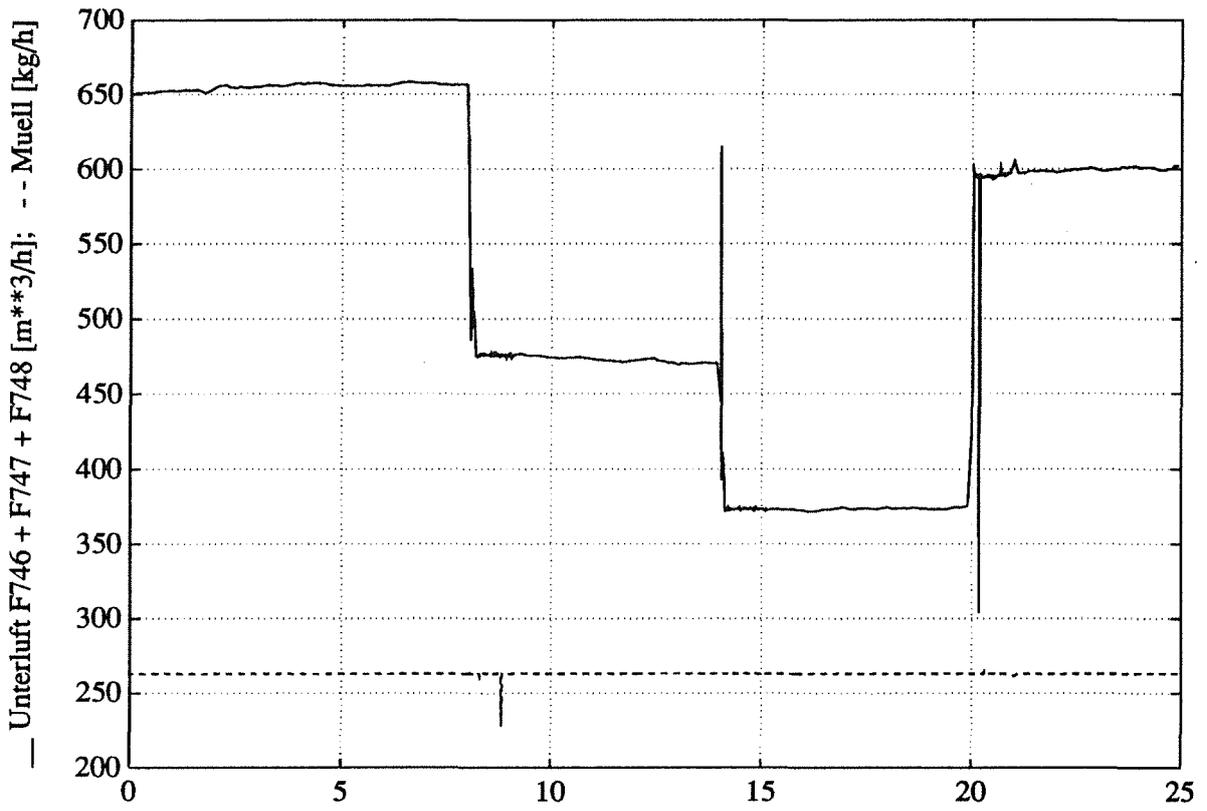


Abb. 2

Zeit(h) am 18apr

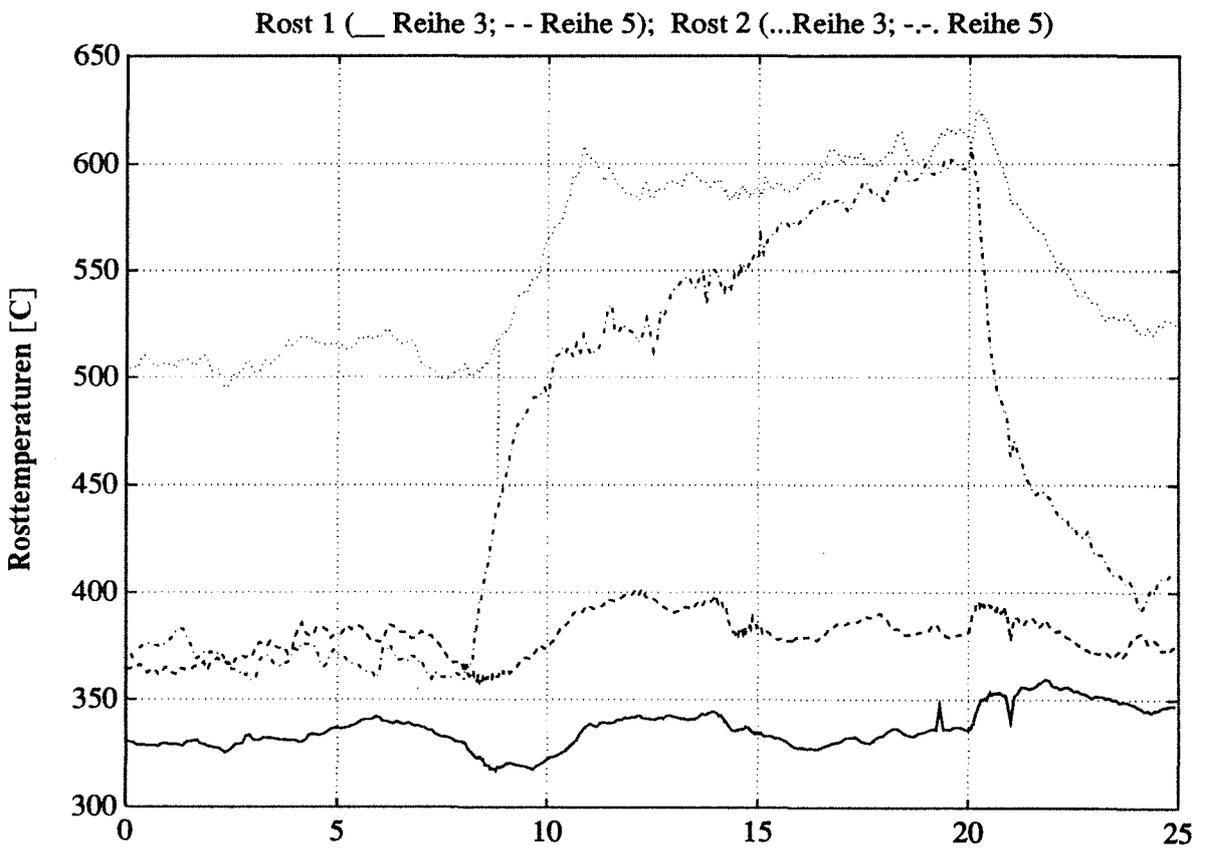


Abb. 7

Zeit(h) am 18apr

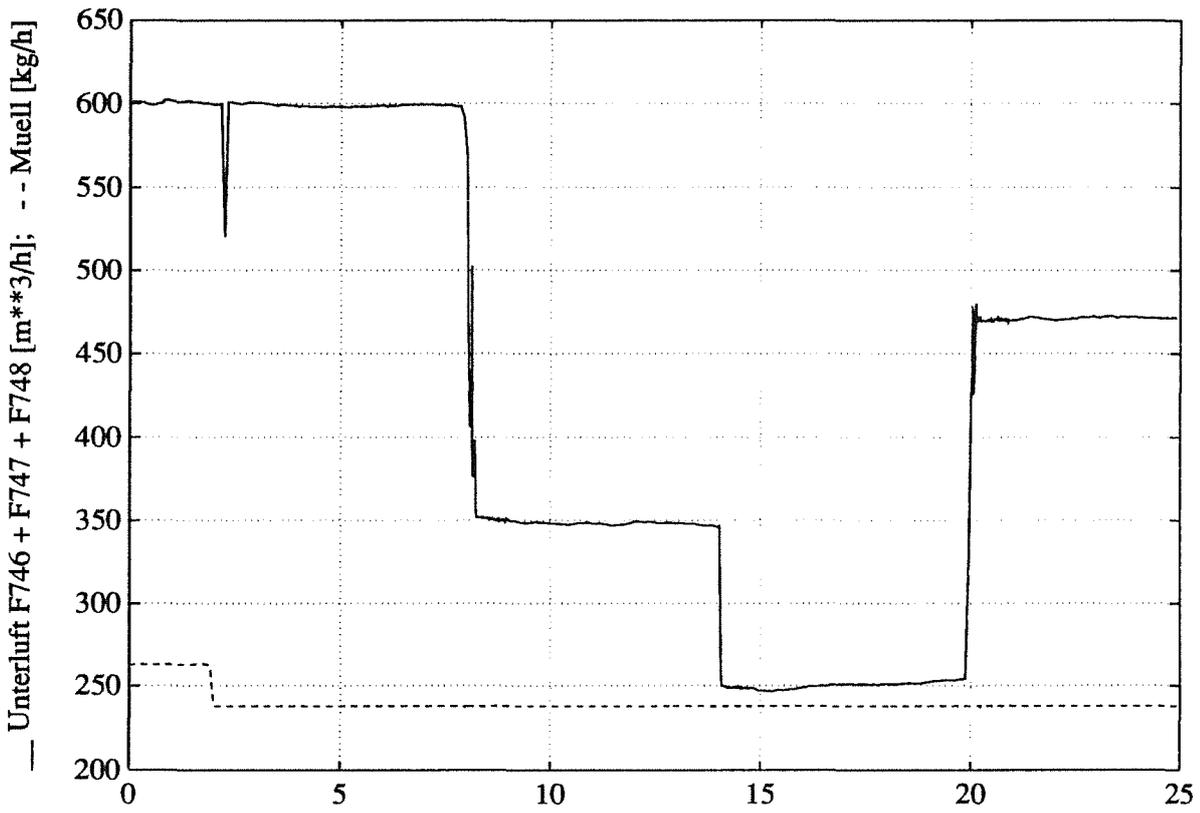


Abb. 3

Zeit(h) am 19apr

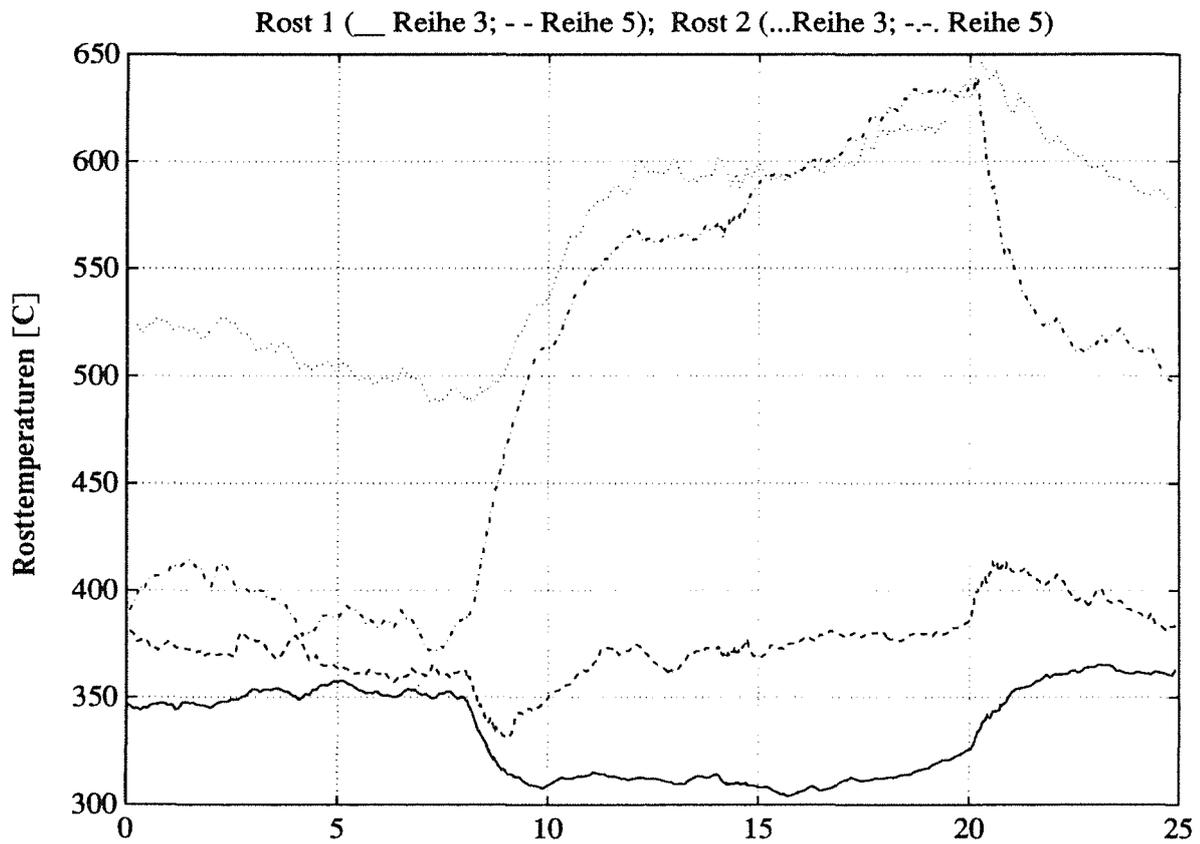


Abb. 8

Zeit(h) am 19apr

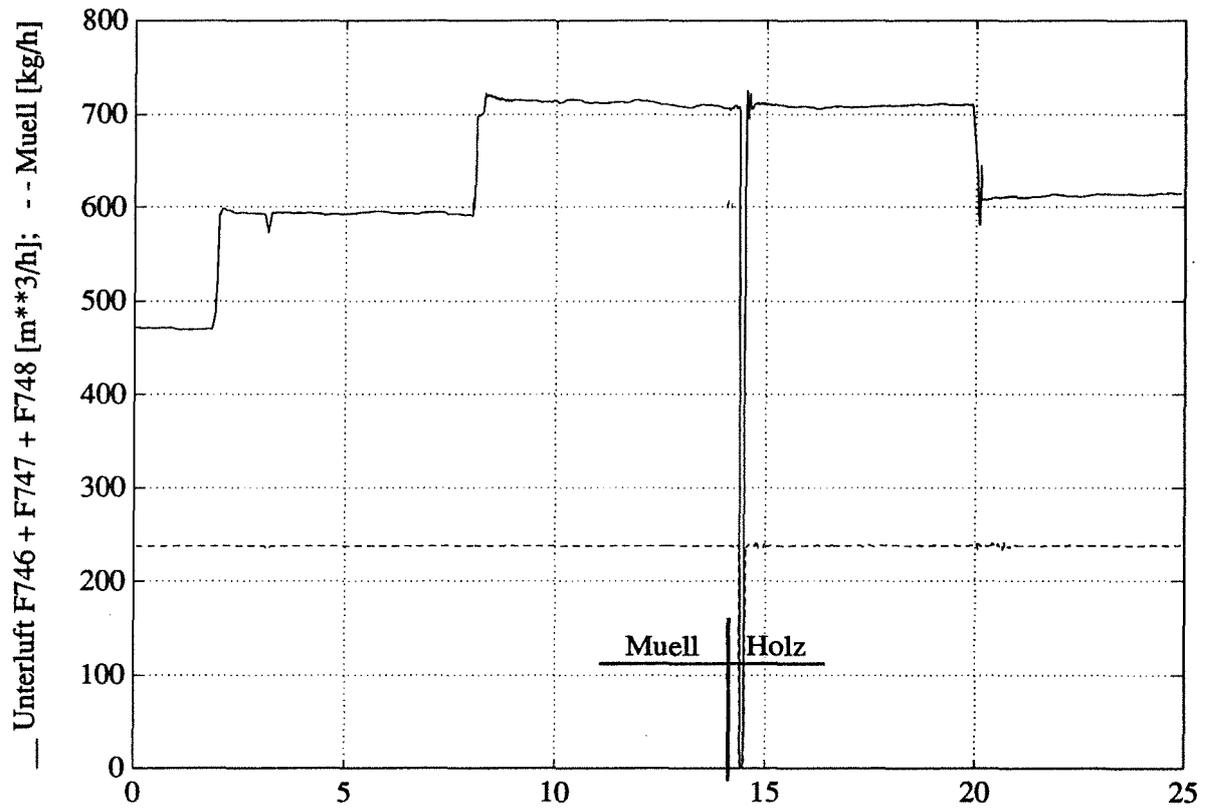


Abb. 4

Zeit(h) am 20apr

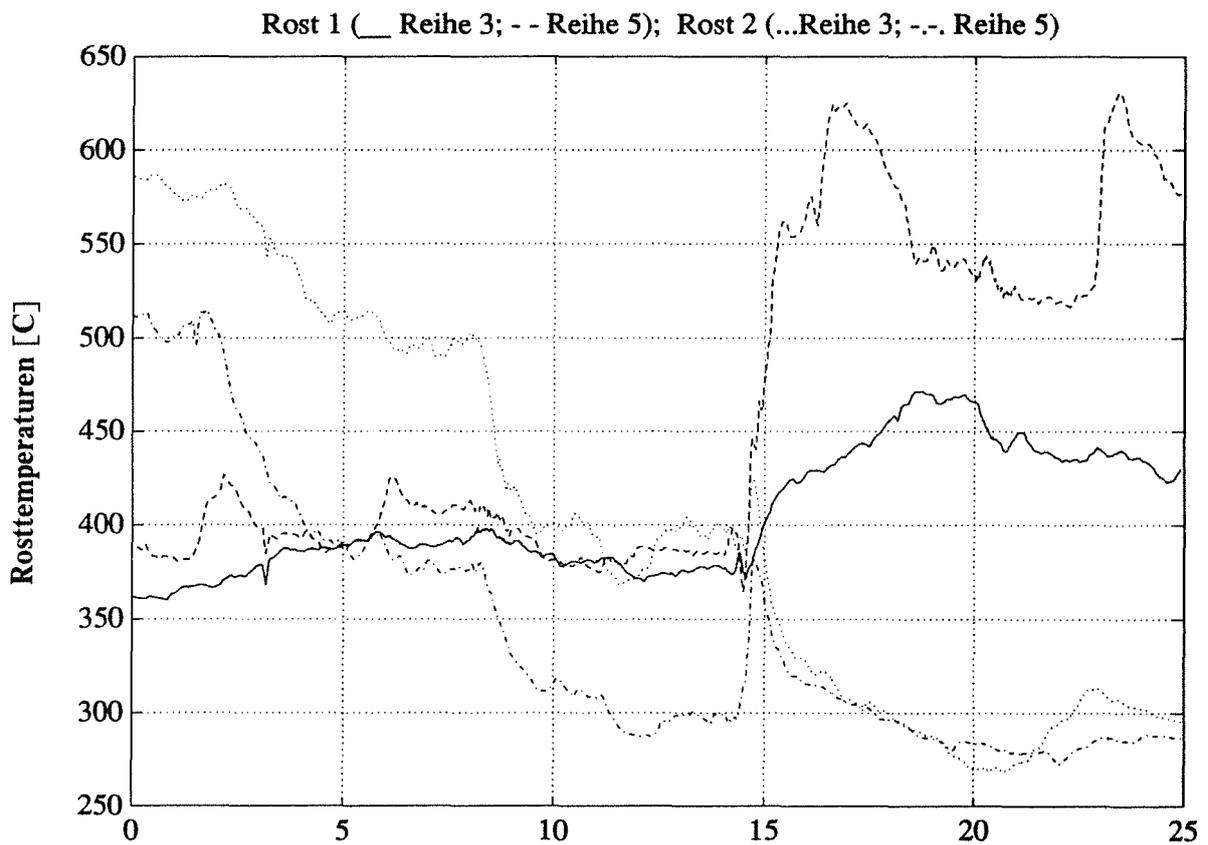


Abb. 9

Zeit(h) am 20apr

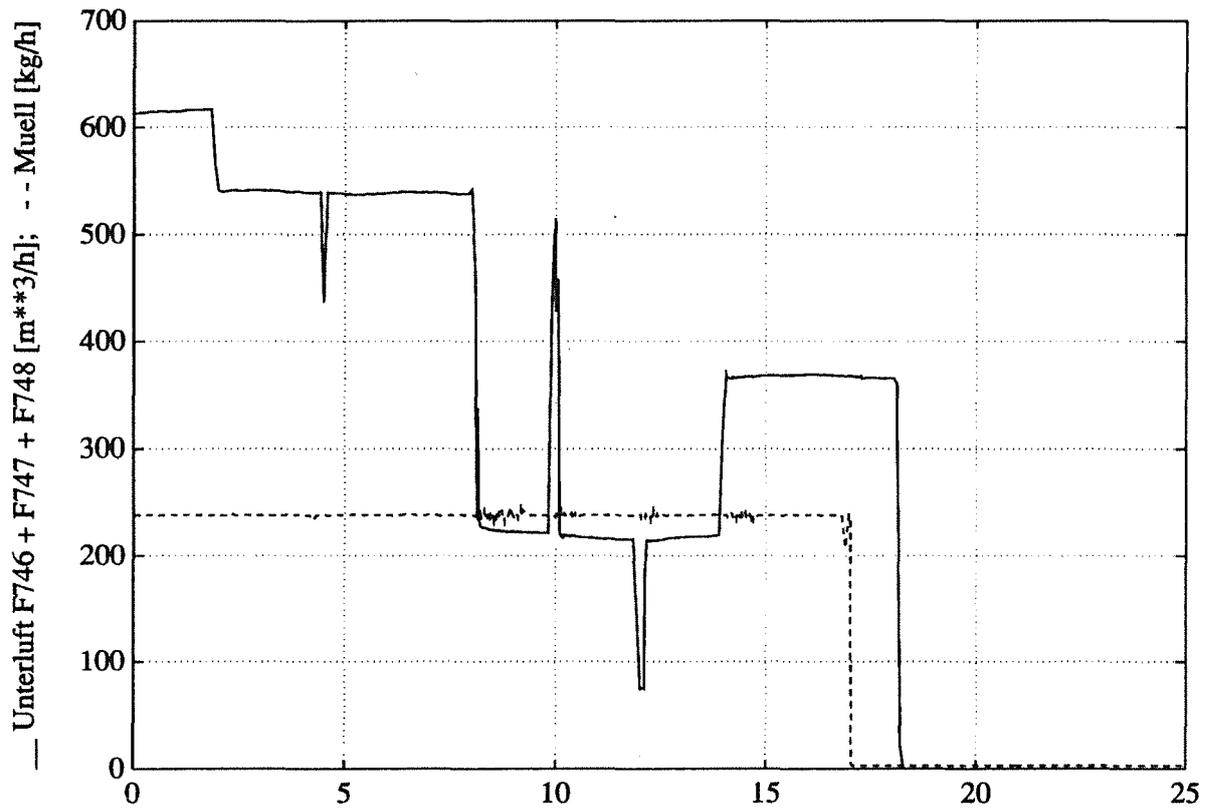


Abb. 5

Zeit(h) am 21apr

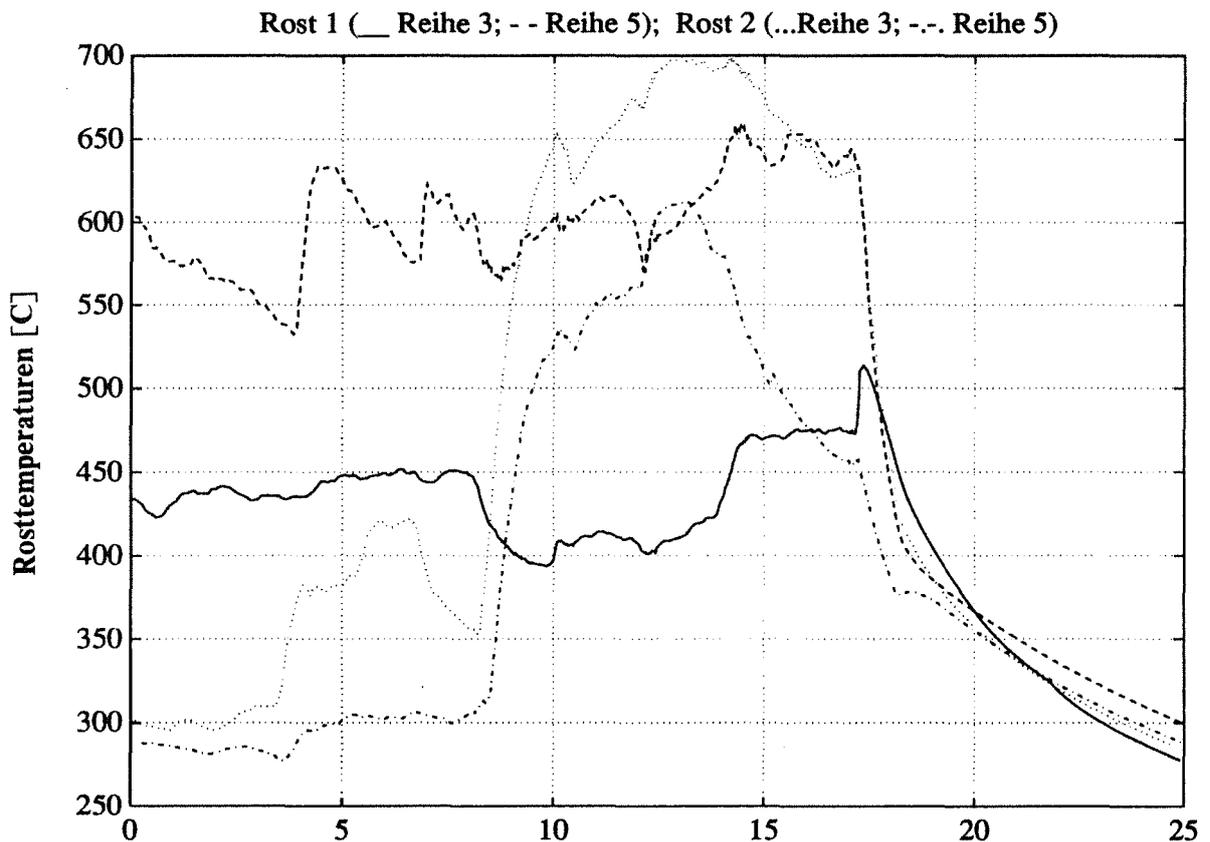
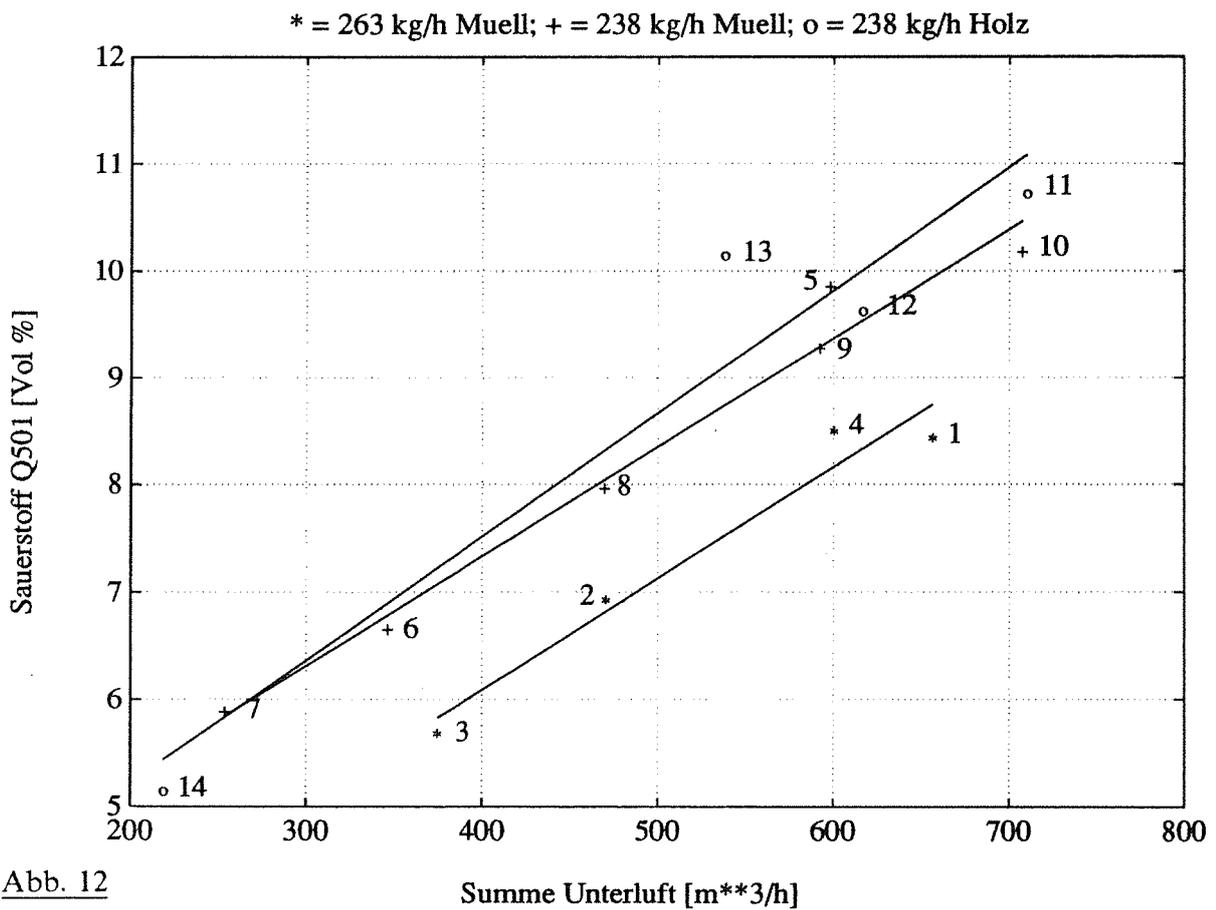
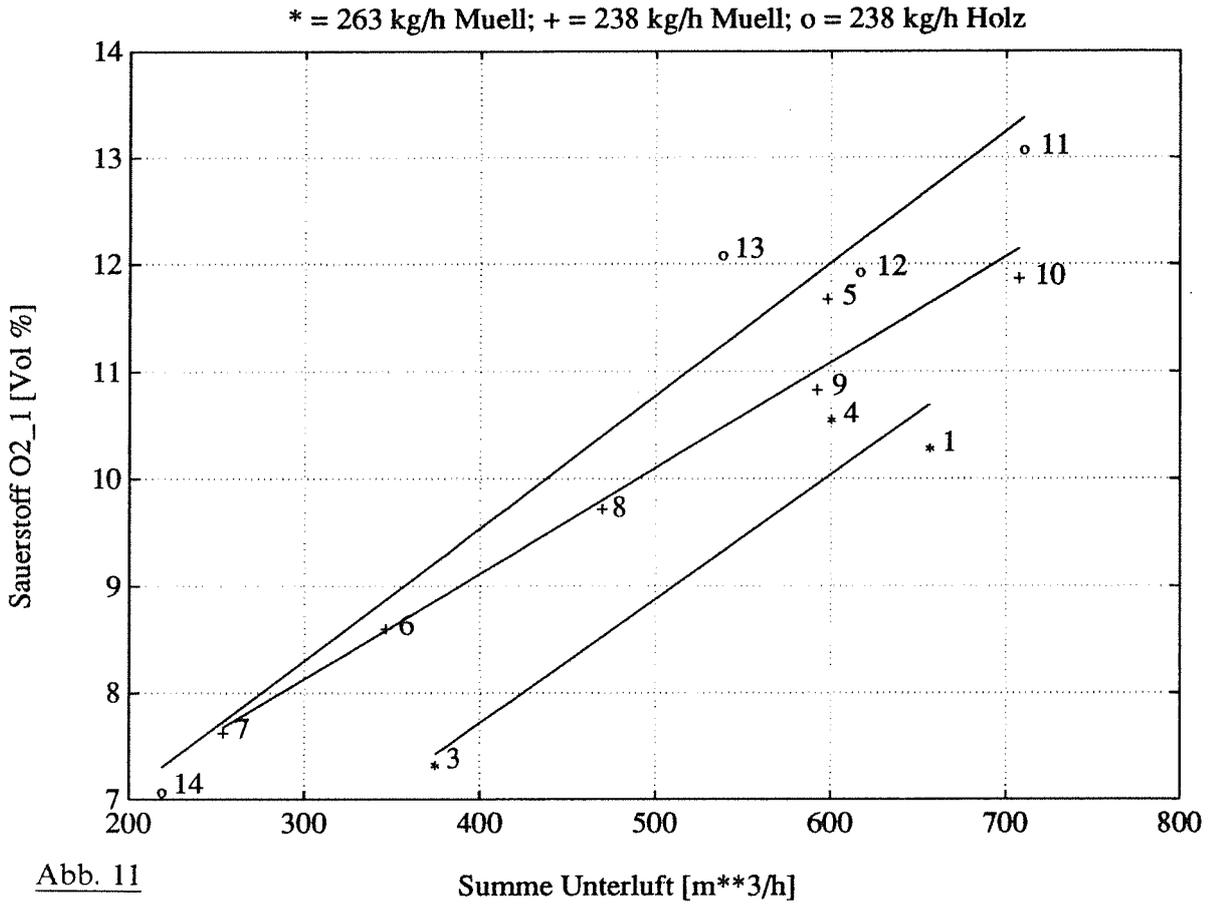
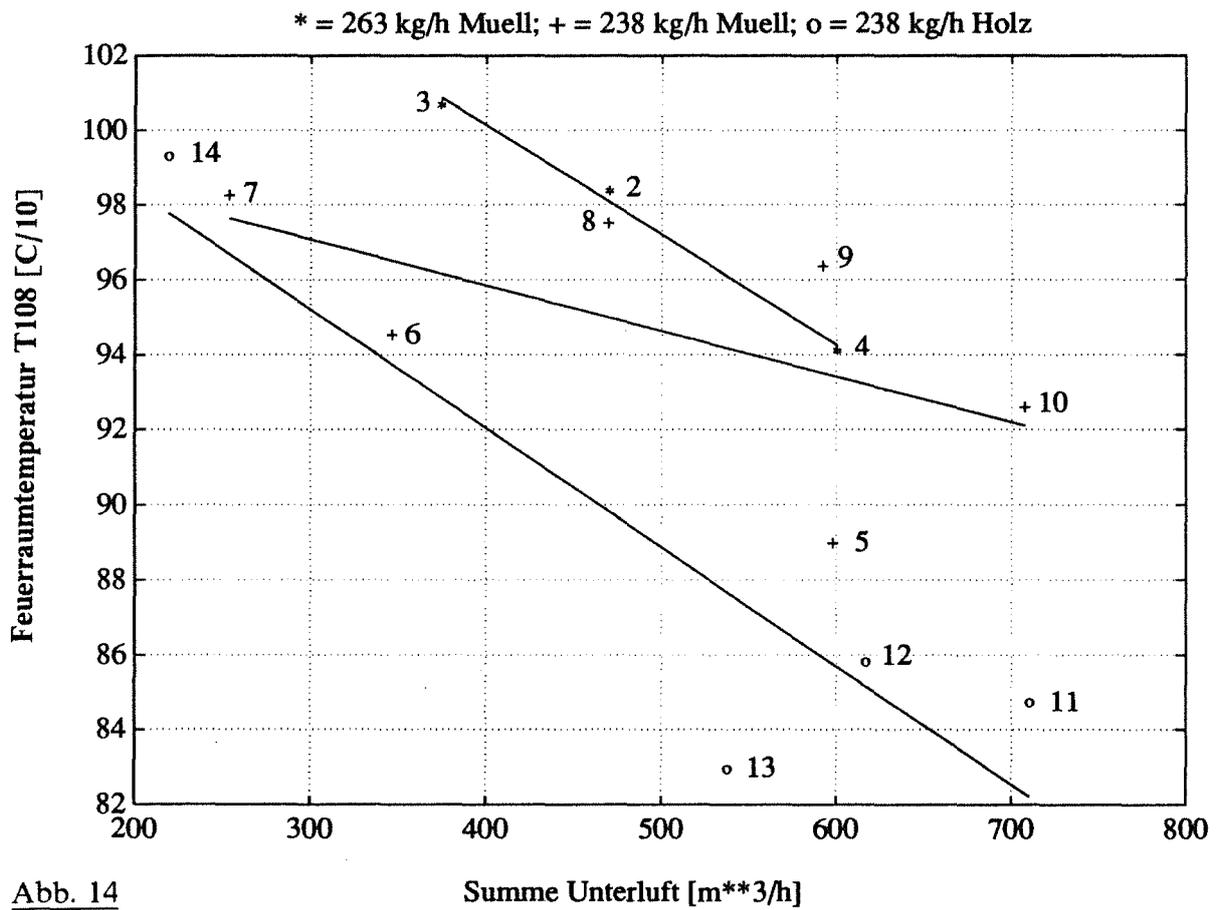
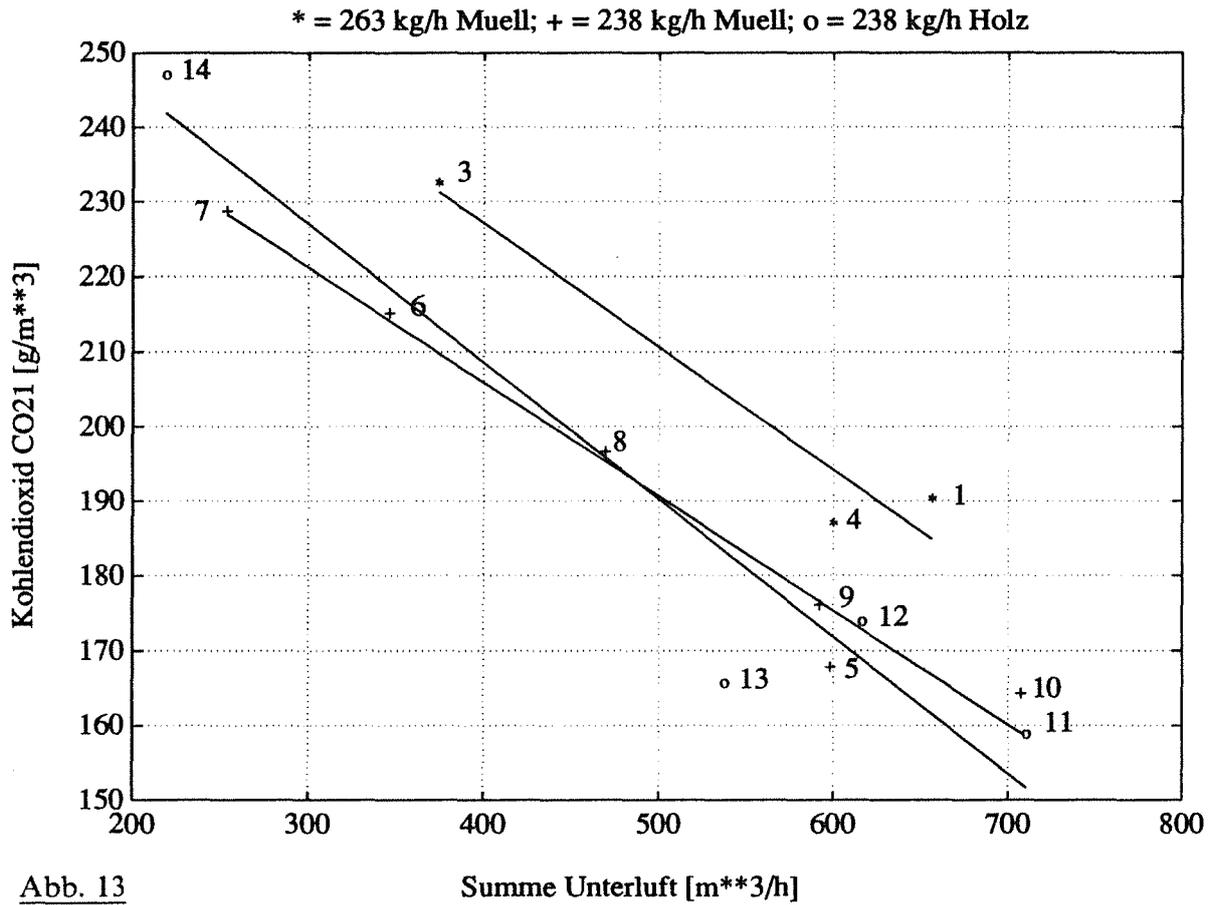


Abb. 10

Zeit(h) am 21apr





### Impulsartige Änderung der Unterluft F747

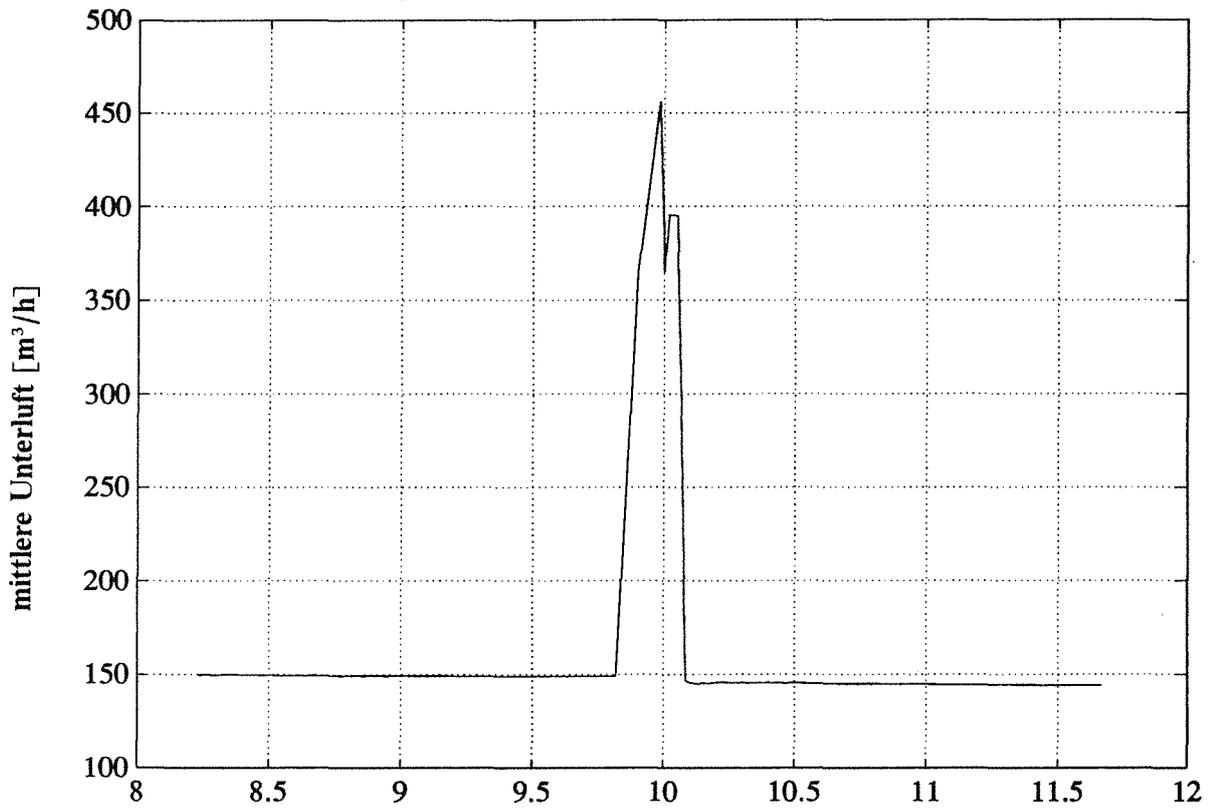


Abb. 15

Zeit(h) am 21apr

### Impulsartige Änderung der Unterluft F747

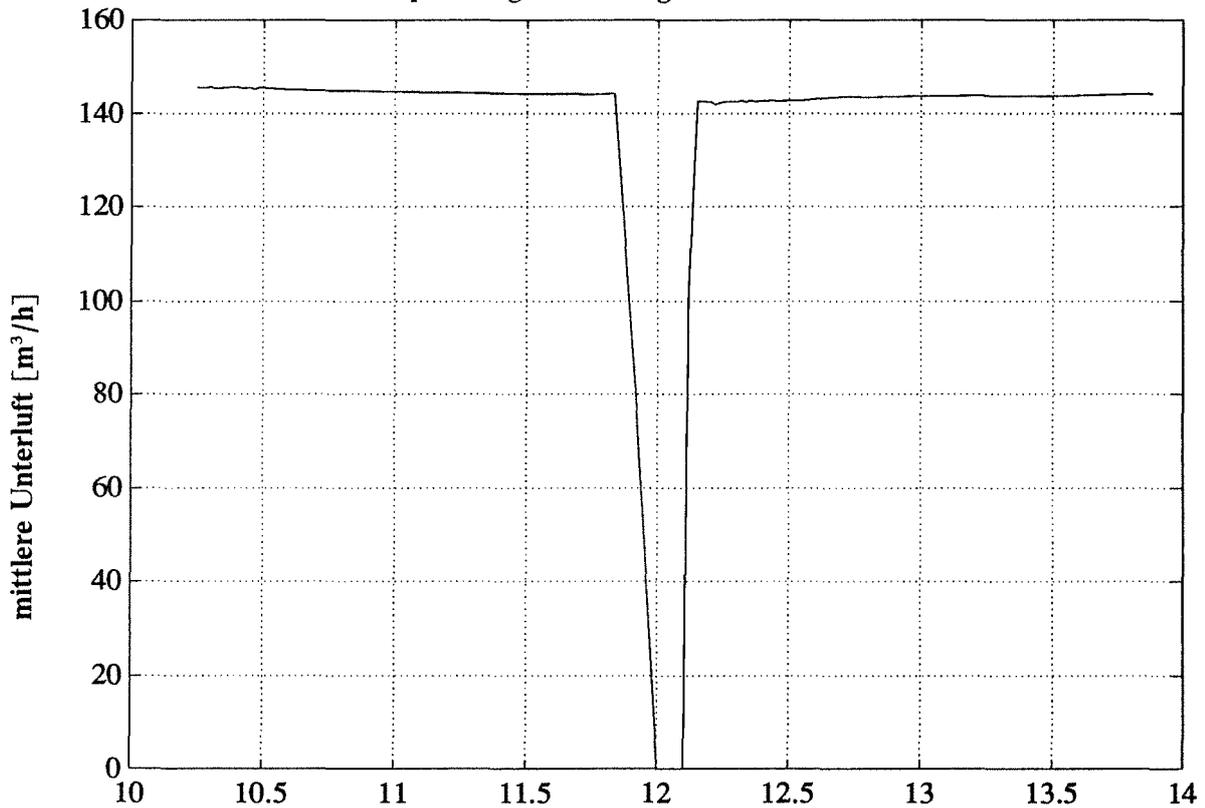


Abb. 16

Zeit(h) am 21apr

### Impulsartige Änderung der Unterluft F747

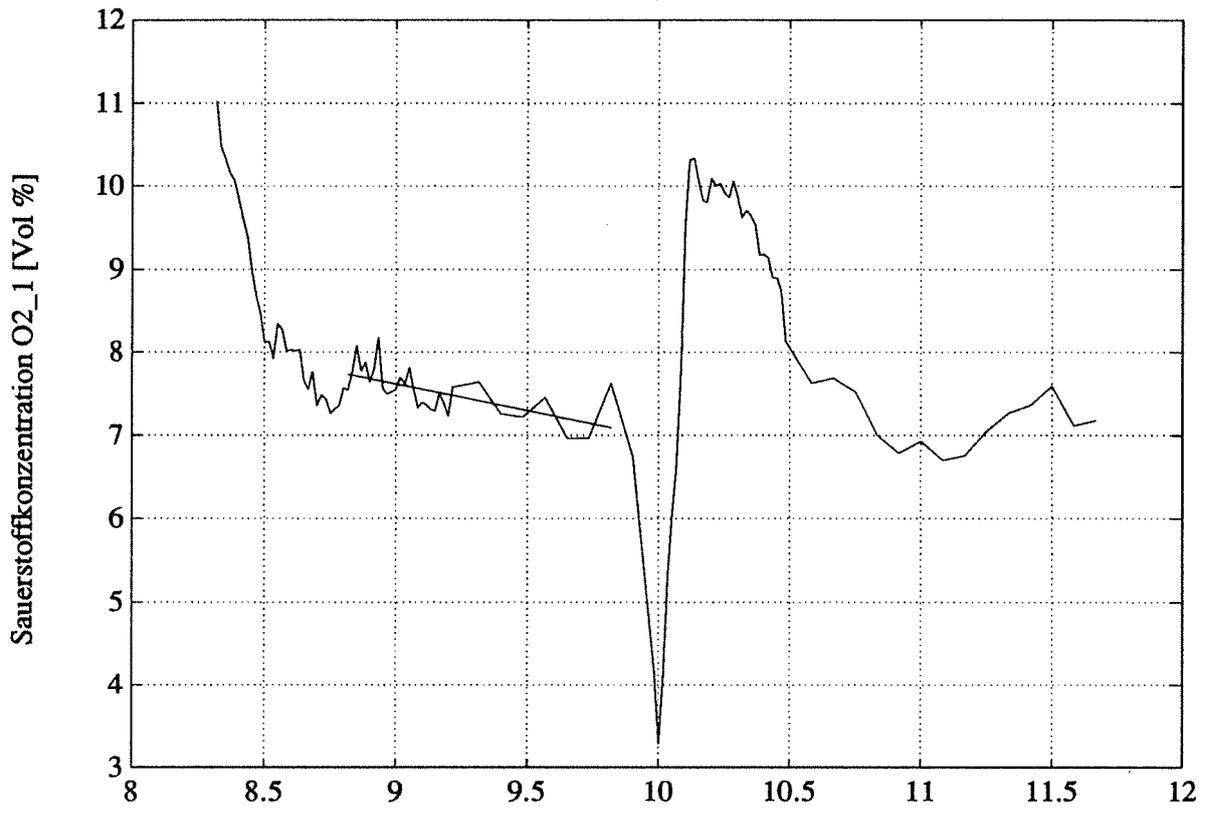


Abb. 17

Zeit(h) am 21apr

### Impulsartige Änderung der Unterluft F747

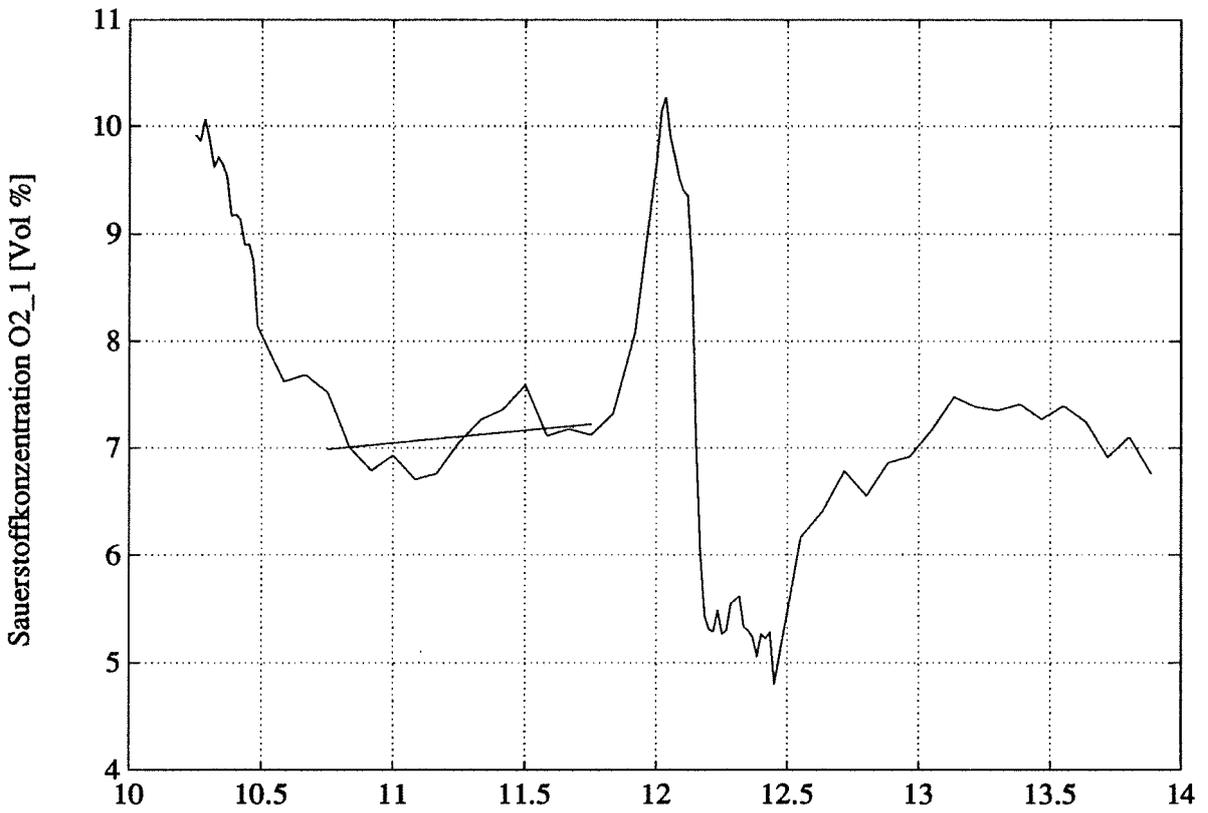


Abb. 18

Zeit(h) am 21apr

### Impulsartige Änderung der Unterluft F747

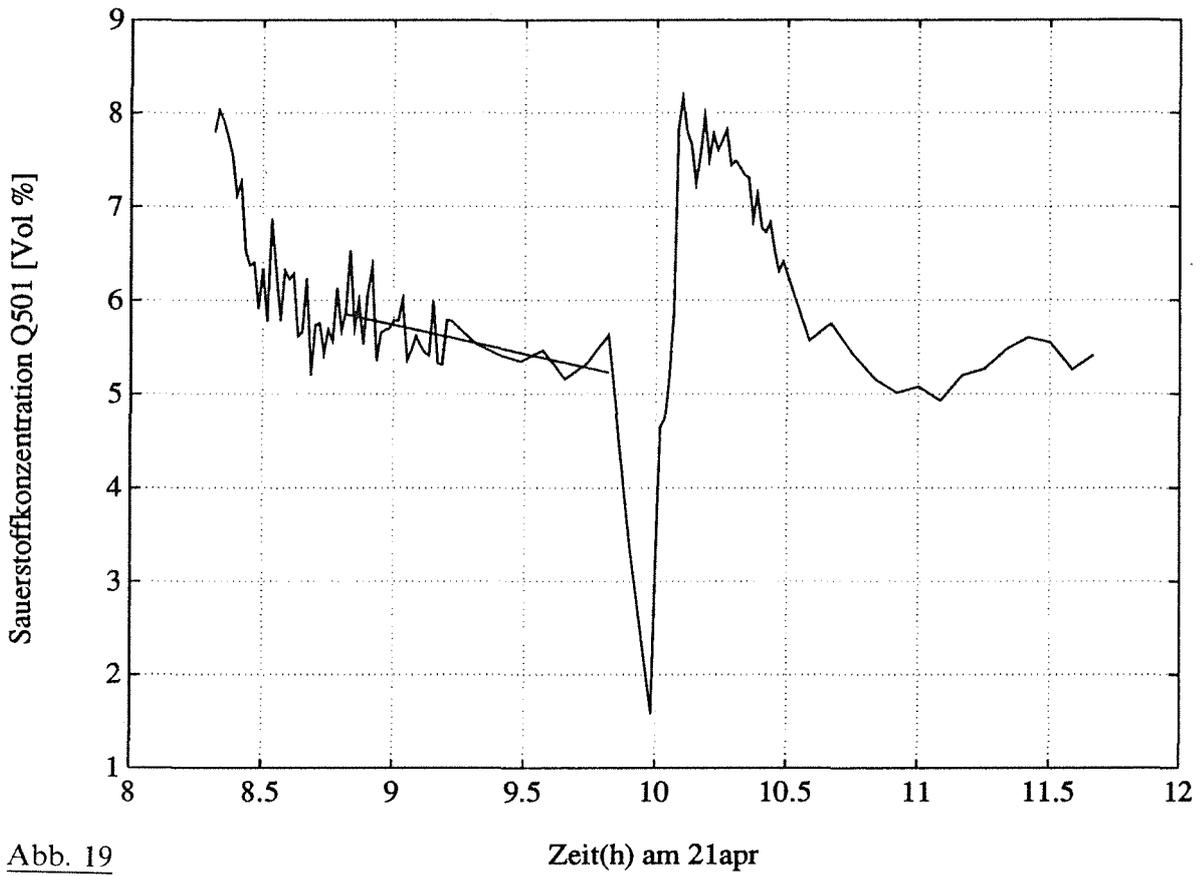


Abb. 19

### Impulsartige Änderung der Unterluft F747

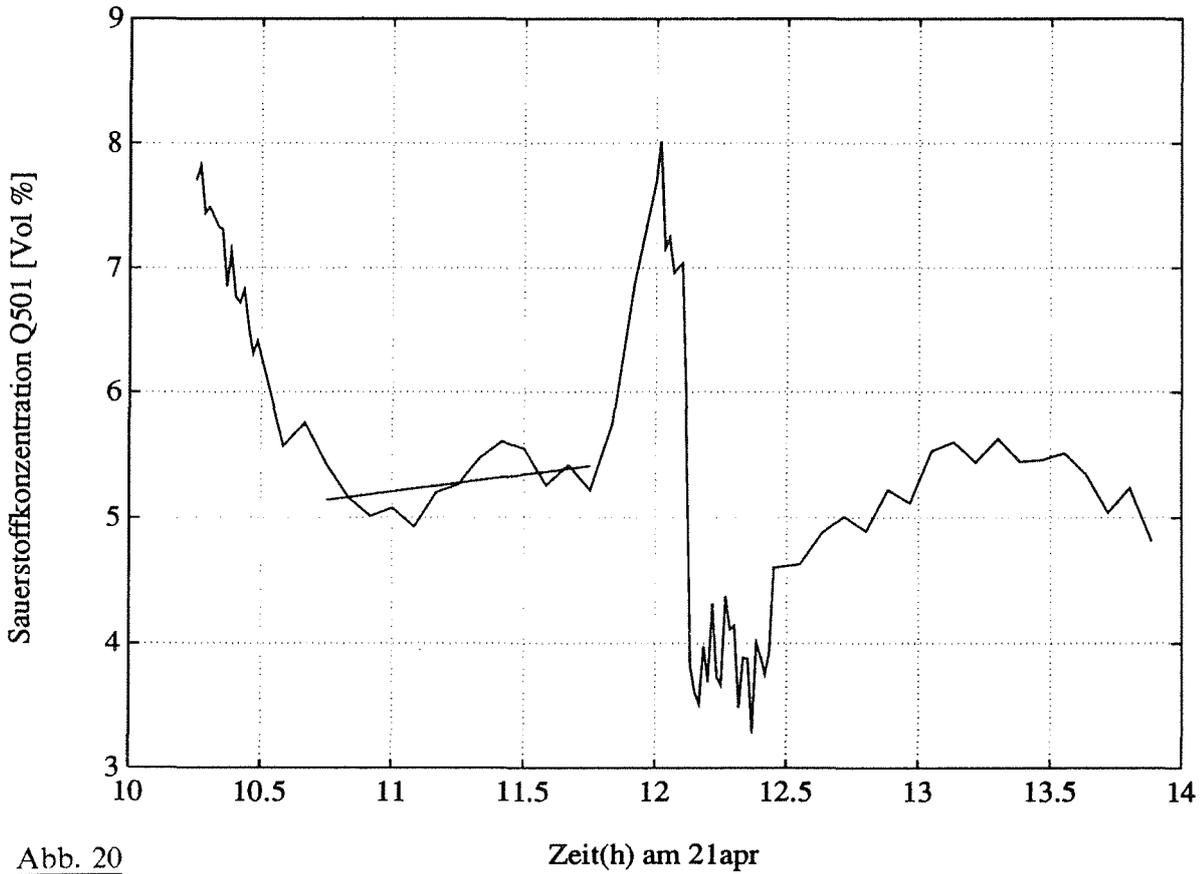


Abb. 20

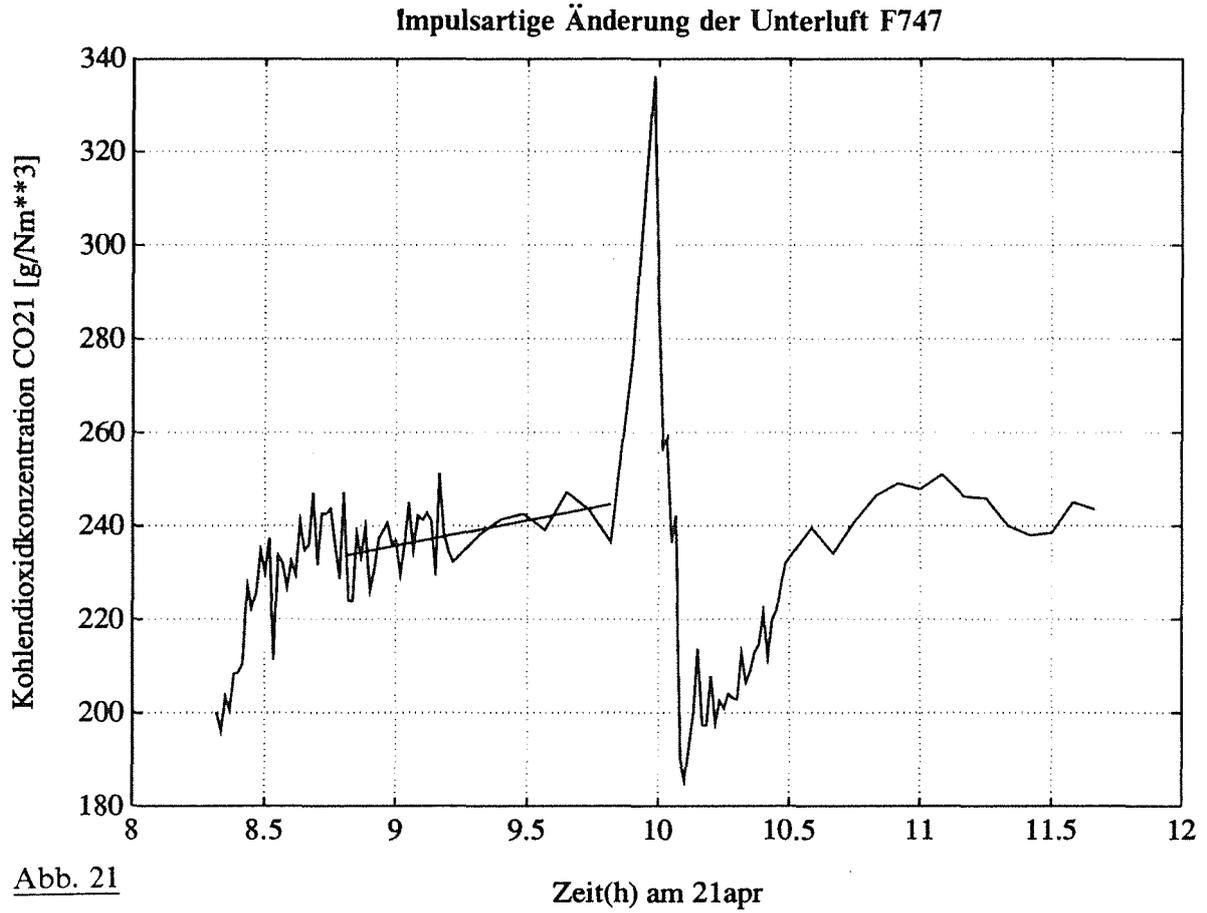


Abb. 21

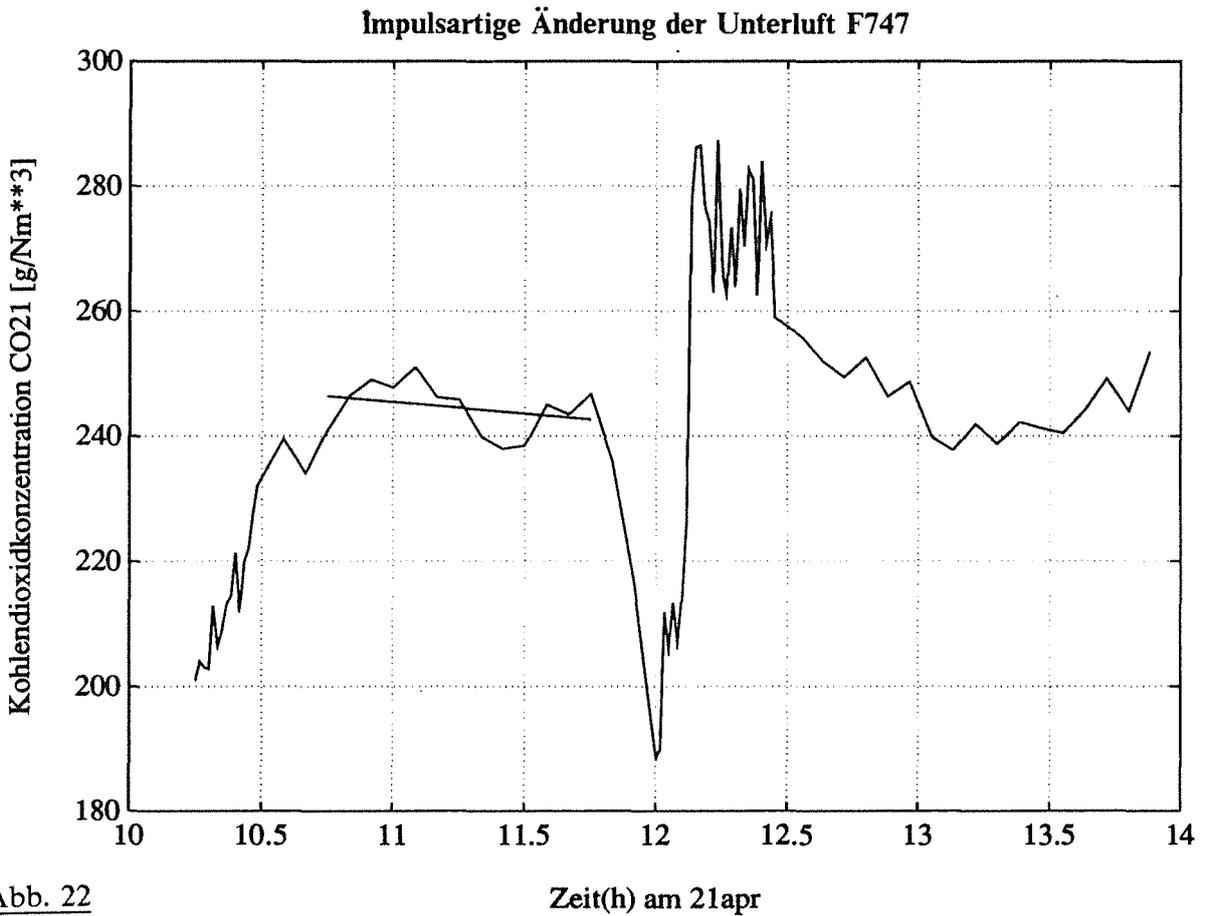
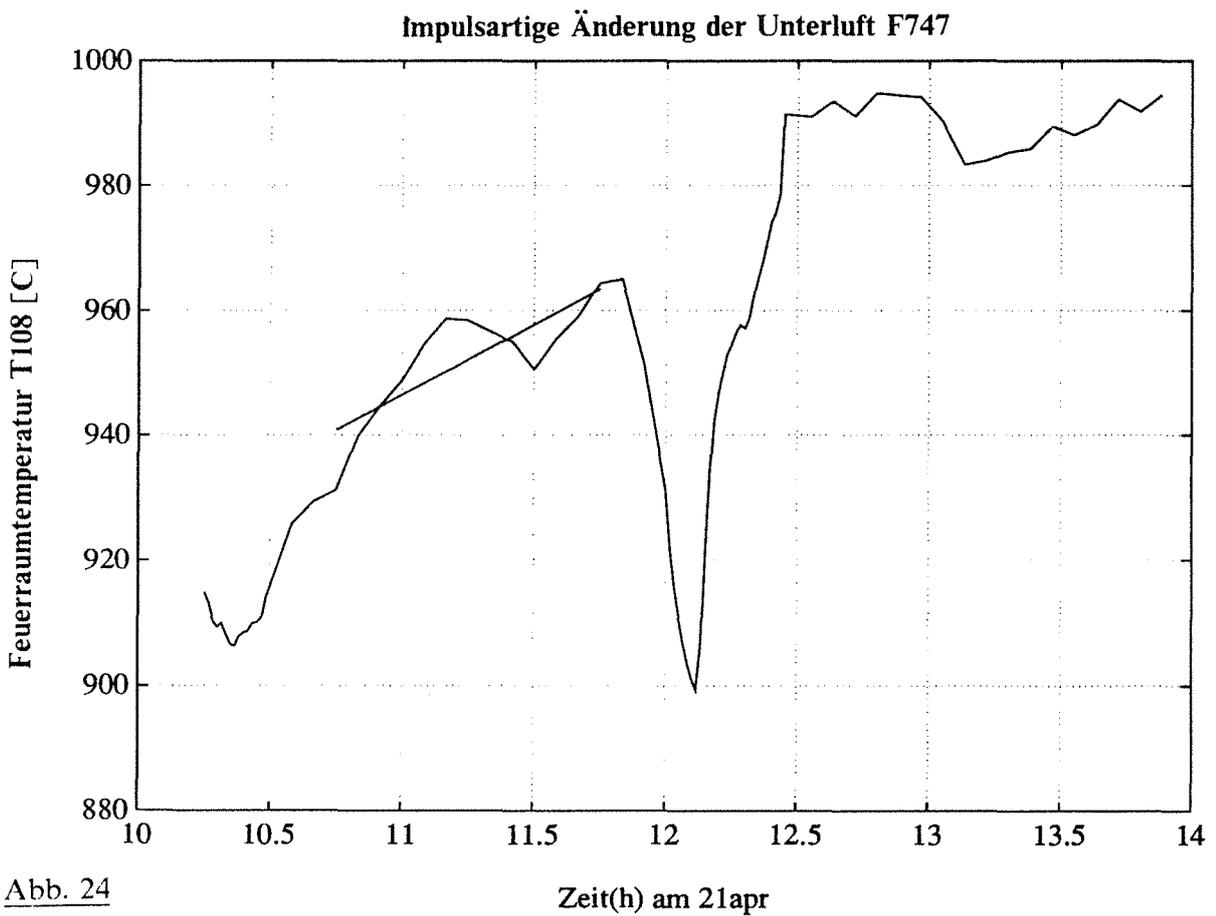
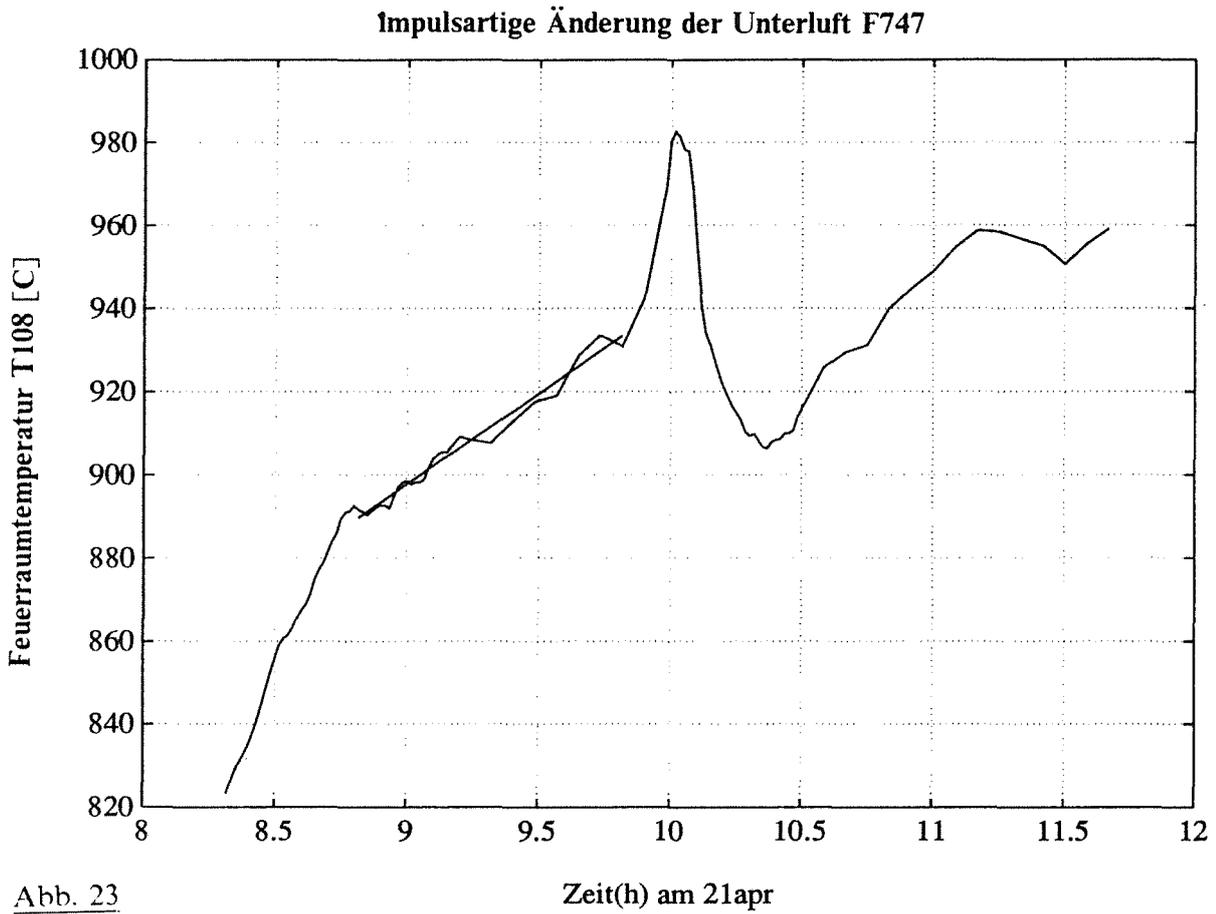
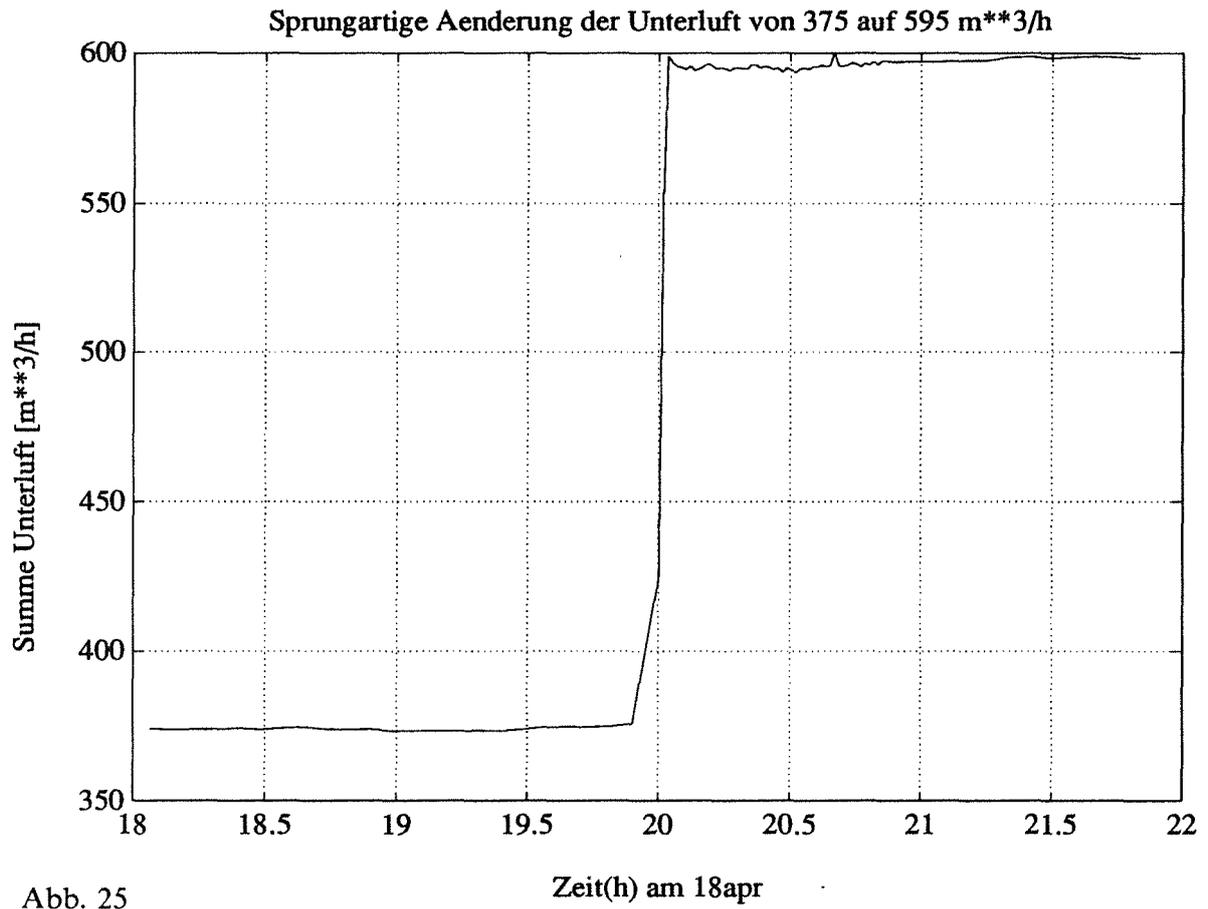


Abb. 22





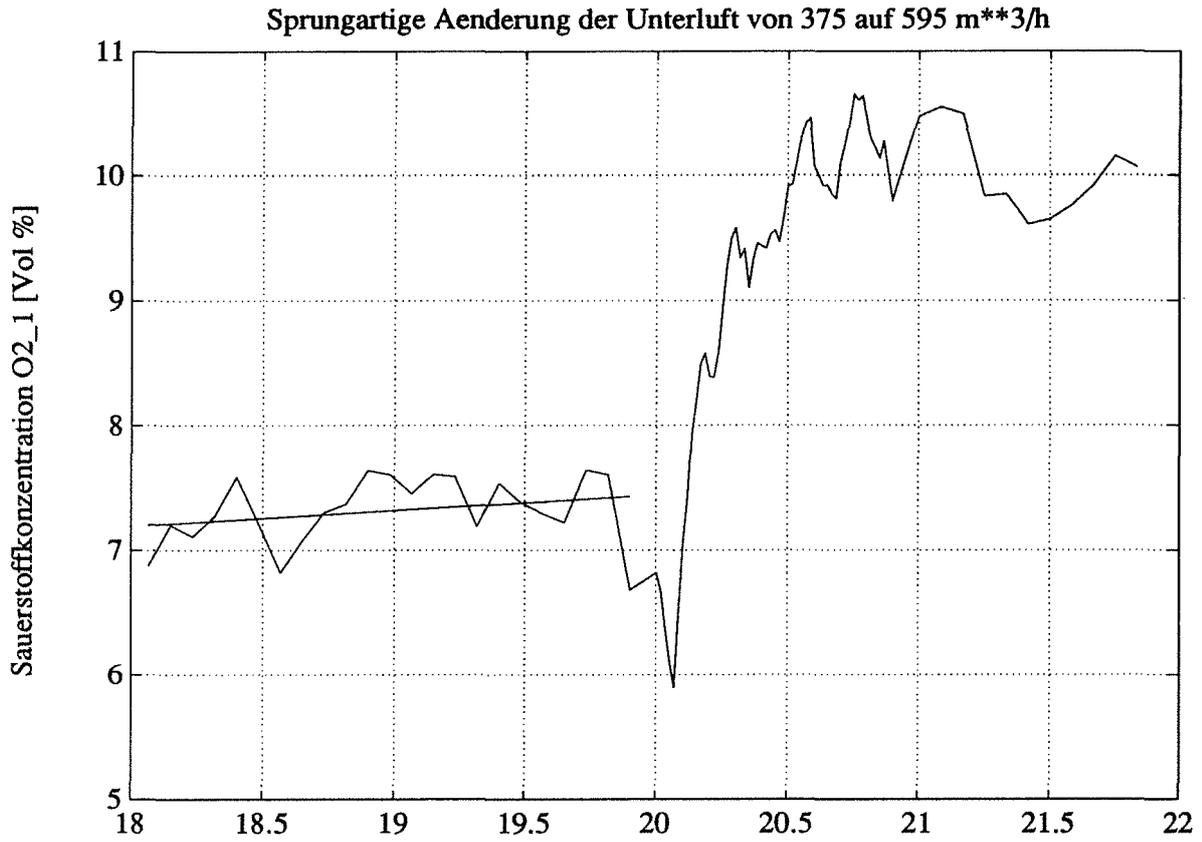


Abb. 26

Zeit(h) am 18apr

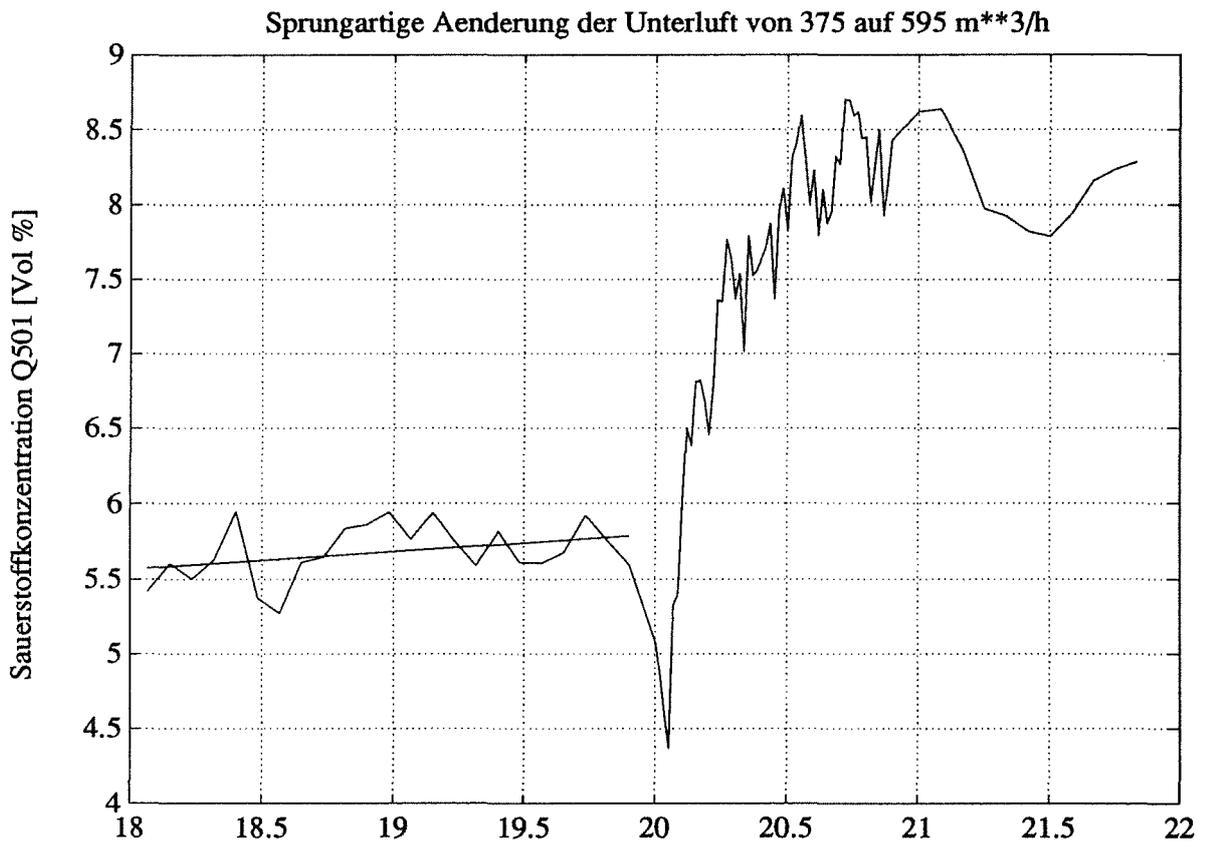


Abb. 27

Zeit(h) am 18apr

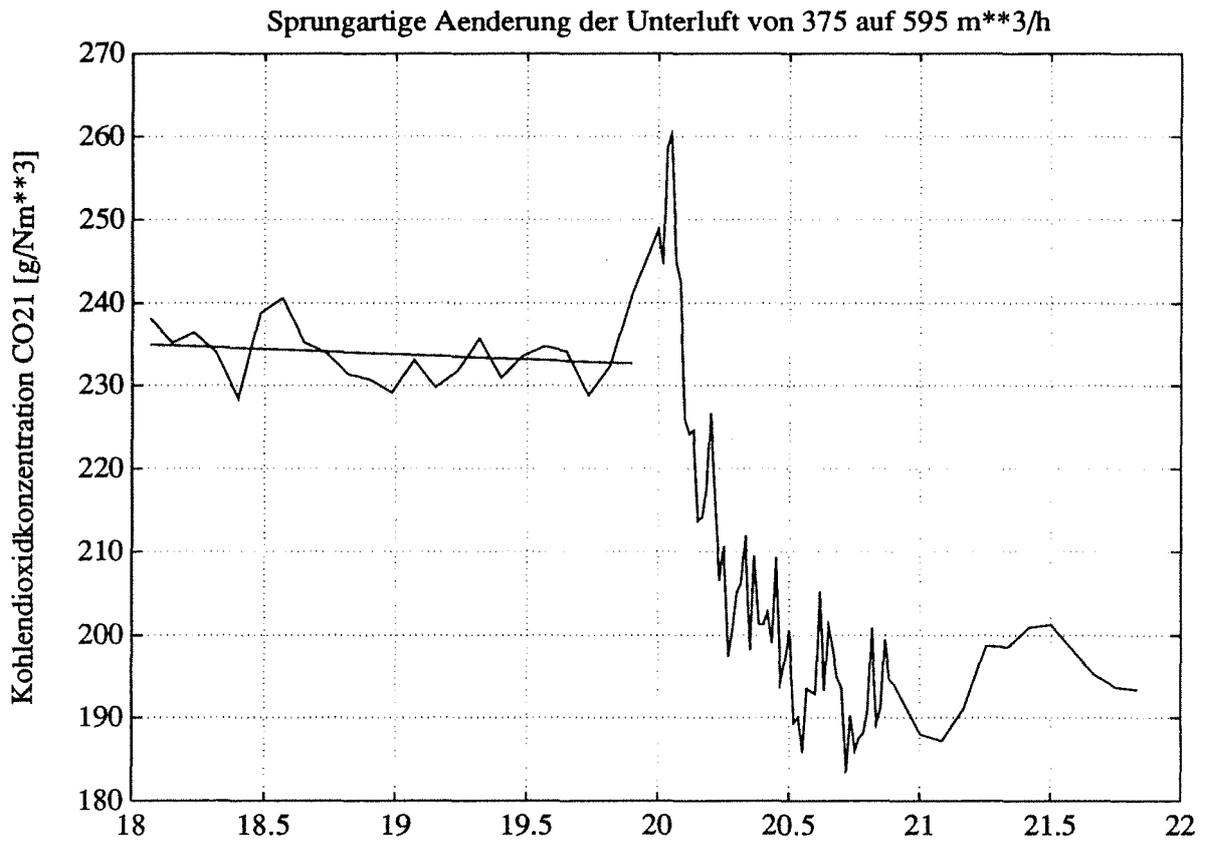


Abb. 28

Zeit(h) am 18apr

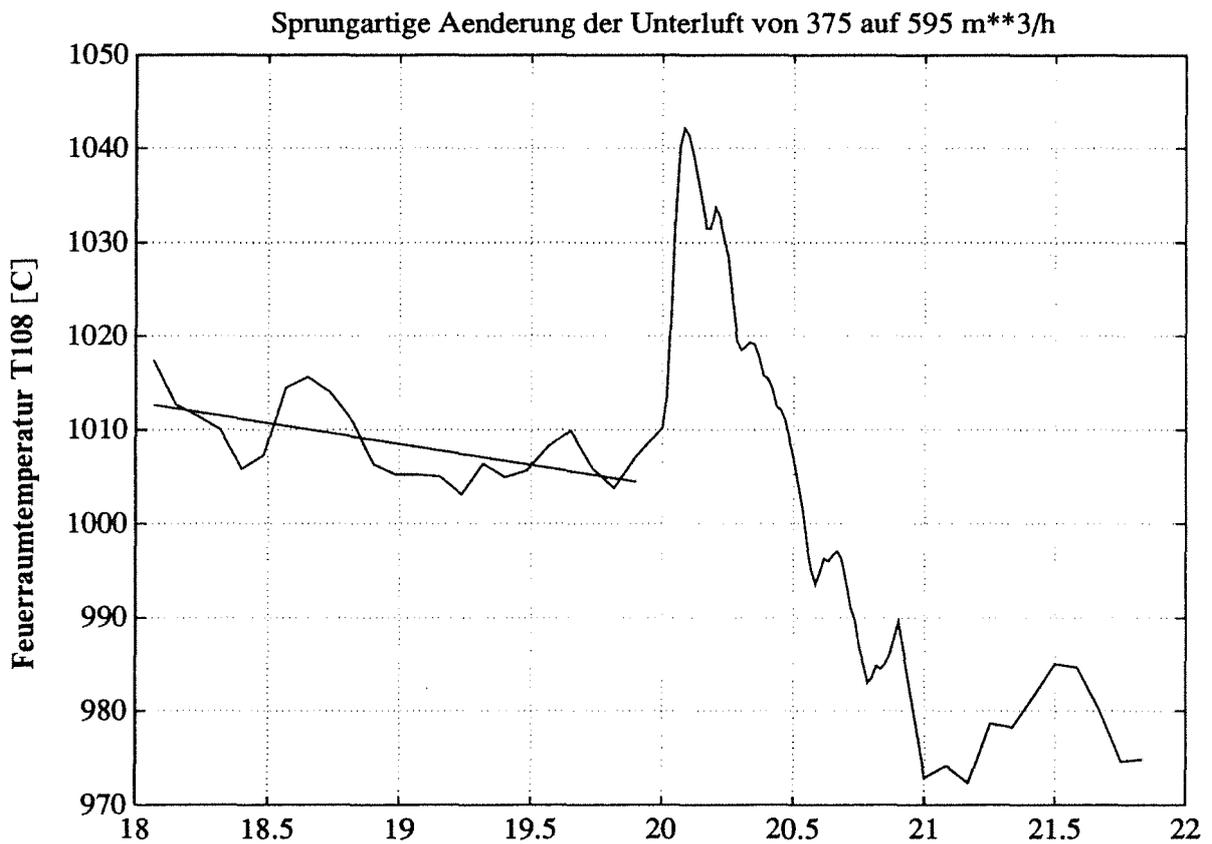


Abb. 29

Zeit(h) am 18apr

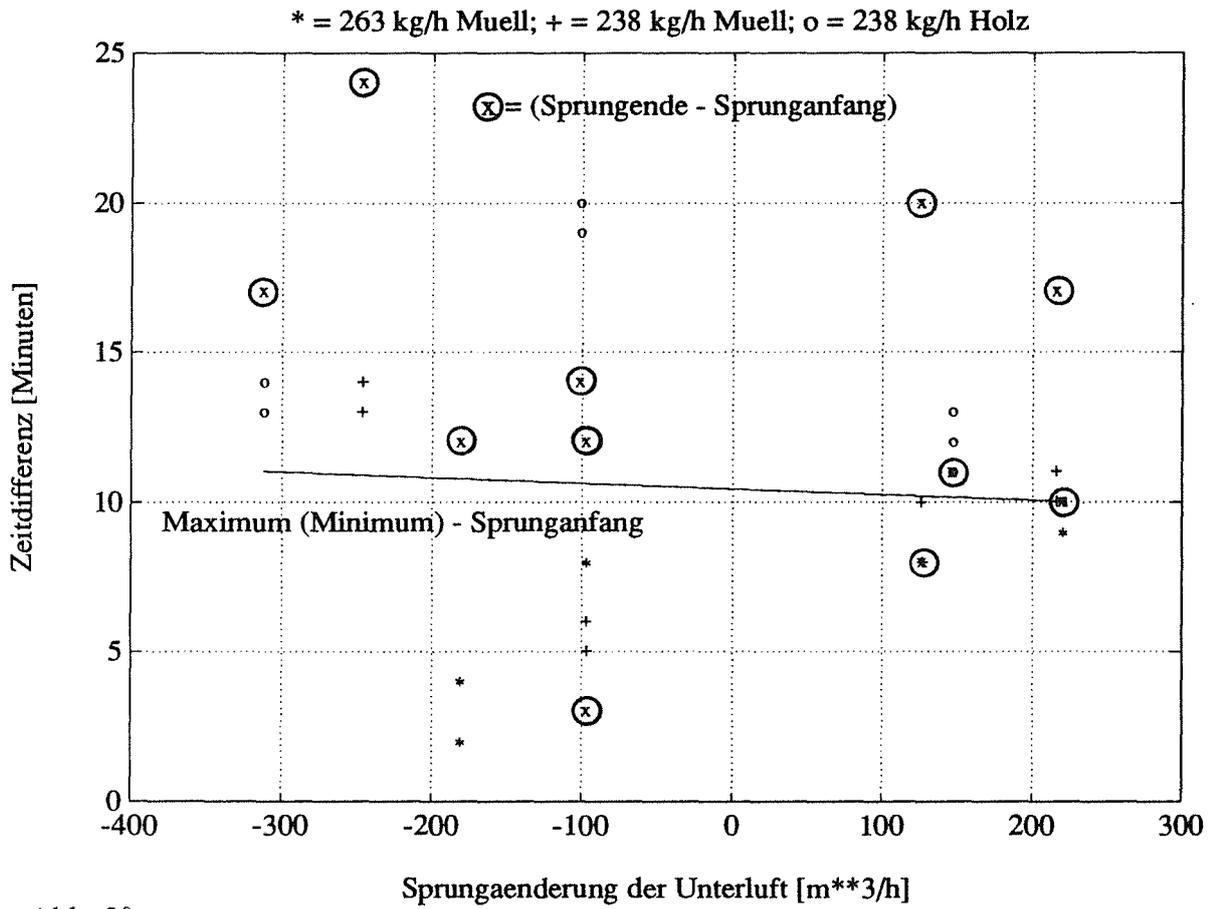
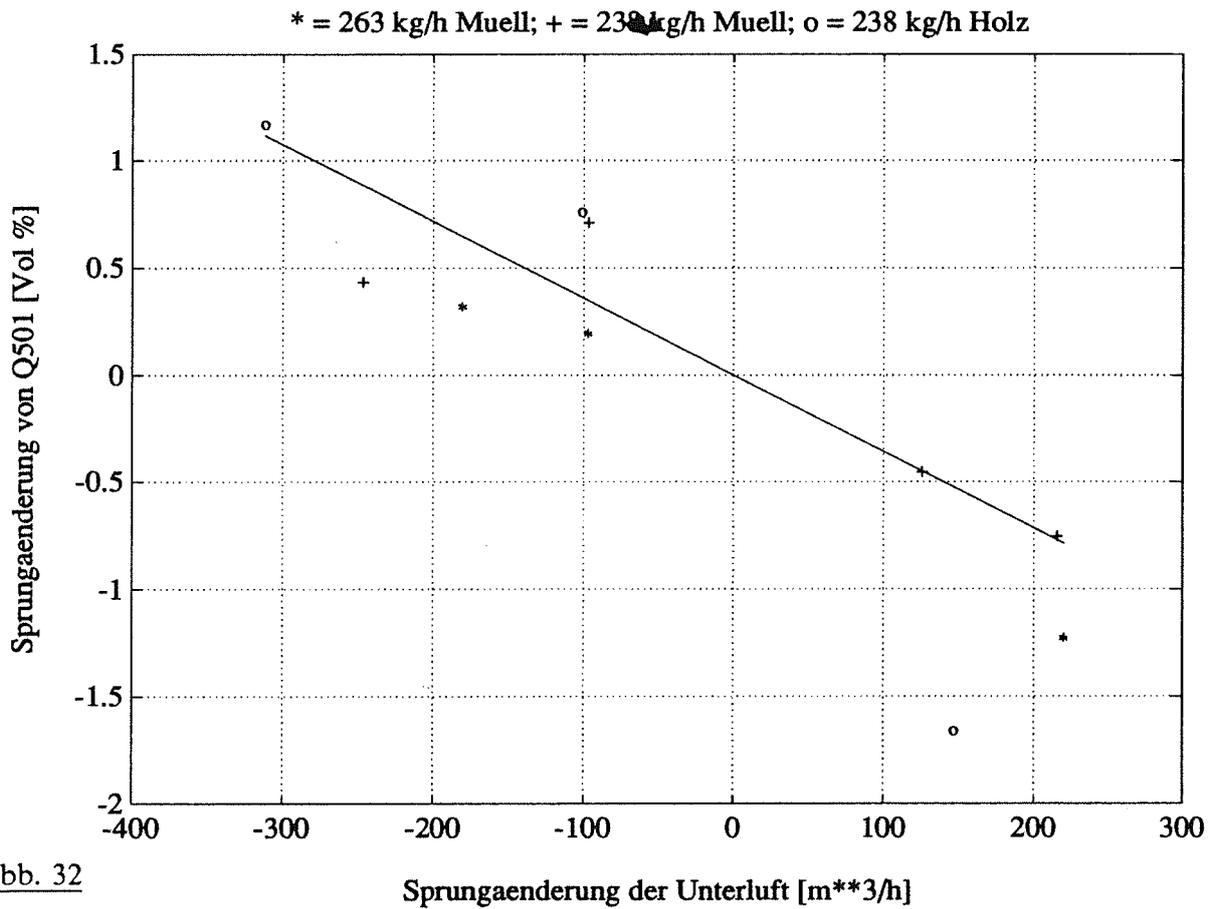
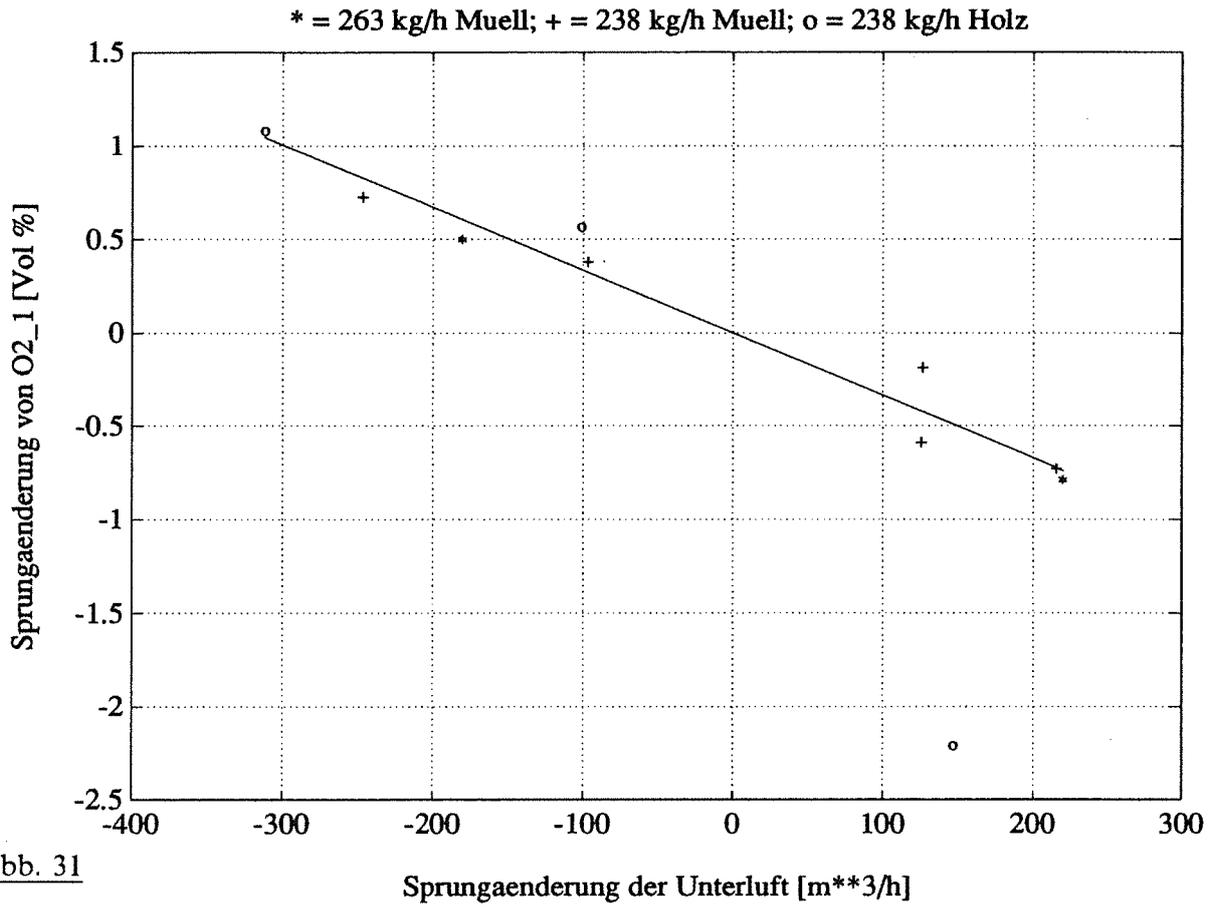


Abb. 30



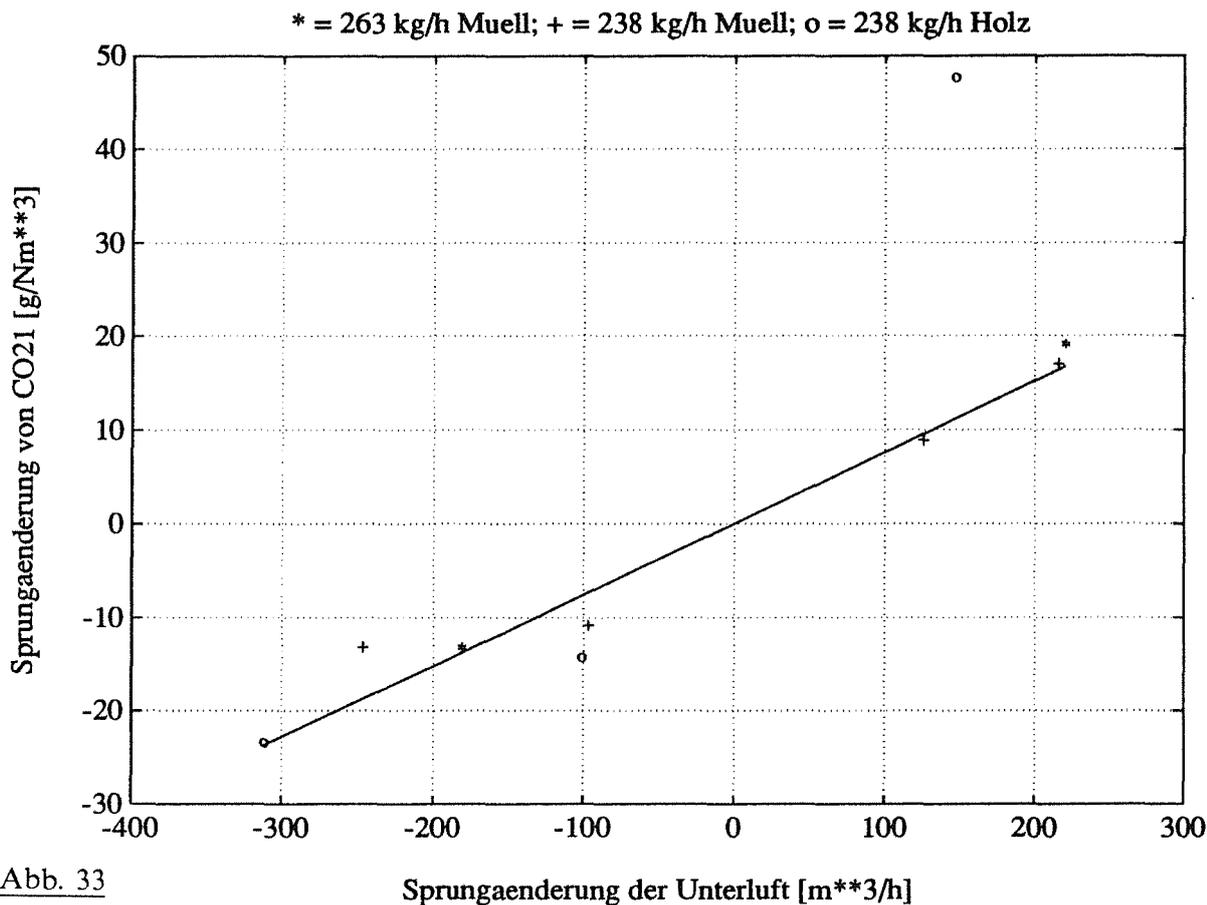


Abb. 33

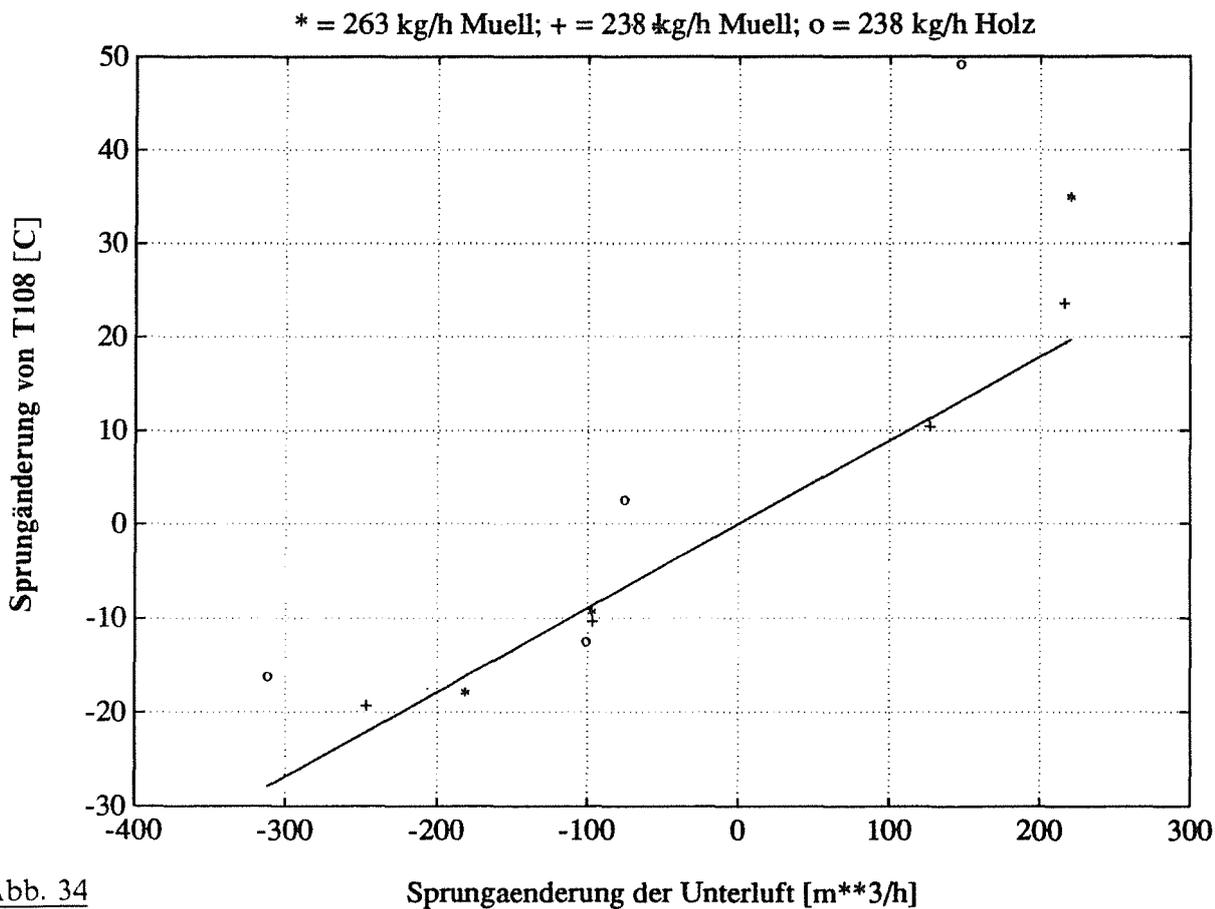


Abb. 34

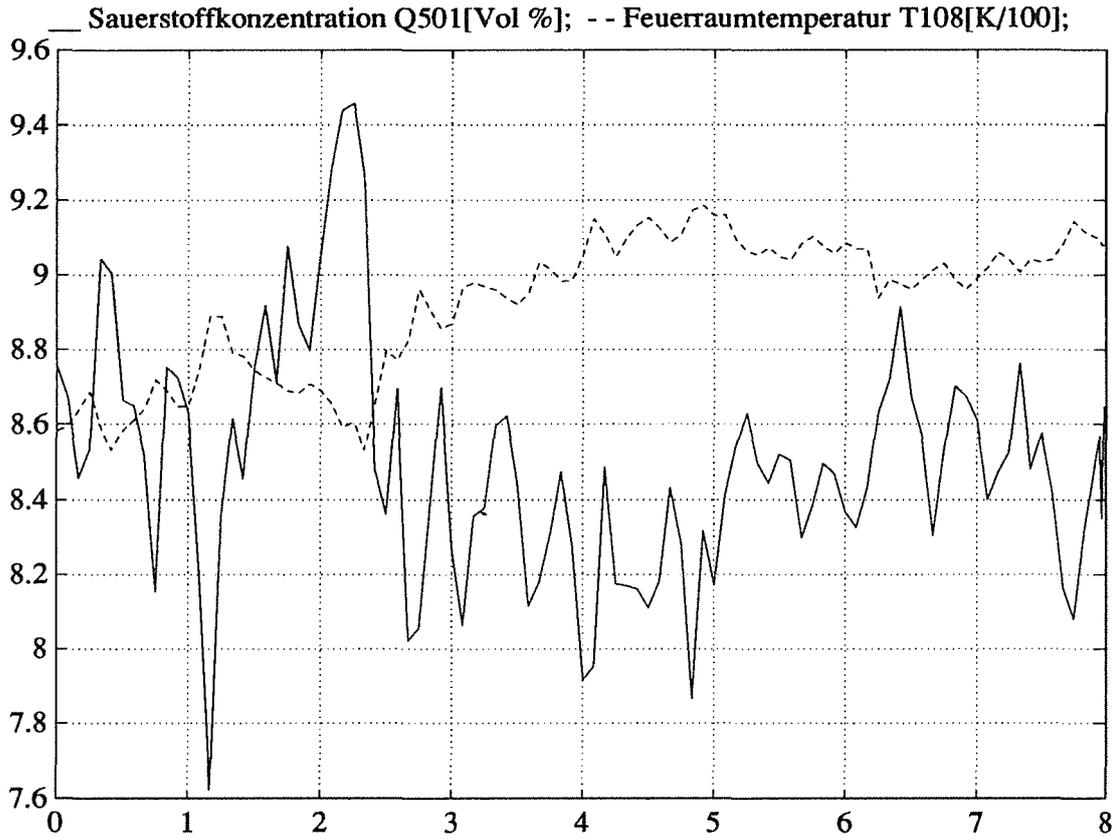


Abb. 35

Zeit(h) am 18apr

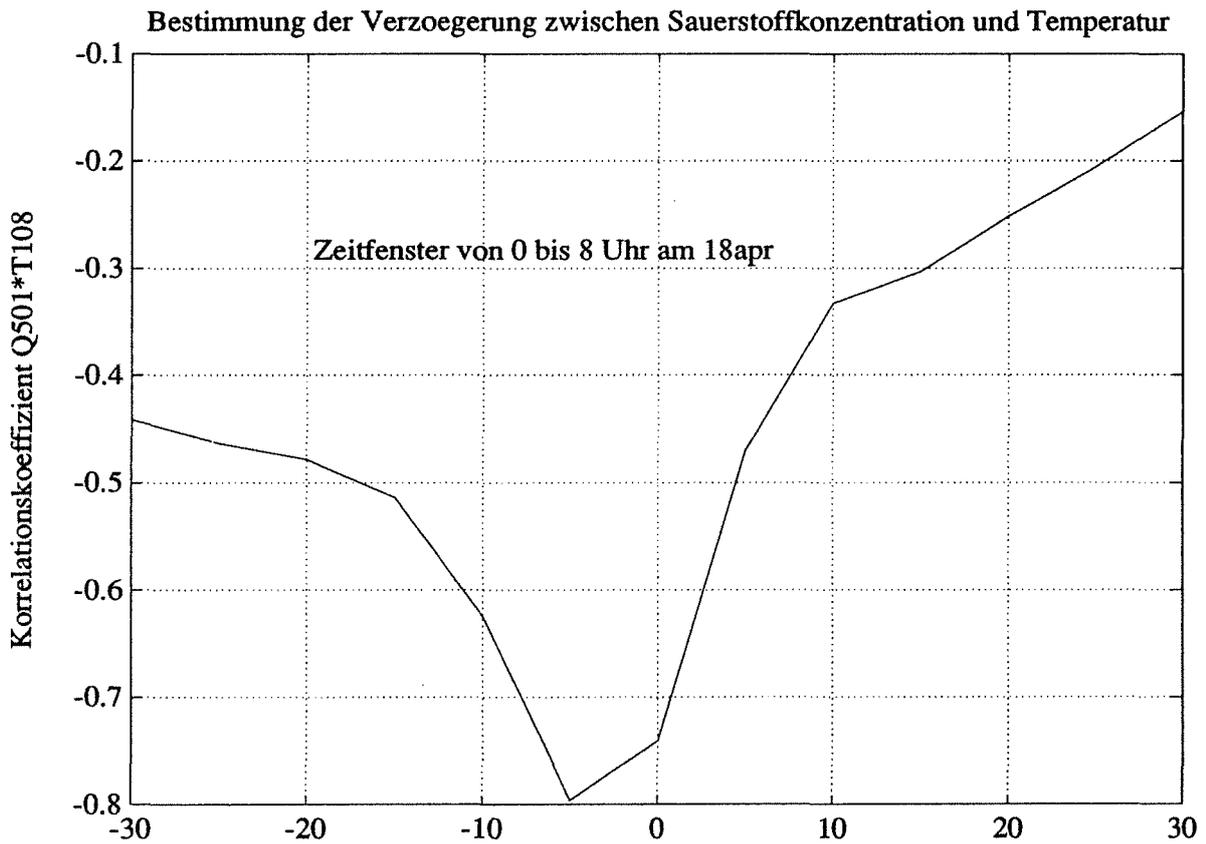


Abb. 36

Zeitverschiebung zwischen Sauerstoff und Temperatur [min]

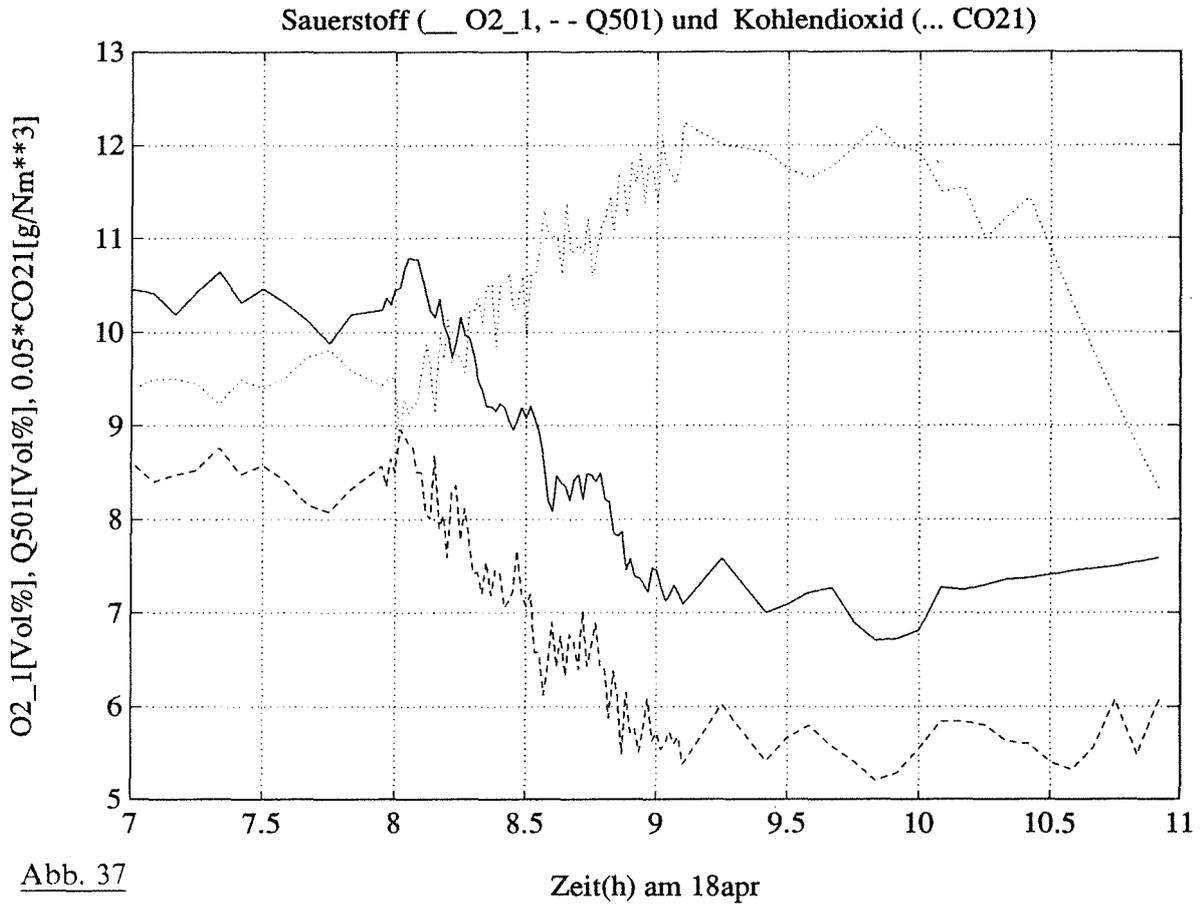


Abb. 37

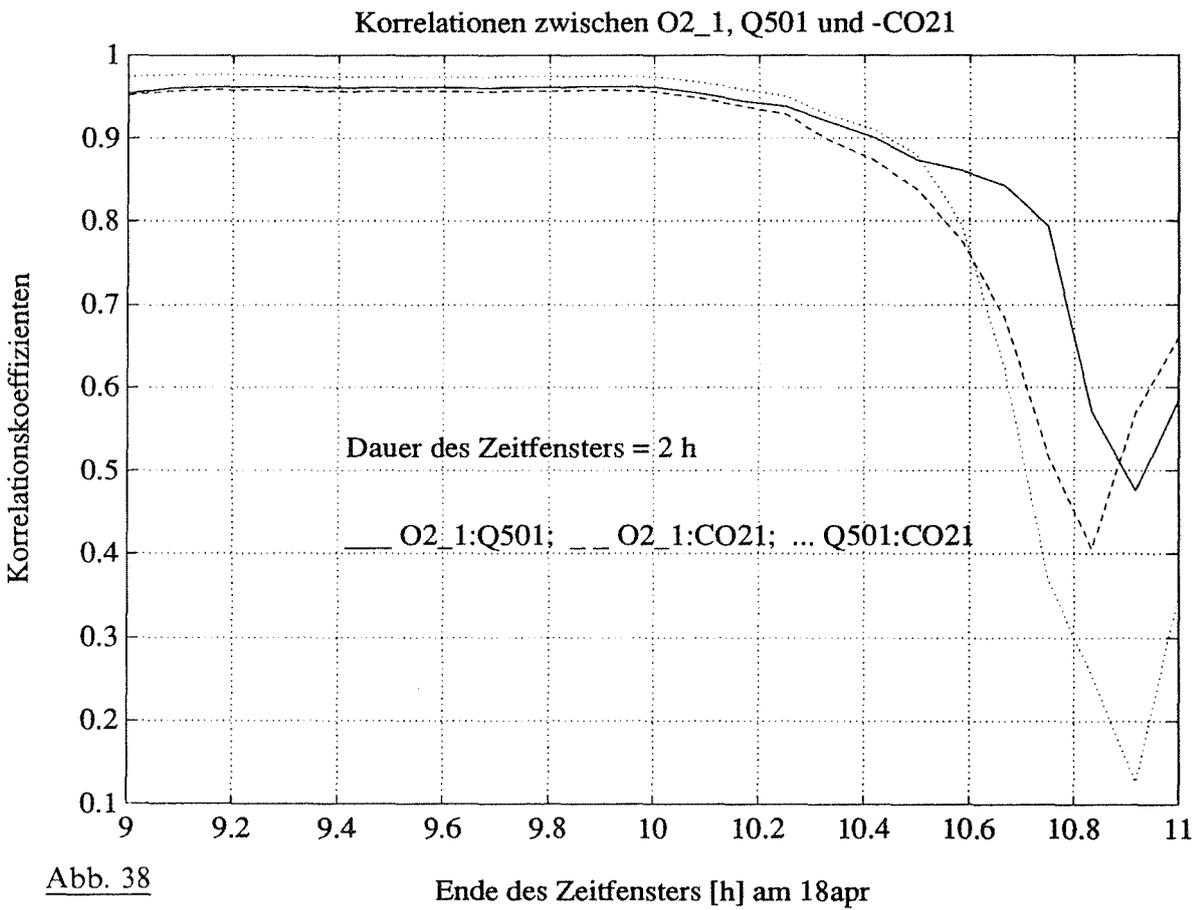


Abb. 38