

EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT FÜR KOHLE UND STAHL — HOHE BEHÖRDE

**FORSCHUNGSHEFTE KOHLE**

**Entwicklung eines Wasserrohrkessels  
mit Kohlenstaubfeuerung**

**Bergtechnik  
Kohleveredlung  
Feuerungstechnik**

**Heft Nr.**

**6**

**LUXEMBURG 1967**

Die Hohe Behörde fördert aufgrund des Artikels 55 § 2 c des Vertrages zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl die Kohle- und Stahlforschung u.a. durch finanzielle Beihilfen. Das vorliegende Forschungsheft berichtet über den Ablauf und die Ergebnisse eines dieser Forschungsvorhaben.

**ABSCHLUSSBERICHT ÜBER DIE VON DER DEUTSCHEN BABCOCK- &  
WILCOX-DAMPFKESSEL-WERKE AG, OBERHAUSEN, DURCHGEFÜHRTE  
ENTWICKLUNG EINES WASSERROHR-KOMPAKTKESSELS MIT  
KOHLENSTAUBFEUERUNG**



## VORWORT

*Gewerbe, Klein- und Mittelindustrie stellen traditionelle Kohlenverbraucher dar, die dank ihrer Anzahl im Gesamtabsatz der Kohle erheblich ins Gewicht fallen.*

*Auch in diese Verbrauchersparten sind in den letzten Jahren Öl und Gas eingebrochen. Der Einbruch wurde noch gefördert durch den Umstand, daß für Öl und Gas Feuerungsanlagen neu entwickelt werden mußten, die entsprechend modern und wirtschaftlich arbeiten.*

*Wenn der Absatz der Kohle im Bereich Handwerk, Klein- und Mittelindustrie nicht weiter durch den Wettbewerb von Öl und Gas zurückgehen soll, müssen neue technisch und wirtschaftlich leistungsfähige kohlenbefeuerte Anlagen entwickelt und bestehende Anlagen verbessert werden. Die Hohe Behörde hat diese Bemühungen durch die Gewährung von Forschungs- und Entwicklungsbeihilfen unterstützt.*

*Über eine von der Deutschen Babcock- & Wilcox-Dampfkessel-Werke AG, Oberhausen, durchgeführte Entwicklung eines „Wasserrohr-Kompaktkessels mit Kohlenstaubfeuerung“ berichtet das vorliegende Forschungsheft.*

K. M. Hettlage



## **Inhalt**

	<b>Seite</b>
<b>1. Ziel des Entwicklungsvorhabens</b>	<b>7</b>
<b>2. Beschreibung des Versuchskessels und seiner Nebeneinrichtungen</b>	<b>7</b>
2.1 Gesamter Versuchsaufbau	8
2.2 Umbau der ölgefeuerten Normalausführung des Babcock-Integralkessels für die Verbrennung von Kohlenstaub	8
2.21 Feuerfeste Auskleidung	9
2.22 Entaschung	9
2.23 Rußbläser	9
2.3 Kohlenmahanlage	9
2.4 Kohlenstaubbrenner	10
2.41 Anforderungen an die Versuchsbrenner	10
2.42 Rotationsbrenner	10
2.43 Rundbrenner	11
2.5 Entstaubung	11
2.51 Füllkörperfilter	11
2.52 Drehströmungsentstauber	12
<b>3. Eigenschaften der verwendeten Kohlenarten</b>	<b>12</b>
<b>4. Vorversuche - Prüfung der Kohlenstaubbrenner</b>	<b>13</b>
4.1 Versuche mit dem Rotationsbrenner	13
4.2 Versuche mit dem Rundbrenner	15
4.21 Untersuchte Anordnungen	15
4.22 Versuchsergebnisse	16
4.23 Schlußfolgerungen	18
<b>5. Übersicht über die Hauptversuche</b>	<b>18</b>
5.1 Versuchsplan	18
5.2 Versuchsdurchführung	19
5.3 Versuchsauswertung	19
<b>6. Ergebnis der Hauptversuche mit verschiedenen Kohlenarten</b>	<b>20</b>
6.1 Kesseluntersuchungen	20
6.11 Verhalten des Kessels bei Dauerbetrieb	20
6.12 Kesselwirkungsgrad	20
6.13 Rauchgaszusammensetzung	21

	Seite
6.2 Eignung des Rundbrenners	21
6.21 Regelbereich des Rundbrenners	21
6.22 Lastabhängige Beladung des Primärluftstroms	22
6.23 Lastabhängiger Einstellbereich des Sekundärluftdralls	22
6.3 Untersuchung der Attritor-Mühle	22
6.31 Betriebsverhalten	22
6.32 Verschleiß	22
6.33 Spezifischer Arbeitsbedarf	23
6.34 Feinheit der Ausmahlung	23
6.35 Schlußfolgerung	23
6.4 Überprüfung der Entstaubungsanlagen	23
6.41 Füllkörperfilter	23
6.42 Drehströmungsentstauber	24
6.43 Gesamtbeurteilung	24
7. Folgerungen aus den Ergebnissen der Hauptversuche	24
8. Zusammenfassung	25
Anlage	27



## 1. ZIEL DES ENTWICKLUNGSVORHABENS

Im Forschungsvertrag, der dem vorliegenden Vorhaben zugrunde liegt, heißt es : „Mit dem Ziele, den Verbrauch von Kohle und Koks als Brennstoff zu fördern, unterstützen die Hohe Behörde und die Ruhrkohlenberatung die Durchführung eines umfassenden Forschungsprogramms „Rationelle Kohlenverwendung“. Dieses Programm umfaßt auch die Forschungsvorhaben, die Gegenstand des vorliegenden Beitrags sind. Es handelt sich hierbei um die **Entwicklung, Konstruktion, Herstellung und Erprobung eines sogenannten Wasserrohr-Kompaktkessels** für Dampfleistungen von 1 — 25 t/h mit Kohlenstaubfeuerung.

Die Kohlenstaubfeuerung macht beim Transport des Brennstoffs und in der Automatisierung des Verbrennungsvorgangs ähnliche Vorteile möglich, wie sie bei der Ölfeuerung vorhanden sind. Es sollen eine geeignete Kohlenstaubfeuerung für kleine Anlagen und ein hierfür geeigneter Kessel entwickelt werden, der ähnliche Vorzüge wie der Öl-Package-Wasserrohr-Kessel besitzt, nämlich eine einfache kompakte Bauart, Eignung zur Vollautomatisierung und geringen Raumbedarf.

Der vorliegende Abschlußbericht enthält eine Zusammenstellung der wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse, die bei der Entwicklung eines kohlenstaubgefeuerten Wasserrohr-Kompaktkessels für Dampfleistungen von 1 — 25 t/h erarbeitet wurden.

Innerhalb der Firma Babcock bestanden bereits Erfahrungen auf dem Gebiet von ölgefeuerten Kleinkesseln. Für den vorliegenden Zweck bot sich der Babcock-Integralkessel vom Typ FM an, der werksgenormt ist und sich beim Ölbetrieb bestens bewährt hat. Eine ausführliche Beschreibung des Kessels und seiner Nebeneinrichtungen erfolgt in Abschnitt 2. Der Kessel ist als sogenannter Package-Kessel transportabel und erfordert deswegen am Aufstellungsort ein Minimum an Montagezeit und -kosten. Als Vorteil ist weiter zu nennen, daß mit dem FM-Kessel Drücke bis zu 70 kp/cm<sup>2</sup> bei einer Heißdampf Temperatur von 500°C erreicht werden können. Dieser Kesseltyp wurde bis zu einer Leistung von 28 t/h gebaut.

Nachdem die Auswahl des Kessels durch Zurückgreifen auf den Integralkessel vom Typ FM gelöst war, blieb noch die Weiterentwicklung des Kessels für den Betrieb mit Kohlenstaubfeuerung. Die schwierigste Aufgabe bestand dabei in der Auswahl und Entwicklung eines geeigneten Kohlenstaubbrenners, der für diese kleinen Leistungen von seiten der Firma zunächst nicht bereitgestellt werden konnte. Diesem Punkt ist daher im vorliegenden Bericht besonders viel Raum gewidmet. Der Kohlenstaubbrenner sollte für ein möglichst breites Brennstoffband mit einem Bereich der flüchtigen Bestandteile zwischen 10 und 40 % verwendet werden können. Der Regelbereich sollte möglichst 1 : 4 betragen.

## 2. BESCHREIBUNG DES VERSUCHSKESSELS UND SEINER NEBENEINRICHTUNGEN

Die Konstruktion des Babcock-Integralkessels, Type FM, ist aus Abbildung 1 ersichtlich. Der Kessel hat Naturumlauf und besitzt auf der Rauchgasseite zwei Züge. Der erste Zug besteht aus Brenn- und Strahlungskammer, der zweite aus den Berührungsheizflächen. Die Berührungsheizflächen setzen sich hauptsächlich aus Fallrohren zusammen, die zwischen Ober- und Untertrommel angeordnet sind. Am Eintritt des zweiten Zugs befindet sich der Überhitzer.

Daten des Versuchskessels:

Leistung :	6,4 t/h Dampf
Druck :	16 atü
Dampf Temperatur nach Überhitzer :	320°C

Bereits bei der Konstruktion des Kessels wurde der beabsichtigte Einsatz zur Verfeuerung von Kohlenstaub weitgehend berücksichtigt. Der FM-Kessel weist eine spezifische Feuerraumbelastung von etwa 180 000 kcal/m<sup>3</sup>h auf, wie sie auch bei den Kesseln mittlerer Größe mit Trockenstaubfeuerung vorliegt. Daraus wird ersichtlich, daß wegen des größeren Verhältnisses Oberfläche zu Volumen der kleinen Brennkammer, in dieser die Rauchgase stärker abgekühlt werden.

## 2.1 Gesamter Versuchsaufbau

Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus findet sich in Abb. 2. Abb. 3 gibt einen Überblick über die eingebauten Meßstellen. Die Verbrennungsluft wird von einem Radialgebläse geliefert und gelangt über einen mit Gas fremdbeheizten Luftvorwärmer zu einem Verteilerkasten. Von hier aus werden die Primär-, Sekundär- und Tertiärluft zum Brenner bzw. zum Kessel geleitet. Die Primärluft wird vorher nochmals auf einen besonderen Verteilerkasten geführt. Diese Maßnahme war für die Versuche notwendig, um wahlweise den Kessel einmal mit der Mühle und zum anderen mit Hilfe des Wiegebunkers betreiben zu können.

Die staubbeladenen Rauchgase gelangen über die Rauchgasleitung in einen Babcock-Abscheidezyklon zur Entstaubung. Nachgeschaltet wurden später entweder das Lühr-Füllkörperfilter oder der von Siemens-Schuckert und von Schüchtermann-Kremer-Baum unter dem Namen „Hurriclone“ vertriebene Drehströmungsentstauber.

Um bei mageren Kohlen einen guten Ausbrand zu erreichen, ist eine feine Ausmahlung der Kohlen erforderlich. Dann erfolgt aber keine befriedigende Abscheidung des feinen Flugstaubes im Zyklon. Im Hinblick auf den Verkauf derartiger Kessel muß daher eine Filteranlage angeschlossen werden, die auch für sehr feine Flugstäube geeignet ist (maximal zulässig :  $150 \text{ mg/Nm}^3$ ). Außerdem muß das Filter in seinen Anschaffungs- und Betriebskosten in einem vernünftigen Verhältnis zu den Kesselkosten stehen.

Ein Economiser wurde in den Kreislauf eingeschaltet, um die Rauchgastemperaturen von  $350^\circ\text{C}$  auf die im praktischen Betrieb am Filtereintritt üblichen herabzusetzen.

Der erzeugte Dampf wird über ein Überströmventil, das den Dampfdruck konstant halten soll, einem Kondensator zugeführt. Das Kondensat läuft dem Speisewasserbehälter zu. Eine Speisewasserpumpe drückt das Wasser über ein vom Trommelwasserstand gesteuertes Ventil in den Kessel. Das Speisewasser ist vollentsalzt und mit Hydrazin geimpft. Als Kondensator dient ein Rieselkühler. Das Kühlwasser wird einem Brunnen entnommen und über die Brunnenpumpe am unteren Bereich des Kondensators verdüst. Das im Sammelbecken anfallende Kühlwasser wird durch eine zweite Pumpe angesaugt und in Rieselrinnen, die oberhalb des Kondensators liegen, eingespeist. Der Kondensator arbeitet im Gegenstromprinzip.

Als Mühle wird ein Fabrikat der englischen Firma Alfred Herbert, Coventry, die sogenannte Attritor-Mühle, eingesetzt. Eine ausführliche Untersuchung der Eigenschaften dieser Mühle, der Ausmahlung, Variationsmöglichkeit, des Verschleißes, der Reisezeiten und der Betriebskosten gehörte mit zum Untersuchungsprogramm. In diesem Rahmen sollte auch die Kombination Kessel/Mühle auf ihre Eignung bei Teillast geprüft werden.

## 2.2 Umbau der ölgefeuerten Normalausführung des Babcock-Integralkessels für die Verbrennung von Kohlenstaub

Wegen der oben genannten stärkeren Auskühlung der Rauchgase, die den Regelbereich des Brenners herabsetzen, wurde eine feuerfeste Auskleidung des ersten Zugs für notwendig befunden. Dies ließ sich bei dem Versuchskessel ohne weiteres durchführen, da die der Auslegung entsprechende Feuerraumtemperatur von  $700$  bis  $750^\circ\text{C}$  tatsächlich nicht erreicht wurde. Da der Kessel auch im ersten Zug mit Aschetriechern versehen wurde, war die Auskröpfung jedes zweiten Rohrs im Kesselboden erforderlich. Die Erläuterung der Veränderungen gegenüber der Normalausführung geschieht anhand von Abb. 4.

## 2.21 FEUERFESTE AUSKLEIDUNG

Der Brennkammereintritt wurde auf einer Länge von 1 m mit einer 100 mm starken Schicht feuerfester Stampfmasse ausgekleidet. Diese Maßnahme sollte eine zu starke Abkühlung der rezirkulierenden Rauchgase, die für die Zündung und Stabilität der Flamme und damit für den Regelbereich des Brenners von entscheidender Bedeutung sind, verhindern und eine genügend starke Wärmeeinstrahlung von den Wänden her ermöglichen. Später wurde noch eine weitere Strecke von 1,5 m mit einer 40 mm starken feuerfesten Schicht versehen.

## 2.22 ENTASCHUNG

Über die Länge des 1. und 2. Zugs sind je drei Aschetrichter angebracht. Um ein Abrutschen aller anfallenden Asche in Richtung der Trichter zu erleichtern, wurden die Schrägen an den Trichtern mit Stampfmasse ausgekleidet. Die nur für den Versuchsbetrieb vorgesehene große Zahl der Trichter erlaubte die Ermittlung der Ascheverteilung in beiden Kesselzügen und den jeweiligen Ausbrand der Asche.

Für die drei Trichter in der Strahlkammer wurde eine Entaschung vorgesehen, die während des Kesselbetriebs kontinuierlich arbeiten konnte. Die anfallende Asche wird abgesaugt und der dazu erforderliche Unterdruck mit einem Ejektor erzeugt. Diese Entaschungsart ist für den Versuchsbetrieb ausreichend, solange die Asche nicht in stark gesinterten Klumpen anfällt. Einen Überblick über die Entaschungseinrichtung gibt Abb. 4.

## 2.23 RUSSBLÄSER

Zur Säuberung der Kesselheizflächen wurden 5 Rußbläser eingebaut. Je ein Rußbläser befindet sich in der Mitte der rechten und linken Wand der Strahlkammer. Mit den Rußbläsern lassen sich Boden, Decke und die Seitenwände sauberhalten. Der dritte Rußbläser ist an der Rückwand der Strahlkammer angebracht und dient zur Reinigung des hinteren Strahlkammerteils und des Überhitzers. Die drei zuerst beschriebenen Rußbläser sind Eindüsenbläser, die übrigen Mehrdüsenbläser. Diese befinden sich an der Vorder- und Rückwand des Kessels im Bereich der Berührungsoberflächen und dienen zu deren Säuberung.

## 2.3 Kohlenmahlanlage

Die zur Feuerung gehörende Mahlanlage ist die „Attritor“-Mühle der englischen Firma Alfred Herbert, Coventry. Der Aufbau der Mühle ist Abb. 5 zu entnehmen. Die Mühle ist selbstbelüftend und erlaubt direktes Einblasen des Mahlguts. Dieses tritt zunächst in den Vormahlraum ein, der mit Schlägern ausgerüstet ist. Diese Grobzerkleinerungsstufe entfiel allerdings für die durchgeführten Versuche, da bereits Feinkohle eingesetzt wurde. Im Anschluß an den Vormahlraum passiert die Kohle die Schlagplatten der Vorderreihe der Rotorscheibe, die ineinandergreifenden Zapfen von Rotor und Stator, den Flügelsichter und endlich das Gebläsead. Die Feinheit der Ausmahlung läßt sich durch Änderung der Zahl der Flügelblätter des Flügelsichters regeln. Die Gebläseleistung kann nur geringfügig geändert werden. Die Hauptversuche wurden unter Benutzung der Attritor-Mühle durchgeführt, wobei der Kohlenstaub direkt in die Feuerung eingeblasen wurde.

Zum Einfahren des Kessels wurde zunächst eine Spezialkohle, nämlich Gießereistaub, über Bunker eingesetzt. Der aus Nußkohlen gemahlene Kohlenstaub hat einen Aschegehalt von etwa 4 %. Damit ließen sich ein einwandfreies Flammenbild und ein sehr guter Ausbrand erzielen.

Für die Einführung der Kohle in den Primärluftstrom wurde ein Zellenrad üblicher Konstruktion mit relativ kleinem Durchmesser verwendet. Der Druck in der Primärluftleitung betrug rd. 200 — 300 mm WS. Zwischen Primärluftleitung und Kohlenstaubbunker wurde ein Druckausgleich vorgesehen.

## 2.4 Kohlenstaubbrenner

Der Vorteil der Kohlenstaubbrenner liegt im allgemeinen darin, daß Brennstoffe mit stärker unterschiedlichen Eigenschaften als bei den üblichen Rostfeuerungen eingesetzt werden können. Weiterhin läßt die Staubfeuerung eine wirtschaftlichere Fahrweise zu. Die Verschmutzungsneigung ist durch die Selbstreinigungswirkung weitgehend herabgesetzt.

### 2.41 ANFORDERUNGEN AN DIE VERSUCHSBRENNER

Voraussetzung für eine einwandfreie Verbrennung des Kohlenstaubs ist neben der Kesselkonstruktion in erster Linie ein guter Brenner. An diesen Brenner werden wegen des breiten zu verfeuernden Brennstoffbands (s. obere Tabelle in Abb. 11) besonders hohe Anforderungen gestellt. Aus diesem Grund müssen Verteilung und Geschwindigkeit der einzelnen Luftströme in weiten Grenzen veränderlich und sowohl eine lange als auch eine kurze Flamme einstellbar sein. Die Flamme soll stabil und pulsationsfrei brennen; zudem soll der Feuerungsverlust möglichst gering sein. Im Rahmen des vorliegenden Entwicklungsvorhabens wurden zwei verschiedene Kohlenstaubbrenner erprobt, die nachfolgend kurz beschrieben werden. Ausführlich wird darauf in Abschnitt 4 eingegangen. Abb. 6 gibt die Lage der eingebauten Tertiärluftdüsen an, die aber für den Dauerbetrieb nicht in Frage kommen. Insgesamt wurden je 4 Düsen in 3 Ebenen vorgesehen.

### 2.42 ROTATIONSBRENNER

Aufgrund der Vorversuche an einer vertikalen, deckengefeuerten Brennkammer wurde zunächst angenommen, daß der Rotationsbrenner die obigen Anforderungen erfüllen würde (Brennerzeichnung siehe Abb. 7).

Bei dem Rotationsbrenner erfolgt der Eintritt des Kohlenstaub-Luft-Gemisches tangential in den inneren Teil des Brenners. Die Sekundärluft wird ebenfalls tangential in den äußeren Brennermantel eingeführt und besitzt einen ringförmigen Austrittsquerschnitt. Sie kann im Gleich- und Gegendrall zur Primärluft zugegeben werden. Der Austrittsquerschnitt der Sekundärluftöffnung ist variabel und gestattet während des Betriebs ein Verstellen der Sekundärluft-Geschwindigkeit.

#### *Verlauf der Verbrennungsluftströmung im Feuerraum*

Im Feuerraum liefert der Brenner einen Luftkegel, der in seinem Winkel verändert werden kann. Die Größe des Kegelwinkels ist durch die tangentiale Eintrittsgeschwindigkeit im Brenner und die tangentiale Austrittsgeschwindigkeit zu beeinflussen. Die resultierende Komponente setzt sich aus Primärluft- und Sekundärluftströmung zusammen.

Die Sekundärluftgeschwindigkeit läßt sich durch den verschiebbaren Primärluftteil verändern. Zur Veränderung des sekundärluftseitigen Geschwindigkeitsbereichs sind Einsätze vorgesehen, die sich relativ schnell auswechseln lassen. Um die Brennercharakteristik (Wirbel- oder Strahlbrenner) variieren zu

können, wird der Brenner sekundärluftseitig tangential von zwei Seiten gegenseitig angeströmt. In jeder Anströmung sind nachträglich Zungenklappen vorgesehen, mit deren Hilfe der Drall der beiden Drehrichtungen steuerbar ist. Das Staub-Luft-Gemisch wird ebenfalls tangential dem Brenner zugeführt. Eine Veränderung der Primärluftgeschwindigkeit bei gleicher Beladung der Primärluft mit Staub ist nicht durchführbar. Weiterhin besteht die unter 2.41 erwähnte Möglichkeit, der Flamme noch Tertiärluft im Bereich des Brenn- bzw. Strahlraums zuzuführen. Die Tertiärluft läßt sich sowohl insgesamt als auch in der Ebene regeln. Die einzelnen Düsen sind nicht für sich regelbar.

Wegen der beim Betrieb auftretenden Schwierigkeiten wurden konstruktive Änderungen am Brenner vorgenommen. Insgesamt wurden 3 Ausführungen untersucht. Darauf wird ausführlich in Abschnitt 4 eingegangen.

### **2.43 RUNDBRENNER**

Nachdem mit dem Rotationsbrenner bei der vorhandenen Brennkammer keine zufriedenstellenden Ergebnisse zu erzielen waren, wurden weitere Versuche mit dem Rundbrenner durchgeführt.

Wie Bild 8a zeigt, erfolgt beim Rundbrenner die Zuführung der Primärluft ohne Drall. Vor Eintritt in den Brenner erfährt das Kohlenstaub-Luft-Gemisch eine Umlenkung durch einen Prallkrümmer, wodurch eine gleichmäßige Beladung des Primärluftstroms bewirkt wird. Der Drall der Sekundärluft kann mittels eines Drallgeschränks geregelt werden. Die Austrittsgeschwindigkeit der Sekundärluft ist durch einen axial verschiebbaren Kegeleinsatz um etwa 10 bis 20 % veränderlich. Konzentrisch in der Brennerkehle befindet sich ein in Bild 8b im Detail abgebildeter Kohlenstaubverteiler, dessen Außendurchmesser mit dem Innendurchmesser des Primärluftrohrs übereinstimmt. Der Kohlenstaubverteiler ist axial verschiebbar.

## **2.5 Entstaubung**

Magere Kohlen verlangen für eine einwandfreie Verbrennung eine besonders feine Ausmahlung. Die dabei anfallenden Flugstäube lassen sich in einem gewöhnlichen Abscheidezyklon nicht mehr in befriedigendem Maß abscheiden. Ein wirksames Filter für die anfallenden feinen Stäube muß aber im Hinblick auf den Verkauf derartiger kohlenstaubgefeuerter Kessel gefunden werden. Die Anschaffungskosten der Filteranlage müssen in einem vernünftigen Verhältnis zu denen des Kessels stehen.

Im Rahmen des Entwicklungsvorhabens wurden zwei Filter für die Untersuchung vorgesehen:

1. das Füllkörper-Filter der Firma Lühr
2. der Drehströmungsentstauber „Hurricane“ der Firma Schüchtermann-Kremer-Baum.

Um die Abgastemperaturen von 350°C auf im Betrieb übliche Temperaturen herabzusetzen, wurde in den Versuchskreislauf noch ein Economiser eingeschaltet, wie aus Abb. 2 zu ersehen ist.

### **2.51 FÜLLKÖRPERFILTER**

Das Lührfilter ist eine Neukonstruktion und besteht hauptsächlich aus einem Festkörperbett, das die Staubpartikel zurückhält. Das Prinzip des Filters ist am besten aus Abb. 9 ersichtlich. Die staubbeladenen Gase treten durch die Hohlräume zwischen den Füllkörpern, wobei sie durch vielfache Umlenkung und

Durchwandern von Beruhigungsräumen den Staub abscheiden sollen. Als Füllmaterial wurde eine keramische Masse in Form von leichten Hohlkugeln (Durchmesser 2 - 4 mm) eingesetzt. Nach einer bestimmten Beaufschlagungsdauer mit staubhaltiger Luft wurden jeweils 3 von insgesamt 50 Kästen mit Spülluft in entgegengesetzter Richtung durchgeblasen. Die Spülvorrichtung arbeitete automatisch, das Ausblasen wurde durch einen pulsierenden Luftstrom erleichtert. Luftmenge, Blasintervall und Blasdauer konnten den jeweiligen Bedürfnissen angepaßt werden. Die Luftpulsation wurde durch Auf- und Zufahren einer Drosselklappe bewerkstelligt.

Das Lühr-Füllkörper-Filter wurde bisher bei Trommeltrocknern im Straßenbau für die Trocknung von Kies und Splitt verwendet, wo es sich gut bewährt haben soll. Der von den Herstellern angegebene Abscheidegrad bis zu 98 % wurde jedoch bei unseren Versuchen nicht erreicht (siehe Abschnitt 6.41).

## 2.52 DREHSTRÖMUNGSENTSTAUBER

Der Aufbau des Drehströmungsentstaubers der Firma Schüchtermann-Kremer-Baum geht aus Abb. 10 hervor. Der mit dem Staub beladene Rohgasstrom wird über die untere Düsenreihe aufgegeben, während durch die obere Düsenreihe Frischluft in den Apparat geführt wird. Rohgas und Frischluft werden mittels eines Saugzugs über die Düsen angesaugt. Das erforderliche Mengenverhältnis von Rauchgas zu Frischgas beträgt etwa 1 kg Frischluft je kg Rauchgas. In diesem Frischluftbedarf und dem damit verbundenen Energieaufwand liegt der Hauptnachteil des Drehströmungsentstaubers.

Im Drehströmungsentstauber bilden sich außen ein Potentialwirbel und innen eine Drehströmung aus. Im Potentialwirbel fällt die Tangentialgeschwindigkeit hyperbolisch nach außen ab, während sie in der Drehströmung proportional dem Radius ansteigt. Bei Staubzuführung bildet sich im Mischgebiet zwischen Potential- und Drehströmung ein Staubring aus, der dadurch zustande kommt, daß einmal die Staubteilchen durch die Zentrifugalkräfte von innen nach außen geschleudert werden, zum anderen nimmt die Tangentialkomponente der Geschwindigkeit in der Potentialströmung nach außen rasch ab, während gleichzeitig eine radial nach innen gerichtete Geschwindigkeitskomponente auftritt. Das Gleichgewicht der an den Staubteilchen angreifenden in entgegengesetzter Richtung wirkenden Kräfte bildet die Existenzbedingung für den Staubring. Durch geschickte Anordnung der tangential einblasenden Düsen kann eine kontinuierliche Staubabscheidung erzielt werden <sup>(1)</sup>.

Eine Diskussion der mit dem Drehströmungsentstauber erzielten Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 6.42.

## 3. EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN KOHLENARTEN

Bei den Versuchen wurden insgesamt 5 Kohlensorten eingesetzt, die sich im wesentlichen durch ihren Gehalt an flüchtigen Bestandteilen unterscheiden. Im einzelnen wurden auf ihr Verhalten bei der Verbrennung untersucht: die Kohlen der Zechen Lohberg, Auguste Victoria, Osterfeld und Concordia. Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen liegt zwischen 35 und 20 %, während der Wassergehalt zwischen 6,5 und 9 % liegt. Stark abweichendes Verhalten zeigt Carborat, welches nur 8,8 % Flüchtige bei 20 % Asche und 0,1 % Wasser aufweist. Wie sich später bei einem Versuch zeigte, ist Carborat für den kohlenstaubgefeuerten FM-Kessel ungeeignet. Aus diesem Grund wurde auch nur ein Versuch (siehe Abschnitt 6.11) durchgeführt.

<sup>(1)</sup> Eine ausführliche Beschreibung findet sich bei K.R. Schmidt, Physikalische Grundlagen und Prinzip des Drehströmungsentstaubers, Staub 23 (1963), Nr. 11 Nov., S. 491/501.

Eine Zusammenstellung der Eigenschaften der verwendeten Kohlensorten zeigt die Tabelle Abb. 11 in der Reihenfolge abnehmenden Gehalts an Flüchtigen.

Abb. 12 gibt einen anschaulichen Vergleich von Schmelzpunkt, Aschegehalt, flüchtigen Bestandteilen und Heizwert der einzelnen Kohlensorten. Der Ascheschmelzpunkt der verwendeten Kohlen entspricht etwa dem Mittelwert üblicher Ruhrkohlenaschen, die in ihrem Schmelzverhalten auch in etwa denen anderer Zechen ähnlich sind. Diese Kohlen — mit Ausnahme einer Magerkohle wie des Carborats — können ohne weiteres verwendet werden, wenn gewährleistet ist, daß die Rauchgase beim Eintritt in die Berührungsheizfläche unter der Erweichungstemperatur der Asche liegen.

Der Anteil der Primärluft hängt im wesentlichen vom Gehalt an flüchtigen Bestandteilen der Kohle ab und beträgt etwa 30 % bei Gasflammkohle und 10 % bei Magerkohle.

#### **4. VORVERSUCHE — PRÜFUNG DER KOHLENSTAUBBRENNER**

Nachdem mit der Erstellung des umgebauten FM-Kessels die Kesselfrage soweit gelöst war, bestand die zweite wichtige Aufgabe darin, einen für diesen Kessel geeigneten Kohlenstaubbrenner zu finden, der den in Abschnitt 2.41 genannten Anforderungen entsprach. Zunächst wurde der Rotationsbrenner für diesen Zweck als geeignet betrachtet, da er sich in einem kleineren, senkrecht von oben nach unten gefeuerten Brennschacht positiv verhalten hatte. Bei den Versuchen stellte sich allerdings heraus, daß die Versuchsergebnisse am Brennschacht sich nur schlecht auf den Brenner am FM-Kessel übertragen ließen. Konstruktive Änderungen des Brenners — insgesamt wurden 3 Ausführungen untersucht — blieben ohne Erfolg. Der später untersuchte Rundbrenner entsprach nach einigen Änderungen den genannten Forderungen und wurde für die Hauptversuche benutzt. Bei den Vorversuchen erfolgte die Zuführung des Kohlenstaubs zum Brenner über den Wiegebunker.

##### **4.1 Versuche mit dem Rotationsbrenner**

Die Funktionsweise des Rotationsbrenners wurde in den Hauptzügen bereits in Abschnitt 2.42 erläutert. Insgesamt wurden 3 Ausführungen dieses Brennertyps untersucht, die in Abb. 13 dargestellt sind. Daraus gehen die jeweils durchgeführten konstruktiven Änderungen hervor. Die Versuche am Rotationsbrenner wurden ausschließlich mit Lohberg-Kohle ausgeführt.

###### *Erste Brennerausführung*

Bei der Untersuchung der ersten Brennerausführung wurde folgendes festgestellt :

- a) Der Kohlenstaub strömt in einer einzelnen Strähne in den Feuerraum.
- b) Der in seinen Grenzen kaum zu verändernde große Kegelwinkel bewirkt zwar eine stabile Zündung, gleichzeitig bildet sich aber eine sehr kurze Flamme aus, die teilweise an der Stirnwand anliegt (Wandstrahl) und deswegen einen schlechten Ausbrand zeigt.

Weiterhin bestand aufgrund der geringen axialen Geschwindigkeiten der Primärluft Rückschlaggefahr der Flamme.

Bei optimaler Brenneinstellung, d.h. möglichst gutes optisches Flammenbild bei möglichst niedrigem Luftüberschuß, wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Regelbereich :	1 : 2
Feuerungsverlust :	13 — 15 %
Flammenlänge :	1 — 2 m bei 360 kg/h Durchsatz
Ausmahlung :	10 % R auf Sieb 0,09
CO-Grenze :	bei 10 Vol.-% CO <sub>2</sub>

Die CO-Grenze, die den CO<sub>2</sub>-Gehalt bei der mit dem CO-Meßverfahren noch gut erkennbaren ersten CO-Anzeige angibt, wurde über die Öffnung am Brennkammerende bestimmt.

### *Zweite Brennerausführung*

Gegenüber der ersten Ausführung wurde der Durchmesser der Primärluftdüse von 346 mm auf 250 mm verkleinert, was eine Verdoppelung der mittleren Austrittsgeschwindigkeit bedeutet. Zur Verbesserung der Staubverteilung wurden 8 Stolperleisten im Primärluftteil gleichmäßig über den Umfang verteilt angeordnet. Um den Drall der Sekundärluft steuern zu können, wurde vor dem Brenner ein Luftverteilerkasten angeordnet, der die Einstellung beider möglichen Drallrichtungen erlaubte. Durch diese Maßnahme konnte jeder gewünschte Luftkegelwinkel erzielt werden.

Durch Verringerung der Drallkomponente konnte eine geringfügige Veränderung der Flamme erzielt werden. Der Regelbereich wurde verbessert. Die Wirkung der Stolperleisten war allerdings gering, der Staub strömte wie bei Ausführung 1 in einer Strähne in den Feuerraum. Es wurde festgestellt, daß sich bei größerem Staub (Veränderung der Ausmahlung von 10 auf 30 % Rückstand auf Sieb 0,09) die Entmischung verstärkte. Die Staubströmung und damit die Lage der Flamme waren labil. Bei gegebener Luftzustellung konnte die Flamme einmal im oberen und zum anderen im unteren Teil der Brennkammer liegen.

Ergebnisse :

Regelbereich :	1 : 2,5
Feuerungsverlust :	2,5 — 3,5 %
Flammenlänge :	1,5 — 2,5 m bei 360 kg/h Durchsatz
Ausmahlung :	22 % R auf Sieb 0,09
CO-Grenze :	17 Vol.-% CO <sub>2</sub>

Abb. 14 zeigt den Ausbrand, das Regelverhalten, die Flammenlänge bei 360 kg/h Durchsatz und den CO<sub>2</sub>-Gehalt an der CO-Grenze als Funktion des Kegelwinkels.

Es wurde festgestellt, daß unabhängig vom Kegelwinkel und der Drallrichtung die günstigsten Primär- und Sekundärluftgeschwindigkeiten zwischen 10 — 13 m/s bzw. zwischen 50 — 60 m/s lagen.

Zusätzlich wurden noch 10 — 15 % Tertiärluft in einem Abstand von 500 mm über 4 Düsen zugegeben. Grundsätzlich bewirkt die Tertiärluft eine Beruhigung der Flamme, sie fördert jedoch die CO-Bildung.

### *Dritte Brennerausführung*

Wegen des noch nicht gelösten Problems der gleichmäßigen Staubbeaufschlagung des Primärluftstroms, wobei die Flamme immer noch die keramische Auskleidung berührte, wurde der Brenner ohne Primärluftdrall ausgeführt, wie aus Abb.15 zu entnehmen ist. Entgegen den Erwartungen wurde aber die Verbrennung verschlechtert. Dies hat vermutlich folgende Ursachen :

- Die Staubverteilung ist trotz drallfreier Zuführung sehr ungleichmäßig, was zum Teil auf die ungünstige Leitungsführung und die runden Krümmer zurückzuführen ist.
- Die drallfreie Zuführung des Staub-Luft-Gemischstromes bewirkt eine Herabsetzung des Regelbereichs.



Der zusätzliche Einbau eines Prallverteilers vor der Primärluft-Austrittsöffnung brachte keine Verbesserung.

Zur besseren Übersicht der Strömungsverhältnisse bei den drei Ausführungen sind diese in Abb. 15 perspektivisch dargestellt. Auf der unteren Bildhälfte sind die auftretenden Geschwindigkeitskomponenten und Strömungswinkel in ihren Variationsmöglichkeiten bei den einzelnen Ausführungen skizziert. Abb. 16 zeigt zum Vergleich die Zuführung des Kohlenstaubluftegemischs am Rotations- und Rundbrenner, der anschließend besprochen wird.

Die mit dem Rotationsbrenner erzielten Ergebnisse waren trotz der durchgeführten konstruktiven Änderungen unbefriedigend, so daß diese Brennerkonzeption fallengelassen wurde. Wegen der mit der Lohberg-Kohle erhaltenen negativen Ergebnisse wurden keine weiteren Kohlsorten verfeuert.

## 4.2 Versuche mit dem Rundbrenner

Eine Beschreibung des Rundbrenners wurde bereits früher in Abschnitt 2.43 gegeben. Nachfolgend soll daher nur noch auf die bei den Versuchen eingehaltenen Stellungen des Kohlenstaubverteilers in Abb. 17 eingegangen werden. Zuvor sei jedoch noch auf die Ergebnisse von Strömungsmessungen am kalten Brenner berichtet. Es ergab sich, daß

- a) die Luftbeaufschlagung sowohl primär- als auch sekundärseitig befriedigend ist.
- b) die Strömungsgeschwindigkeit bei der halben Luftmenge um den Wert von etwa  $\pm 3$  m/s schwankt.
- c) die Kennlinie des Drallgeschränks ungünstig ist.

Abb. 18 zeigt auf der oberen Blatthälfte den ungefähren Drallwinkel in Abhängigkeit von der Drallklappenstellung. Der Drallwinkel wurde optisch bestimmt. Abb. 19 dient zur Erläuterung des hier angegebenen Drallwinkels, der keine strömungstechnisch exakt definierte Größe darstellt. Aus Abb. 20 ist zu erkennen, daß der für die Flammenstabilität maßgebliche Drall der Verbrennungsluft erst bei zu mehr als 70 % geschlossenen Drallklappen in Erscheinung tritt.

Die Versuche wurden mit Kohlen der Zechen Lohberg, Auguste Victoria, Osterfeld und Concordia durchgeführt. Die Daten der Kohlen sind in den Abb. 11, 12 und in Abschnitt 3 enthalten. Die Verbrennungslufttemperatur betrug 25°C. Aufgrund der Versuche mit dem Rotationsbrenner wurde eine Mahlfineinheit von 20 % Rückstand auf dem 90- $\mu$ -Sieb gewählt.

Untersucht wurden das Regelverhalten, der Ausbrand und die Flammenform bei Veränderung der Primär- und Sekundärluftgeschwindigkeit, der Drallklappen- und Kohlenstaubverteilerstellung.

### 4.21 UNTERSUCHTE ANORDNUNGEN

Die ersten Versuche wurden mit Lohberg-Kohle durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß die erste konstruktive Ausführung noch keine befriedigenden Ergebnisse brachte. Insgesamt wurden 3 Brennerausführungen untersucht. Bei der jeweils günstigsten Brennereinstellung, d.h. Drallklappen- und Kohlenstaubverteilerstellung sowie Aufteilung der Verbrennungsluft auf Primär- und Sekundärluftkanäle, wurden bei den 3 untersuchten Anordnungen folgende Ergebnisse erzielt.

#### *Anordnung 1*

Abb. 17 zeigt die drei Brenneranordnungen, die bei dem Rundbrenner durch verschiedene Stellungen des Kohlenstaubverteilers gegeben sind. Bei einem Anteil der Sekundärluft von 75 % und einer Luftzahl

von  $n = 1,25$  betrug bei Vollast die axiale Luftgeschwindigkeit am Kehleneintritt 25 m/s (Lufttemperatur 25°C). Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Regelbereich :	1 : 2
Unverbranntes im Rohgas :	60 — 70 %
CO-Grenze :	CO <sub>2</sub> -Gehalt von 15 — 16 % bei 85 % Last
	CO <sub>2</sub> -Gehalt von 12 % bei Schwachlast

Die Flamme schlug an die Wand und neigte zum Pulsieren. Aus diesem Grund wurden die Versuche bei Anordnung 2 mit höherer Sekundärluftgeschwindigkeit wiederholt.

#### *Anordnung 2*

Bei der Anordnung 2 wurde der Kehldurchmesser von 400 auf 320 mm verkleinert; die Sekundärluftgeschwindigkeit stieg bei Vollast dadurch auf 40m/s an. Die Kehlenverkleinerung ist in Abb.17 angegeben. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

Regelbereich :	1 : 1,5
Unverbranntes im Rohgas :	60 — 70 %
CO-Grenze :	CO <sub>2</sub> -Gehalt von 14,0 % bei 85 % Last
	CO <sub>2</sub> -Gehalt von 10,0 % bei Schwachlast

Bei dieser Anordnung wies die Flamme eine gut gebündelte Form auf und hatte keine Wandberührung. Ein besserer Ausbrand wurde jedoch nicht erzielt. Durch die höhere Sekundärluftgeschwindigkeit wurde gleichzeitig die Flamme instabiler und der Regelbereich verringerte sich dadurch auf 1 : 1,5.

#### *Anordnung 3*

Zur Erhöhung der Stabilität und Verbesserung des Ausbrands wurde bei Anordnung 3 die keramische Ausmauerung um 1,5 m verlängert. Die straffe Form der Flamme blieb erhalten, so daß bei keinem Lastpunkt die Wände berührt wurden. Bei Ausbrand und Regelbereich wurden höhere Werte erzielt. Folgende Zahlenwerte ergaben sich :

Regelbereich :	1 : 2,7
Unverbranntes im Rohgas :	40 — 45 %
CO-Grenze :	CO <sub>2</sub> -Gehalt von 16,0 % bei 85 % Last
	CO <sub>2</sub> -Gehalt von 12,0 % bei Schwachlast

Abb. 21 zeigt die Sekundärluftgeschwindigkeit, die Flammenlänge, den Feuerungsverlust und den CO<sub>2</sub>-Gehalt an der CO-Grenze in Abhängigkeit vom Brennstoffdurchsatz.

## 4.22 VERSUCHSERGEBNISSE

Ein Teil der Ergebnisse an den verschiedenen Ausführungen des Rundbrenners mit **Lohberg-Kohle** wurde bereits in 4.21 diskutiert. Für die weiteren Untersuchungen wurde die Ausführung 3 beibehalten.

Ein wichtiges Brennelement ist der **Kohlenstaubverteiler**, der zur Stabilisierung der Flamme dient. Ohne Verteiler war ein einwandfreier Brennerbetrieb nicht möglich. Als günstigste Lage des Kohlen-

staubverteilers wurde die Kehlenaustrittsebene herausgefunden. Ein Einfluß des Ablenkwinkels am Kohlenstaubverteiler wurde bei den Versuchen mit Concordia-Kohle festgestellt. Gegenüber dem 30°-Verteiler wirkte sich der 45°-Verteiler ungünstiger aus.

Untersucht wurde ebenfalls der Einfluß der **Mahlfeinheit** auf die Verbrennung. Es zeigte sich, daß bei  $R\ 0,09 = 10\ %$  aufgrund der geringeren Kornträgheit mit wesentlich höherer Primärluftgeschwindigkeit gearbeitet werden mußte, um ein gleich gutes Flammenbild wie bei  $R\ 0,09 = 20\ %$  zu erhalten. Eine schlechtere Verbrennung ergab sich bei einer Mahlfeinheit von  $R\ 0,09 = 34\ %$ . Um eine optisch einwandfrei brennende Flamme zu erzielen, mußte hier die Primärluftgeschwindigkeit herabgesetzt werden.

In Abb. 18 (unten) ist der Druckverlust des Geschränks als Funktion des Luftdurchsatzes angegeben. Die **Drallklappenstellung** wurde als Parameter gewählt. Für die Flammenform ergab die Beobachtung bei verschiedenen Drallklappenstellungen :

a) Drallklappe 90 % geschlossen :

Flamme wird kurz und dick, sie brennt stabil.

b) Drallklappe 70 % geschlossen :

Flamme wird lang und schmal, sie brennt instabil.

Hinsichtlich der **Aufteilung der Luft** in Primär- und Sekundärluft erwies sich ein Anteil von 20 — 30 % Primär- und 70 — 80 % Sekundärluft als günstigste Einstellung. Dabei wurde weiterhin festgestellt, daß die Anordnung 2 (hohe Geschwindigkeit, Keramik noch nicht erweitert) empfindlich auf Abweichungen von diesem Verhältnis reagiert.

Bei Einsatz von **Tertiärluft**, die in 3 Ebenen (in 1 Ebene 4 Düsen, siehe Abb. 6) für jede Ebene geregelt werden kann, berührte die Flamme leicht die Seitenwände. Die CO-Bildung wird begünstigt (Einsatz von Kaltluft), und die Feuerraumtemperaturen sind geringer. Durch Absenken der Sekundärluftmenge wird Ausschleudern von Staub begünstigt. Insgesamt betrachtet ist der Zusatz von Tertiärluft ungünstig, auch schon wegen des höheren Regelaufwands ist der Einsatz von Tertiärluft nicht zu befürworten.

Abb. 22 gibt einen Einblick in die Wirkung der **Erweiterung der Keramikauskleidung** auf die Feuerraumtemperatur. Dies ist für die Fälle ohne und mit vergrößerter Auskleidung als Funktion der Kessellast aufgetragen. Danach beträgt die Temperaturerhöhung für die erweiterte Ausstempelung unabhängig von der Last etwa 100°C.

Schließlich wurde noch der **Flugstaubanfall** im 1. und 2. Zug sowie im Abscheidezyklon gemessen. Der Flugstaub im Reingas ist dabei nicht berücksichtigt. Abb. 23 gibt einen Überblick über den Flugstaubanfall in den einzelnen Abscheidetrichtern und im Zyklon. Nach Erweiterung der Keramik wurde beobachtet, daß an der Umlenkung vom 1. zum 2. Zug der angefallene Flugstaub in den Trichtern IV, V und VI aufgrund der höheren Feuerraumtemperatur bei der Entleerung im Stillstand noch glühte.

Bei einem Durchsatz von mehr als 500 kg/h wurde nach 2 — 3 h der Beginn leichter Verschlackungen beobachtet.

Mit den übrigen Kohlenarten ließ sich über den Regelbereich eine schlanke Flamme einstellen. Allerdings war das Flammenbild bei den Kohlen Osterfeld und Concordia, die einen geringeren Anteil an flüchtigen Bestandteilen besitzen, unklarer.

Bei der jeweils optimalen Brennereinstellung wurden nachfolgend aufgeführte Ergebnisse erzielt.

#### *Auguste-Victoria-Kohle*

Gegenüber der Lohberg-Kohle wurde im Feuerungsverhalten kein Unterschied festgestellt.

Regelbereich :	1 : 2,7
Unverbranntes im Rohgas :	40 %
CO-Grenze bei 85 % Last :	16 — 17 %
bei Schwachlast :	12 — 13 %

#### *Osterfeld-Kohle*

Durch den geringen Anteil an flüchtigen Bestandteilen verringerte sich der Regelbereich auf 1 : 2,3. Das Unverbrannte im Rohgas erhöhte sich auf ca. 65 %.

#### *Concordia-Kohle*

Gegenüber der Osterfeld-Kohle wurde kein wesentlicher Unterschied im Feuerungsverhalten festgestellt.

### 4.23 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Für den späteren Einsatz des Kessels sind Dampfleistungen bis zu 20 — 25 t/h geplant. Der Brennkammerquerschnitt beträgt beim FM-Kessel-Typ unabhängig von der Dampfleistung etwa 3,9 m<sup>2</sup>, d.h. die Querschnittsbelastung erhöht sich von  $1,35 \cdot 10^6$  kcal/m<sup>2</sup>h bei 6,4 t/h Leistung auf  $5,4 \cdot 10^6$  kcal/m<sup>2</sup>h bei 20 — 25 t/h Leistung. Maximalwerte der Querschnittsbelastung betragen bei herkömmlichen Trockenstaubfeuerungen etwa  $2,4 \cdot 10^6$  kcal/m<sup>2</sup>h. Es ist aus diesem Grund etwas fraglich, ob sich dieser Kesseltyp bei Dampfleistungen von mehr als 15 t/h ohne Anpassungsschwierigkeiten mit dem Brenner betreiben läßt.

Beim vorliegenden Lastbereich läßt sich der verwendete Rundbrenner für alle verwendeten Kohlensorten gut einsetzen. Dies ist auch das Ergebnis der in den weiteren Abschnitten zu besprechenden Dauerversuche.

## 5. ÜBERSICHT ÜBER DIE HAUPTVERSUCHE

Bevor die Versuchsergebnisse bei Dauerbetrieb des Kessels diskutiert werden, erscheint es zweckmäßig, einen Überblick über Versuchsplan, Durchführung und Auswertung der Hauptversuche zu geben.

### 5.1 Versuchsplan

Die Hauptversuche betreffen :

1. Kessel- und Brenneruntersuchung
2. Überprüfung der Attritor-Mühle
3. Untersuchung des Lührfilters und des Drehströmungsentstaubers

Der eigentliche Sinn der Hauptversuche liegt in der Ermittlung der Verschmutzungsneigung des Kessels. Die Versuche sollten möglichst wirklichkeitsgetreu gefahren werden. Deswegen wurde heiße Verbrennungsluft je nach Kohlensorte mit einer Temperatur zwischen 180 und 350°C zugeführt. Bei Teillastbetrieb wurde die Heißlufttemperatur durch Regelung des fremdbeheizten Luvos ebenfalls abgesenkt, wie es im normalen Betrieb mit Direktbeheizung zu erwarten ist. Ein wichtiger Punkt des Untersuchungsprogramms war die Feststellung der erforderlichen Häufigkeit des Rußbläserinsatzes. Bei den Vorversuchen erfolgte die Zuteilung des Kohlenstaubs über einen Wiegebunker, wie bereits in Abschnitt 2 erwähnt wurde.

Bei den Hauptversuchen wurde die Zuteilungsart nur bei Carborat, welches bereits staubförmig anfällt, verwendet.

Der größte Teil der Hauptversuche wurde unter Einsatz der Attritor-Mühle durchgeführt. Mit dem für die Hauptversuche verwendeten Rundbrenner wurden insgesamt 5 Kohlensorten verfeuert : Lohberg, Auguste Victoria, Osterfeld, Concordia und Carborat (nicht im Dauerversuch).

## 5.2 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Versuche gestaltete sich im wesentlichen folgendermaßen. In den ersten Wochen wurde der Kessel mit Vollast betrieben. Danach wurde der Kessel abgefahren und der Zustand der Brennkammer fotografisch festgehalten. In der zweiten Woche wurde der Lastbereich mehrfach geändert, um Daten auch über das Teillastverhalten des Kessels zu bekommen. Soweit wie möglich wurde der Kessel optimal betrieben, d.h. die Flamme wurde so eingestellt, daß sie optisch ein gutes Bild ergab. Dabei mußte zwischen Ausbrand, Flammentemperatur und Verschmutzung ein Kompromiß gewählt werden.

Die gesamte Versuchsdauer für eine Kohlensorte betrug zwei Wochen. Nach Beendigung der Versuche für eine Kohlensorte wurde der Endzustand des Kessels wiederum durch Fotografien belegt. Danach erfolgte eine gründliche Säuberung der Kesselheizflächen und vor allem des keramisch ausgekleideten Teils der Kammer. Letzterer verschmutzte am meisten. Während der Versuche wurden alle Größen wie Mengen, Temperaturen, Drücke usw., die zur Aufstellung von Wärme- und Massenbilanzen erforderlich sind, kontinuierlich aufgezeichnet.

## 5.3 Versuchsauswertung

Während bei den in Abschnitt 4 besprochenen Vorversuchen die Auswertung ausschließlich von Hand vorgenommen wurde, bediente man sich zur Auswertung der Ergebnisse der Hauptversuche der im Hause verfügbaren **elektronischen Rechanlage**. Dies erwies sich als besonders vorteilhaft, da eine große Zahl von immer wiederkehrenden Ausrechnungen für eine große Anzahl von Versuchspunkten durchzuführen war.

Dabei wurde in der Weise vorgegangen, daß die in Form von Versuchsprotokollen vorliegenden Meßergebnisse auf Lochkarten gedruckt und diese anschließend verarbeitet wurden. Für jeden Versuchspunkt wurde ein Ergebnisblatt ausgedruckt, auf dem neben den wichtigsten Eingabedaten alle zur Zeichnung von Diagrammen benötigten Werte aufgeführt waren. Bei den Versuchen war es nicht immer möglich, nach einem strengen Versuchsplan vorzugehen. Aus diesem Grund wurde nach Vorliegen der Rechenergebnisse zunächst ein Belastungsdiagramm entworfen, welches über der Kesselbetriebszeit alle wichtigen Größen aufgezeichnet enthielt. Aus diesem Diagramm konnten dann die für andere grafische Darstellungen benötigten Werte entnommen werden.

## 6. ERGEBNIS DER HAUPTVERSUCHE MIT VERSCHIEDENEN KOHLENARTEN

### 6.1 Kesseluntersuchungen

#### 6.11 VERHALTEN DES KESSELS BEI DAUERBETRIEB

Als wesentliches Ergebnis gilt festzuhalten, daß der für die Kohlenstaubfeuerung weiterentwickelte FM-Kessel sich mit dem Rundbrenner im Dauerbetrieb einwandfrei fahren ließ. Wie in der Praxis üblich, wurden jeweils nach 8 Stunden Betriebszeit die Rußbläser in Betrieb gesetzt. Die Wirkung des Rußblasens ist in Abb. 24 wiedergegeben. Und zwar ist für die 4 Kohlenarten jeweils die Änderung der Abgastemperatur über der Betriebszeit aufgetragen. Wie man sieht, bestehen bei den einzelnen Kohlenarten Unterschiede zwischen maximaler und minimaler Abgastemperatur, jedoch war die Wirkung der Rußbläser ausreichend, um den Kessel bei Dauerbetrieb sauberzuhalten. Am schlechtesten verhielten sich die Kohlen Osterfeld und Concordia. Bei beiden liegt der Aschenerweichungspunkt im Bereich zwischen 1200 bis 1240°C und damit nach den Abb. 11 und 12 niedriger als bei den anderen Kohlenarten.

Vor Beginn und jeweils nach Abschluß der Dauerversuche mit einer Kohlenart wurde der Kessel befahren und der Brennkammerzustand fotografisch festgehalten.

Abbildung 25 a zeigt die Brennkammer im frisch ausgekleideten Zustand; b-e halten den Brennkammerzustand nach Abschluß der Versuche mit einer Kohlenart fest. Zwischen den einzelnen Versuchen wurde die Brennkammer gereinigt.

Bei den Versuchen mit Carborat (Kohlenstaub) zeigte sich, daß durch die ungleichmäßige Staubbührung über den Wiegebunker sowie durch die ungünstigen Brenneigenschaften des Brennstoffs die Kammer nach einem Versuchstag völlig verschlackt war. Da es auch durch Beaufschlagung des Bunkerauslaufs mit Preßluft (Fluidifizierung) nicht möglich war, den Staub gleichmäßig zuzuführen, wurden die Versuche mit Carborat eingestellt.

Zusammenfassend läßt sich also feststellen, daß sich die Verschmutzungsneigung des Kessels im Dauerbetrieb durch Einsetzen der Rußbläser in vollem Umfang beherrschen läßt.

#### 6.12 KESSELWIRKUNGSGRAD

Der Wirkungsgrad des Kessels wurde für die verschiedenen Kohlenarten bei unterschiedlicher Kesselast gemessen. Die Ergebnisse für die einzelnen Kohlenarten sind in Abb. 26 a-d enthalten. Wegen der Streuung der Meßergebnisse und der besseren Übersicht wegen, wurden diese getrennt aufgezeichnet. Einen Vergleich der Meßergebnisse gibt Abb. 27, danach liegt die Kohle der Zeche Osterfeld am günstigsten, während mit der Kohle der Zeche Concordia der schlechteste Wirkungsgrad zu erreichen war. An dieser Stelle sei bemerkt, daß es sich bei den hier angegebenen Wirkungsgraden um die tatsächlich am Kessel anfallenden handelt. Später wird auf den maximal erreichbaren Wirkungsgrad durch direkte Luftvorwärmung noch gesondert eingegangen.

Der maximale Wirkungsgrad bei Vollast liegt nach diesem Diagramm im Mittel bei etwa 80 bis 82 %. Für Nordstern-Kohle und Carborat wurde nur je ein Lastpunkt gefahren, der in Abb. 27 hervorgehoben wurde. Der mit Carborat zu erzielende Wirkungsgrad liegt nicht viel über 70 %. Bei den hier dargestellten Wirkungsgraden handelt es sich um die tatsächlich erzielten Wirkungsgrade. Der Streubereich der Kesselwirkungs-

grade ist in Abb. 28 im unteren Schraffurteil skizziert. Setzt man eine Absenkung der Abgastemperatur, wie sie beim Kesselbetrieb in der Praxis durch Einschaltung des Luftvorwärmers in den Rauchgasstrom zu erreichen ist, voraus, so ergibt sich der in Abb. 28 ebenfalls schraffierte Bereich. Hier liegen die maximalen Wirkungsgrade bei 88 %. Insgesamt kann das Verhalten des Kessels hinsichtlich der erreichten Wirkungsgrade als günstig bezeichnet werden.

### 6.13 RAUCHGASZUSAMMENSETZUNG

In Abb. 29 a-d sind die Ergebnisse für die einzelnen Kohlenarten getrennt aufgetragen. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse findet sich in Abb. 30. Der Kessel wurde im allgemeinen so gefahren, daß der Luftüberschuß möglichst gerade so gering gehalten wurde, daß keine Kesselverschmutzung eintrat. Die Grenzen dieses Bereichs sind in den für die einzelnen Kohlenarten angeführten Diagrammen enthalten. Naturgemäß nimmt mit abfallender Last der O<sub>2</sub>-Gehalt der Rauchgase stark zu, dementsprechend sinkt, wie in Abschnitt 6.12 ausgeführt wurde, auch der Wirkungsgrad des Kessels. Da bei dem erreichten maximalen Luftüberschuß im Dauerbetrieb die Kammer zu heiß wurde und zu Verschlackungen neigte, mußte die Luftmenge nach einiger Zeit erhöht werden. Für den Dauerbetrieb des Kessels läßt sich in etwa folgende Betriebsregel ableiten, daß ein Luftüberschuß von mindestens 20 — 25 % eingehalten werden muß. Aus Abb. 30 sind die oberen Grenzen für die 4 Kohlenarten abzulesen.

## 6.2 Eignung des Rundbrenners

### 6.21 REGELBEREICH DES RUNDBRENNERS

Das Regelverhalten des Rundbrenners ist erfahrungsgemäß stark von der Beschaffenheit der Kohle, insbesondere von deren Gehalt an flüchtigen Bestandteilen abhängig. Weiterhin ist die Vorwärmtemperatur der Verbrennungsluft von starkem Einfluß. Diese wurde bei den verwendeten Kohlenarten so eingestellt, wie sie im Kesselbau als günstige Erfahrungswerte vorliegen. In Abb. 31 sind die mit dem Rundbrenner zu erreichenden Regelbereiche als Funktion der flüchtigen Bestandteile der einzelnen Kohlenarten und mit der Lufttemperatur als Parameter aufgetragen. Man sieht, daß eine höhere Lufttemperatur prinzipiell einen größeren Regelbereich des Brenners zur Folge hat. Dieser nimmt ebenfalls mit dem Gehalt an Flüchtigen zu. Man sieht daraus, daß beispielsweise das Carborat mit einer Luftvorwärmtemperatur von 310°C schlechter liegt als z. B. die Lohberg-Kohle bei einer Vorwärmtemperatur von 140°C. Betrachtet man diese letztere Kohle, so sieht man, daß bei Verwendung von Verbrennungsluft mit Raumtemperatur der Regelbereich 1 : 2,7 beträgt, während er bei der Erhöhung der Verbrennungslufttemperatur auf 140°C auf 1 : 3,6 ansteigt. Aus diesem Diagramm lassen sich hinsichtlich der Eignung der Kohle für Kleinkessel wertvolle Schlüsse ziehen. Ein gutes Regelverhalten ist bei niederflüchtigen Kohlen nur mit entsprechend hohen Luftvorwärmtemperaturen zu erreichen. Aus diesem Grund kommen für die Verfeuerung in Kesseln dieser geringen Größe hauptsächlich höherflüchtige Kohlen in Frage. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse wären dafür z. B. die Kohlen der Zechen Osterfeld, Auguste Victoria und Lohberg geeignet.

Abb. 32 a-d gibt eine Aufstellung der Gesamtluftmenge, ihre Aufteilung auf die Primär-, Sekundär- und Tertiärluftmenge für die verschiedenen Kohlenarten in Abhängigkeit von der Kessellast. Die Abnahme der Primärluft beruht darauf, daß die Attritor-Mühle mit konstanter Luftmenge beaufschlagt werden muß. Dadurch sinkt bei steigender Kessellast ihr Anteil an der Gesamtluftmenge ab. Bei sehr schwacher Kessellast wurde bei der Concordia- und Osterfelder Kohle ein großer Teil der Verbrennungsluft als Primärluft zugeführt. Die Werte der Sekundär- und Tertiärluftmengen ergeben sich aus der jeweils eingestellten optimalen Flamme.

## 6.22 LASTABHÄNGIGE BELADUNG DES PRIMÄRLUFTSTROMS

Absolut betrachtet liegt die Beladung des Primärluftstroms mit Kohlenstaub bei allen Kohlenarten relativ niedrig. Dieses ist bedingt durch die für den Betrieb der Mühle erforderliche Mindestluftmenge. Die Streuung bei den einzelnen Kohlenarten ist relativ gering; insgesamt nimmt die Beladung bei einer Steigerung des Kohlendurchsatzes im Bereich 200 bis 700 kg/h von 100 auf 500 g/m<sup>3</sup> Luft zu, wie aus Abb. 33 a-e ersichtlich ist. Abb. 34 zeigt, daß ein unterschiedliches Verhalten der einzelnen Kohlenarten innerhalb des Fehlerstrebereichs nicht abgelesen werden kann.

## 6.23 LASTABHÄNGIGER EINSTELLBEREICH DES SEKUNDÄRLUFTDRALLS

Wie aus Abb. 8 zu ersehen ist, ist der Drall des Rundbrenners veränderlich. Um eine quantitative Aussage über die Einstellung der Drallschaufeln zu erhalten, wurde der gesamte Verstellbereich mit 100 % bezeichnet. Die Wirkung des Dralls besteht vor allem in einer Verkürzung der Flamme. Damit verbunden ist eine wesentlich bessere Flammenstabilität. Die Flamme liegt mehr am Brenner an und zündet stärker durch. Bei sehr intensivem Drall erfolgt eine zu starke Spreizung der Flamme, die sogar zu einem Anliegen an die Seiten- und Stirnwände des Kessels führen kann (Wandstrahleffekt). Dieses Umschlagen erfolgt plötzlich. Außerdem werden bei zu starkem Drall wesentlich mehr Kohleteilchen durch die erhöhten Zentrifugalkräfte an die Wände geschleudert. Deswegen wurde zur optimalen Brennereinstellung immer ein Kompromiß zwischen Kessellast und Dralleinstellung gewählt. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in Abb. 35 a-e aufgetragen. Daraus läßt sich ablesen, daß bei den Kohlen mit einem hohen Gehalt an Flüchtigen der Drall bei gegebener Last sehr weit zurückgenommen werden konnte. Bei den Kohlen mit wenig flüchtigen Bestandteilen ergab sich nur ein kleiner Einstellbereich für die Drallschaufeln. Dies geht besonders aus Abb. 35 e für die Verfeuerung von Carborat hervor. Die erhebliche Streuung der Punkte liegt einmal daran, daß die Einstellung des Dralls nach qualitativer Beurteilung erfolgt, zum anderen mußte während der ersten zwei Betriebstage, an denen die Kammer noch nicht genügend aufgeheizt war, ein schärferer Drall zu einer optimalen Flammeneinstellung gewählt werden.

## 6.3 Untersuchung der Attritor-Mühle

### 6.31 BETRIEBSVERHALTEN

Bei den Vorversuchen hatte sich gezeigt, daß es mit der vorhandenen Kohlenstaubzuführung über den Wiegebunker schwierig ist, eine gleichmäßige Brennkammerbeaufschlagung zu erreichen. Diese Schwierigkeiten entfielen sofort mit dem Einsatz der Attritor-Mühle.

Über die ganze Dauer des Versuchsbetriebs lief die Attritor-Mühle völlig einwandfrei. Für den praktischen Einsatz sollte jedoch unbedingt ein Magnetabscheider vorgesehen werden, um eine Beschädigung der Mühle im Betrieb zu verhindern. Der Druckgewinn am Mühlensichter belief sich auf etwa 150 mm WS, während der gesamte Druckabfall über die Mühle 200 mm WS betrug.

### 6.32 VERSCHLEISS

Die Attritor-Mühle zeigte nach einer Betriebszeit von 900 h einen überraschend geringen Verschleiß, der möglicherweise auf den großen Anteil der Prallzerkleinerung zurückzuführen ist. Abb. 36 zeigt anhand von zwei Fotografien die Abnutzung der Statorzapfen, die maximal 1/3 bis 1/4 des oberen Zapfenquerschnittes erfaßt hat. Innerhalb der Betriebszeit wurde keine Veränderung der Ausmahlung bei gleicher Kohle festgestellt, d.h. die Leistungsaufnahme blieb konstant. An den Gebläseradschaufeln war mit



dem Auge kein Verschleiß festzustellen. Das gleiche gilt für die Wellen. Aus dem oben diskutierten Zapfenabrieb läßt sich auf eine störungsfreie Laufzeit der Attritor-Mühle von etwa 8000 h schließen. Erst dann dürfte der Verschleiß den gesamten oberen Zapfenquerschnitt erfaßt haben.

### 6.33 SPEZIFISCHER ARBEITSBEDARF

In Abb. 37 a-d ist der spezifische Arbeitsbedarf der Attritor-Mühle über dem Mühlendurchsatz aufgetragen. Als Ergebnis stellt sich heraus, daß über den gefahrenen Lastbereich der Mühle zwischen 0,2 und 0,8 t/h der spezifische Arbeitsbedarf für die einzelnen Kohlenarten bei Maximallast auf die Hälfte absinkt. Das unterschiedliche Verhalten der einzelnen Kohlenarten ersieht man aus Abb. 38. Danach lassen sich bei gleichem Sichterzustand die Kohlen Osterfeld und Concordia am besten vermahlen. Aus Bild 37c entnimmt man auch die Zunahme des spezifischen Arbeitsbedarfs bei Erhöhung der Zahl der Flügelarme von 4 auf 6 bei der Osterfeld-Kohle. Bei den übrigen Kohlenarten zeigt sich kein Einfluß der Zahl der Flügelarme.

### 6.34 FEINHEIT DER AUSMAHLUNG

Einen Überblick über die Feinheit der Ausmahlung gibt folgende Tabelle, in der für die verschiedenen Kohlen der Rückstand auf dem 90- $\mu$ -Sieb und dazu die Hardgrove-Zahl und die Zahl der Flügelarme angegeben sind. Dabei überrascht, daß die härteste Kohle, nämlich die Lohberg-Kohle mit einer Hardgrove-Zahl von 51,6 einen geringeren Rückstand als die etwas weichere Kohle der Zeche Auguste Victoria ergibt. Nach der Tabelle scheint die Auguste-Victoria-Kohle härter zu sein. Ansonsten zeigt sich die Tendenz, daß die weicheren Kohlen einen geringeren Rückstand aufweisen.

Feinheit der Ausmahlung bei verschiedenen Kohlenarten

Kohlenart (Zeche)	Zahl der Sichterflügelarme	Hardgrovezahl	Rückstand auf 90- $\mu$ -Sieb
Lohberg	4	51,6	10 %
Auguste Victoria	4 und 6	65,4	18 %
Osterfeld	4 und 6	99	8 %
Concordia	4 und 6	105	4 %

### 6.35 SCHLUSSFOLGERUNG

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Attritor-Mühle für den Einsatz an Kesseln dieser Größe gut geeignet ist. Ihr Vorteil sind der ruhige Lauf, der geringe Verschleiß und die Störungsfreiheit. Nachteilig sind der hohe spezifische Arbeitsbedarf und die Wasserkühlung der Lager.

## 6.4 Überprüfung der Entstaubungsanlagen

### 6.41 FÜLLKÖRPERFILTER

Das Füllkörperfilter der Firma Lühr wurde in seiner Wirkungsweise bereits in Abschnitt 2.51 beschrieben. Nach kurzer Betriebszeit des Filters stellte sich heraus, daß es für die Abscheidung der Feststoffteilchen aus dem Rauchgasstrom ungeeignet ist.

Der Entstaubungsgrad, der als das Verhältnis des Reingas-Staubgehalts zum Rohgas-Staubgehalt definiert ist, betrug nur etwa 50 %. Abb. 39 zeigt die Körnungskennlinien des im Rauchgasstrom enthaltenen Flugstaubs vor (Rohgasstaub) und nach (Reingasstaub) Passieren des Filters. Daraus ist sofort zu entnehmen, daß keine Fraktionsabscheidung erfolgt.

Das ungünstige Entstaubungsverhältnis wurde bei dem relativ hohen Druckverlust, je nach Kessellast und Staubbelastung des Rohgases, von 150 bis 250 mm WS erzielt. Jeweils nach der pneumatischen Reinigung des Filters wurde der Druckabfall vermindert, dieser stieg aber mit der Zeit wieder an. Verbesserungsmaßnahmen, die in Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma durchgeführt wurden, hatten nicht das erhoffte Ergebnis. Aus diesem Grund wurden die Versuche mit dem Füllkörperfilter abgebrochen.

#### 6.42 DREHSTRÖMUNGSENTSTAUBER

Der in Abschnitt 2.52 beschriebene Drehströmungsentstauber der Firma Schüchtermann-Kremer-Baum zeigte hinsichtlich der Staubabscheidung ein wesentlich besseres Ergebnis als das Füllkörperfilter. Da die Leistung des Drehströmungsentstaubers mit  $1000 \text{ Nm}^3$  für die gesamte Rohgasmenge nicht ausreichte, wurde nur ein Teilstrom durch die Anlage geleitet. Wegen der winklig zum Rauchgasrohr angeordneten Rohrabzweigung ist möglicherweise die Körnung des Teilstroms feiner als jene des Hauptstroms.

Die Körnungskennlinie des den Drehströmungsentstauber passierenden Rohgasstaubs zeigt Abb. 40. Es wurden mehrere Versuche mit unterschiedlicher Rohgasbelastung ( $3,4$  und  $5 \text{ g/Nm}^3$ ) durchgeführt. Dabei wurde im Mittel ein Abscheidegrad von  $\eta = 96,6 \%$  erzielt. Schwierigkeiten treten nur bei Stäuben mit einer Körnung größer als  $6 \mu$  auf. Im Korngrößenbereich von  $6 - 40 \mu$  findet Teilentstaubung statt.

Der gesamte Druckverlust hat etwa die Höhe wie beim Füllkörperfilter und beträgt rd. 150 mm WS. Der Nachteil des Filters dürfte in der zum Betrieb notwendigen Frischluftmenge liegen, was einen Saugzug mit der zweifachen Normalleistung erforderlich macht.

#### 6.43 GESAMTBEURTEILUNG

Für die Entstaubung des Rauchgases ist das Füllkörperfilter der Firma Lühr wegen des schlechten Entstaubungsgrads bei gleichzeitig hohem Druckverlust für den vorliegenden Zweck ungeeignet.

Hingegen weist der Drehströmungsentstauber bei einem ähnlich hohen Druckverlust einen Entstaubungsgrad von 96 - 97% auf. Der Nachteil des Filters liegt in der großen zum Betrieb benötigten Frischluftmenge, die einen doppelt so groß wie normal auszulegenden Saugzug notwendig macht.

### 7. FOLGERUNGEN AUS DEN ERGEBNISSEN DER HAUPTVERSUCHE

Die Dauerversuche mit dem kohlenstaubgefeuerten FM-Kessel in Verbindung mit dem verwendeten Rundbrenner zeigten insgesamt befriedigende Ergebnisse. Folgende positiven Merkmale können bei der Beurteilung der Kesselanlage herausgestellt werden:

- a) Bei den gefahrenen Lastpunkten traten unabhängig von der Kohlenart, Carborat ausgenommen, bei den Kurzzeitversuchen in der Brennkammer oder in den Berührungsheizflächen keine Verschmutzungen auf, die nicht durch Rußbläser leicht beseitigt werden konnten.

- b) Aus diesem Grund können die Trichter I und II, vielleicht auch Trichter III, geschlossen werden. Der Kessel wird durch diese Maßnahme wesentlich vereinfacht, da der Flugstaubanfall im 1. Zug durch eine einfache Blaseeinrichtung hochgewirbelt und mit den Rauchgasen aus dem Kessel entfernt wird.
- c) Die Versuche zeigten, daß der Brenner leicht zu bedienen und die für jede Kohlenart optimale Brenneinstellung mit wenigen Handgriffen leicht vorzunehmen ist.
- d) Der maximal zugelassene Wert des Feuerungsverlusts von 4 % wurde auch bei Einsatz der niederflüchtigen Kohlen nicht überschritten.
- e) Die Attritor-Mühle erwies sich für den vorliegenden Kessel als gut geeignet. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß eine störungsfreie Betriebszeit von mindestens 8000 h zu erwarten ist. Nachteilig ist der hohe spezifische Arbeitsbedarf.
- f) Von den untersuchten Filteranlagen erwies sich das Lühr-Filter wegen seines zu niedrigen Entstaubungsgrads als ungeeignet. Der Drehströmungsentstauber (Schüchtermann-Kremer-Baum) hingegen hatte bei einem relativ hohen Druckverlust von etwa 150 mm WS einen guten Entstaubungsgrad von 96 - 97 %. Ungünstig ist der große Frischluftbedarf zum Betrieb des Drehströmungsentstaubers, der eine Auslegung des Saugzugebläses in doppelter Größe wie normal erfordert.

## **8. ZUSAMMENFASSUNG**

Der vorliegende Bericht enthält die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse, die bei der Untersuchung des kohlenstaubgefeuerten Babcock-Integral-Kessels, Typ FM, gewonnen wurden. Nachdem anhand von Vorversuchen als geeigneter Brenner der Rundbrenner ermittelt worden war, wurden in jeweils zweiwöchigen Dauerversuchen das Verhalten des Kessels insgesamt, d.h. Wirkungsgrad, Verschmutzungsneigung bei verschiedenen Kohlenarten, usw., überprüft. Dabei wurde auch die Eignung der Mahlanlage und der eingesetzten Entstaubungsanlage untersucht. Das Ergebnis der einzelnen Versuchsreihen wurde bereits in den entsprechenden Abschnitten ausführlich mitgeteilt. Der Gesamteindruck der Ergebnisse ist, daß sich die verschiedenen Kohlenarten in einem weiten Bereich flüchtiger Bestandteile und in einem befriedigenden Regelbereich des Rundbrenners am Versuchskessel verbrennen ließen. Dieser kann damit für den gewünschten Zweck als gut geeignet bezeichnet werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurden ebenfalls eine brauchbare Mühle mit geringem Verschleiß und eine Entstaubungsanlage mit hohem Entstaubungswirkungsgrad gefunden.

## ANLAGE

### Verzeichnis der Abbildungen

- 1 — Zeichnung des Versuchskessels
- 2 — Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus
- 3 — Meßstellenplan der Versuchsanlage
- 4 — Einrichtung zur Entaschung des Versuchskessels
- 5 — Schnittzeichnung der Attritor-Mühle
- 6 — Lage der Tertiärluftdüsen über den Feuerraumquerschnitt (insgesamt 3 Ebenen)
- 7 — Aufbau des Rotationsbrenners
- 8 a — Schnittzeichnung des Rundbrenners
- 8 b — Detailzeichnung des Kohlenstaubverteilers
- 9 — Schnitt durch das Lühr-Füllkörperfilter, Verdeutlichung der Wirkungsweise
- 10 — Aufbau des Drehströmungsentstaubers
- 11 — Eigenschaften der verfeuerten Kohlenarten und deren Aschen
- 12 — Graphische Darstellung wichtiger Eigenschaften von Kohlen und Aschen
- 13 — Untersuchte konstruktive Ausführungen des Rotationsbrenners
- 14 — Ausbrand, Regelverhalten, Flammenlänge und CO<sub>2</sub>-Gehalt an der CO-Grenze als Funktion des Kegelwinkels
- 15 — Qualitativer Strömungsverlauf bei den untersuchten Brennerausführungen
- 16 — Vergleich zwischen der Kohlenstaubzuführung am Rotationsbrenner, Ausführung 3, und am Rundbrenner
- 17 — Untersuchte Ausführungen des Rundbrenners
- 18 — Drallwinkel (Abb. 19) als Funktion der Drallklappenstellung (oben) und Druckverlust des Brennergesschränks für verschiedene Drallklappenstellungen als Funktion des Luftdurchsatzes (unten)
- 19 — Zur Definition des Drallwinkels
- 20 — Einfluß der Drallklappenstellung auf die Stabilitätsgrenze (Regelbereich) als Funktion des Kohlendurchsatzes bei Anordnung 3
- 21 — Feuerungsverlust, CO<sub>2</sub>-Gehalt an der CO-Grenze, axiale Komponente der Sekundärluftgeschwindigkeit und Flammenlänge als Funktion des Brennstoffdurchsatzes
- 22 — Feuerraumendtemperatur bei verschiedenen Brennkammerauskleidungen als Funktion des Brennstoffdurchsatzes
- 23 — Aufteilung des Flugstaubs auf Aschetrichter und Zyklon
- 24 — Anstieg der Abgastemperatur über der Kesselbetriebszeit bei verschiedenen Kohlenarten. Wirkung der Rußbläser

- 25 a-e — Aussehen des Feuerraums vor Beginn und nach Abschluß der Versuche mit 4 Kohlenarten: Lohberg, Auguste Victoria, Osterfeld, Concordia
- 26 a-d — Kesselwirkungsgrad als Funktion des Brennstoffdurchsatzes: Lohberg, Auguste Victoria, Osterfeld, Concordia
- 27 — Zusammenstellung der Wirkungsgrade bei den einzelnen Kohlenarten einschließlich Nordstern-Kohle und Carborat
- 28 — Streubereich der tatsächlichen (fremdbeheizter Luvo) und erreichbaren Kesselwirkungsgrade
- 29 a-d — CO<sub>2</sub>-Gehalt und Luftüberschuß bei optimaler Brennereinstellung als Funktion des Brennstoffdurchsatzes: Lohberg, Auguste Victoria, Osterfeld, Concordia
- 30 — CO<sub>2</sub>-Gehalt und Luftüberschuß bei optimaler Brennereinstellung als Funktion des Brennstoffdurchsatzes. Zusammenstellung der Ergebnisse
- 31 — Regelbereich des Rundbrenners mit verschiedenen Kohlenarten als Funktion der flüchtigen Bestandteile bei unterschiedlichen Luftvorwärmtemperaturen
- 32 a-d — Aufstellung der Gesamtluftmenge und ihre Aufteilung auf Primär-, Sekundär- und Tertiärluftmenge bei unterschiedlichen Luftzahlen als Funktion vom Brennstoffdurchsatz: Lohberg, Auguste Victoria, Osterfeld, Concordia
- 33 a-e — Kohlenstaubbelastung des Primärluftstroms als Funktion der Kessellast : Lohberg, Auguste Victoria, Osterfeld, Concordia, Carborat
- 34 — Kohlenstaubbelastung bei den einzelnen Kohlenarten. Zusammenstellung der Ergebnisse
- 35 a-e — Dralleinstellbereich des Rundbrenners bei den verschiedenen Kohlenarten als Funktion des Brennstoffdurchsatzes : Lohberg, Auguste Victoria, Osterfeld, Concordia, Carborat
- 36 — Verschleiß der Attritor-Mühle nach 800 Betriebsstunden. Fotografie der Statorzapfen
- 37 a-d — Spezifischer Arbeitsbedarf der Attritor-Mühle als Funktion des Brennstoffdurchsatzes : Lohberg, Auguste Victoria, Osterfeld, Concordia
- 38 — Vergleich des spezifischen Arbeitsbedarfs der Attritor-Mühle bei verschiedenen Kohlenarten
- 39 — Körnungskennlinien des Flugstaubs vor (Rohgasstaub) und nach (Reingasstaub) Passieren des Lühr-Filters
- 40 — Körnungskennlinien des in den Drehströmungsentstauber gelangenden Rohgasstaubs

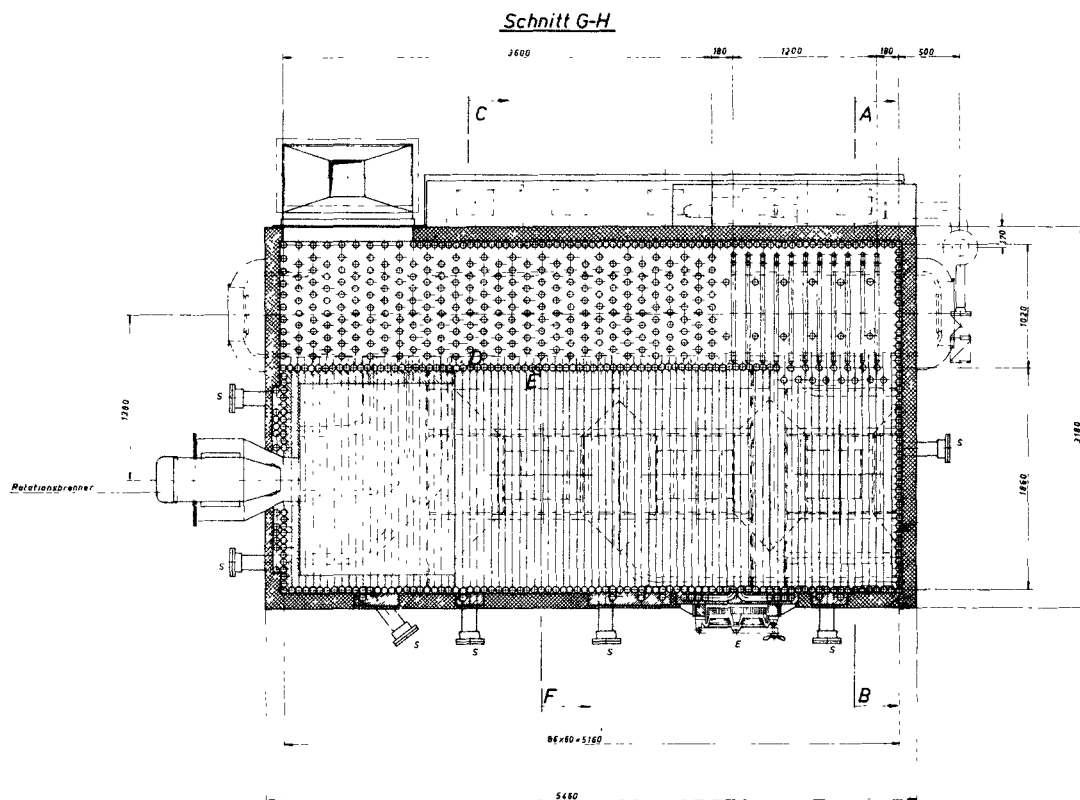
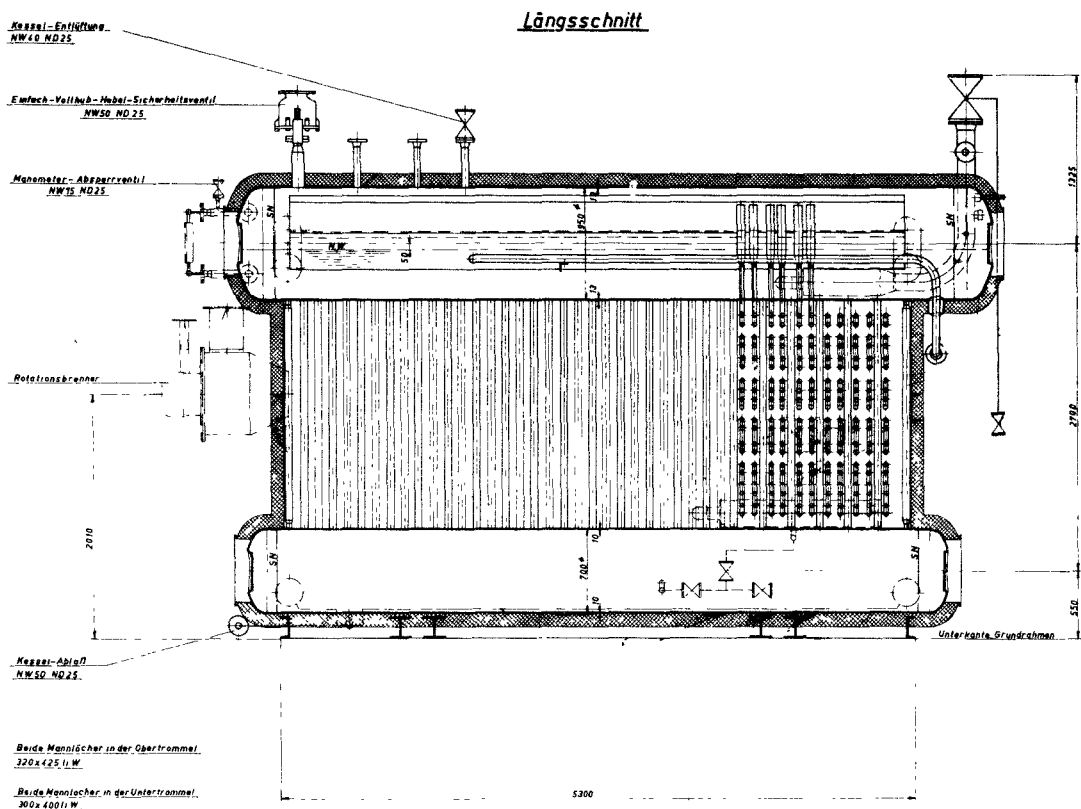
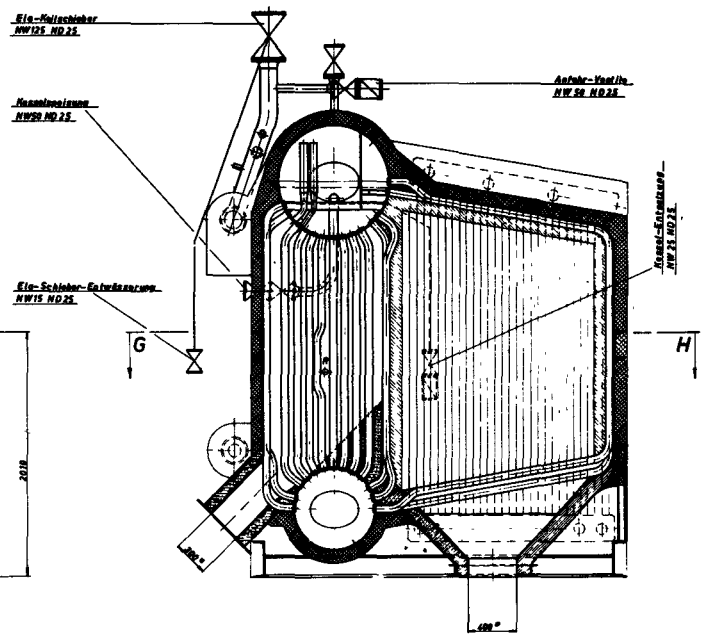
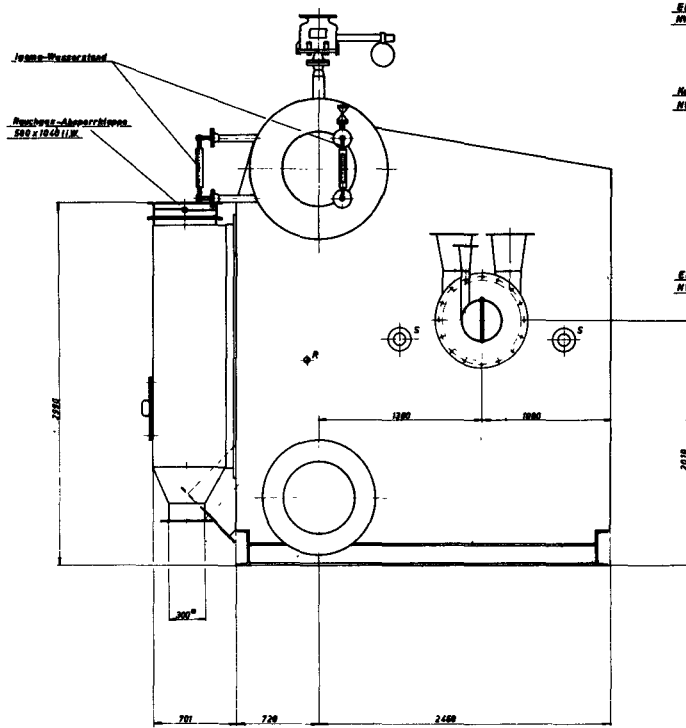


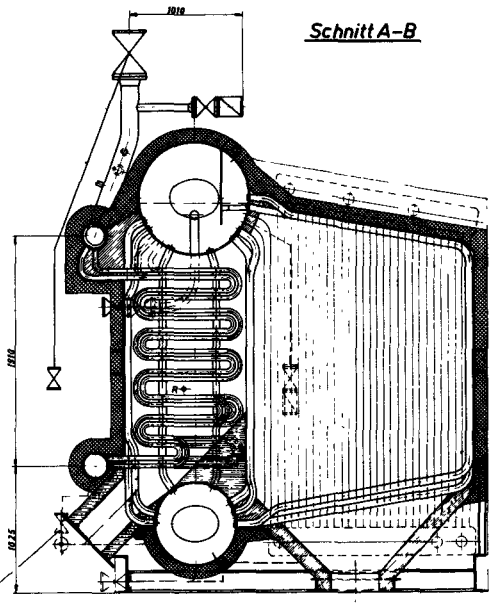
Abb. 1 : Zeichnung des Versuchskessels

Vorderansicht

Schnitt C-F



Schnitt A-B



- NW = Niedrigster Wasserstand
- SH = Schweißnaht
- E = Einsteigeturm
- S = Scheitelle
- R = Aufbläser

NW - Fall-Wasserstand  
NW 22, HD 22



Abb. 1 : Zeichnung des Versuchskessels

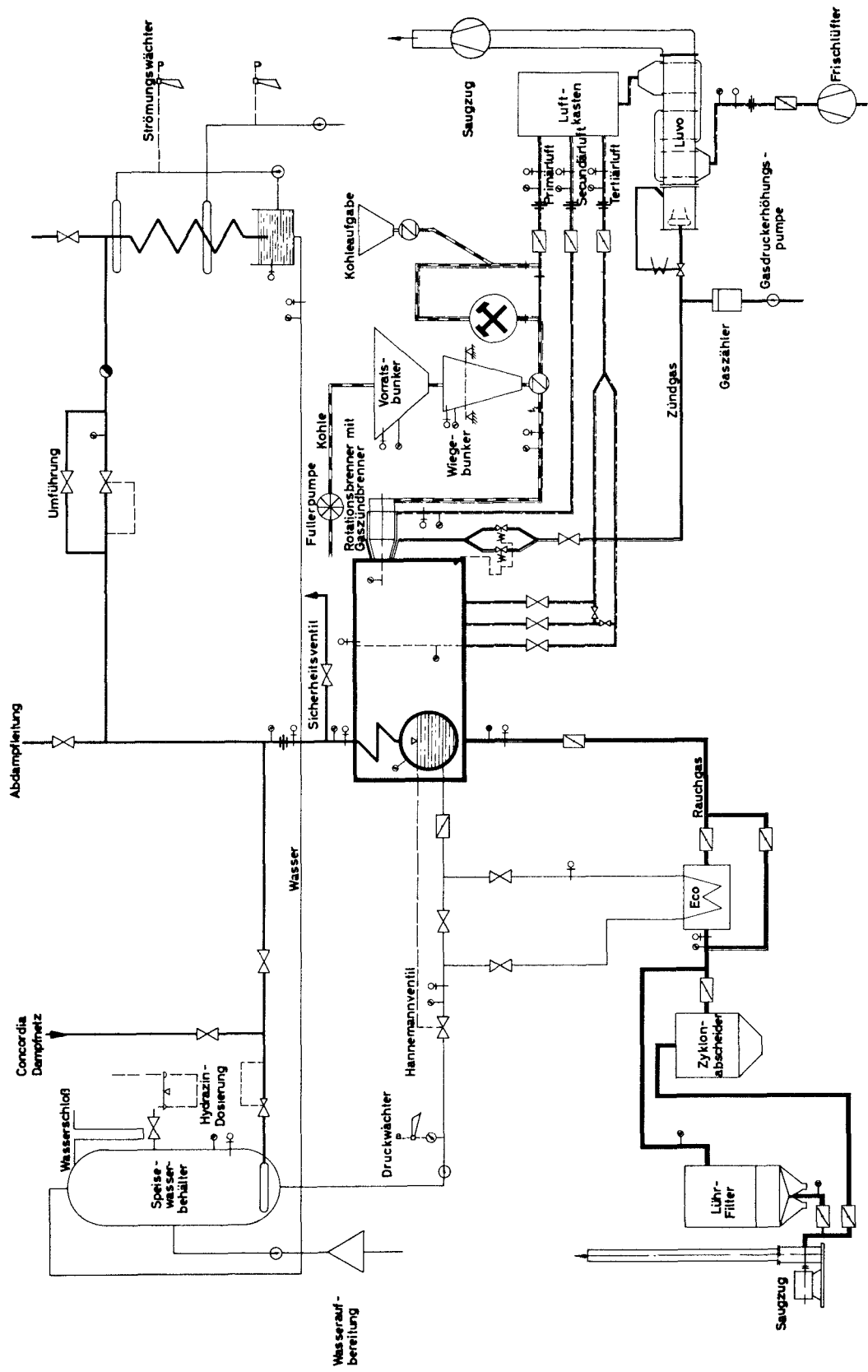
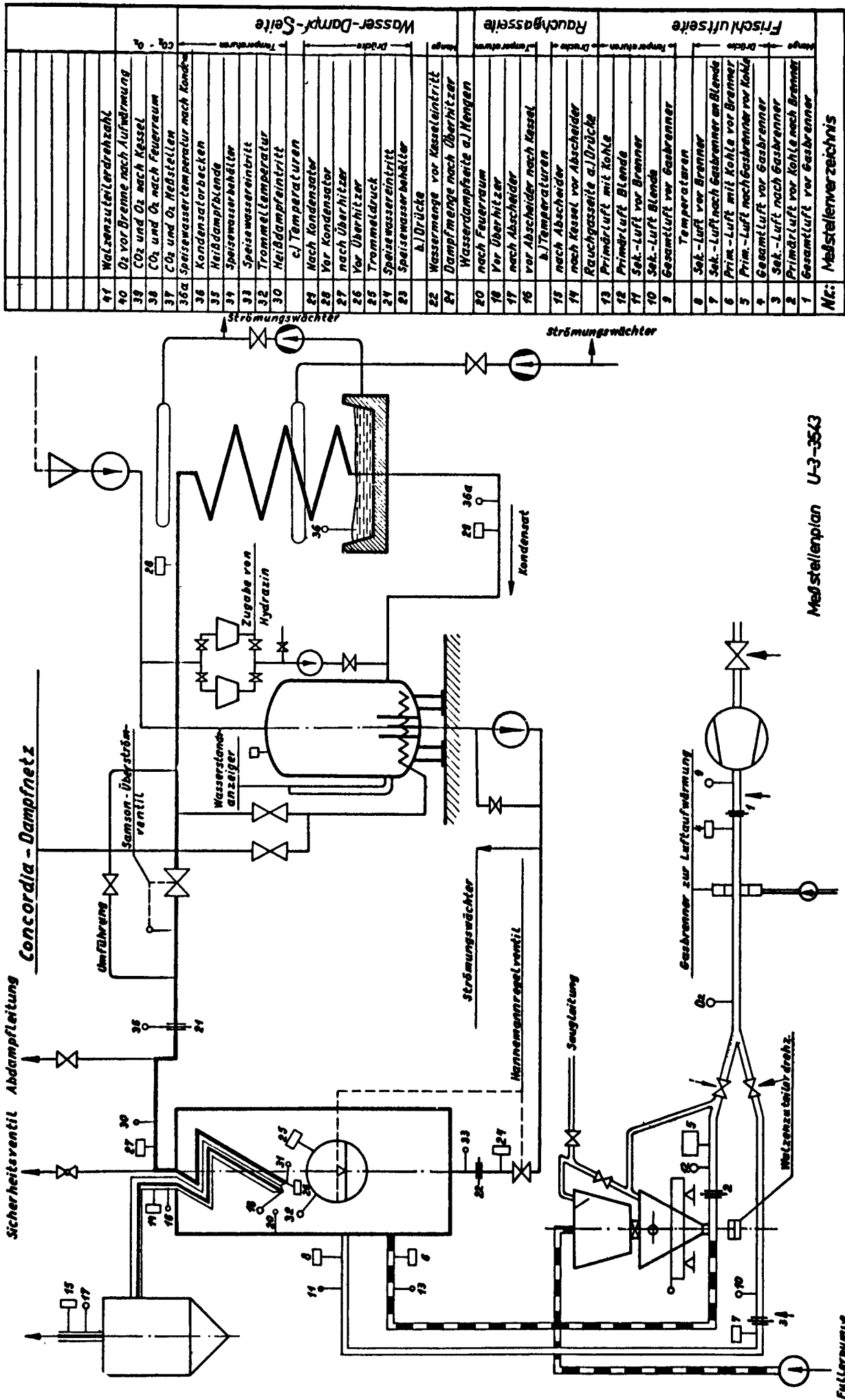


Abb. 2 : Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus





Meßstellenplan U-3-3543

Abb. 3 : Meßstellenplan der Versuchsanlage

Nr.	Beschreibung	Frischlufserie		Rauchgasserie		Wasser-Dampf-Serie	
		Druck	Temperatur	Druck	Temperatur	Druck	Temperatur
41	Walzenzählerdrehzahl						
40	O <sub>2</sub> vor Brenne nach Aufwärmung						
39	CO <sub>2</sub> und O <sub>2</sub> nach Kessel						
38	CO <sub>2</sub> und O <sub>2</sub> nach Feuerraum						
37	CO <sub>2</sub> und O <sub>2</sub> Meßstellen						
36a	Speisewassertemperatur nach Kondensator						
36	Kondensatorbecken						
35	Heißdampfblende						
34	Speisewasserbehälter						
33	Speisewassereintritt						
32	Trommeltemperatur						
30	Heißdampfneintritt						
	c) Temperaturen						
29	Nach Kondensator						
28	Vor Kondensator						
27	nach Überhitzer						
26	Vor Überhitzer						
25	Trommeldruck						
24	Speisewassereintritt						
23	Speisewasserbehälter						
	b) Drücke						
22	Wassermenge vor Kesselneintritt						
24	Dampfmenge nach Überhitzer						
	Wasserdampfseite a) Mengen						
20	nach Feuerraum						
18	Vor Überhitzer						
17	nach Abscheider						
16	vor Abscheider nach Kessel						
	b) Temperaturen						
15	nach Abscheider						
14	nach Kessel vor Abscheider						
	Rauchgasseite a) Drücke						
13	Primärluft mit Kohle						
12	Primärluft Blende						
11	Sek.-Luft vor Brenner						
10	Sek.-Luft Blende						
9	Gesamtluft vor Gasbrenner						
	Temperaturen						
8	Sek.-Luft vor Brenner						
7	Sek.-Luft nach Gasbrenner an Blende						
6	Prim.-Luft mit Kohle vor Brenner						
5	Prim.-Luft nach Gasbrenner vor Kohle						
4	Gesamtluft vor Gasbrenner						
3	Sek.-Luft nach Gasbrenner						
2	Primärluft vor Kohle nach Brenner						
1	Gesamtluft vor Gasbrenner						
Nr.	Meßstellenverzeichnis						

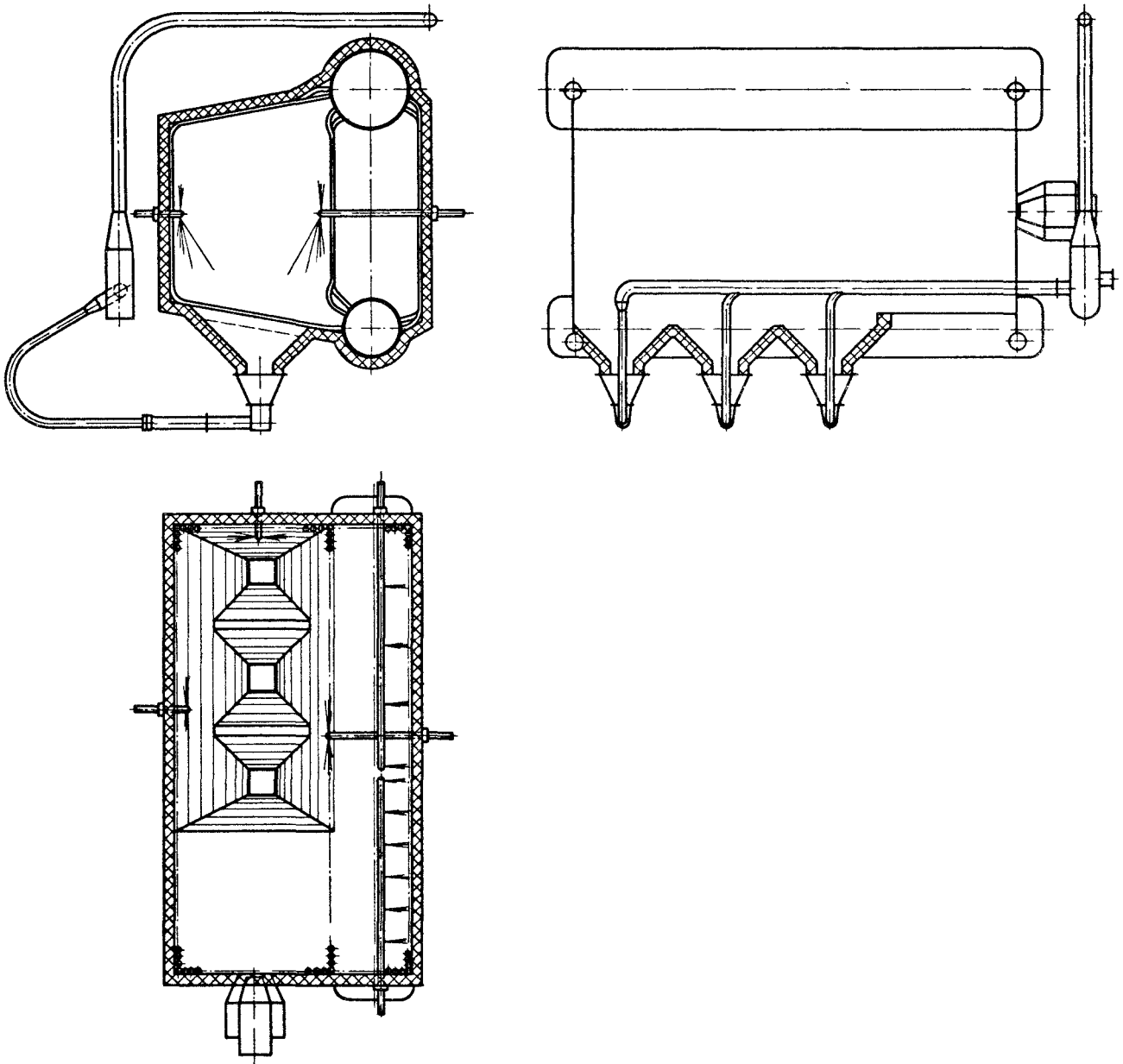


Abb. 4 : Einrichtung zur Entaschung des Versuchskessels

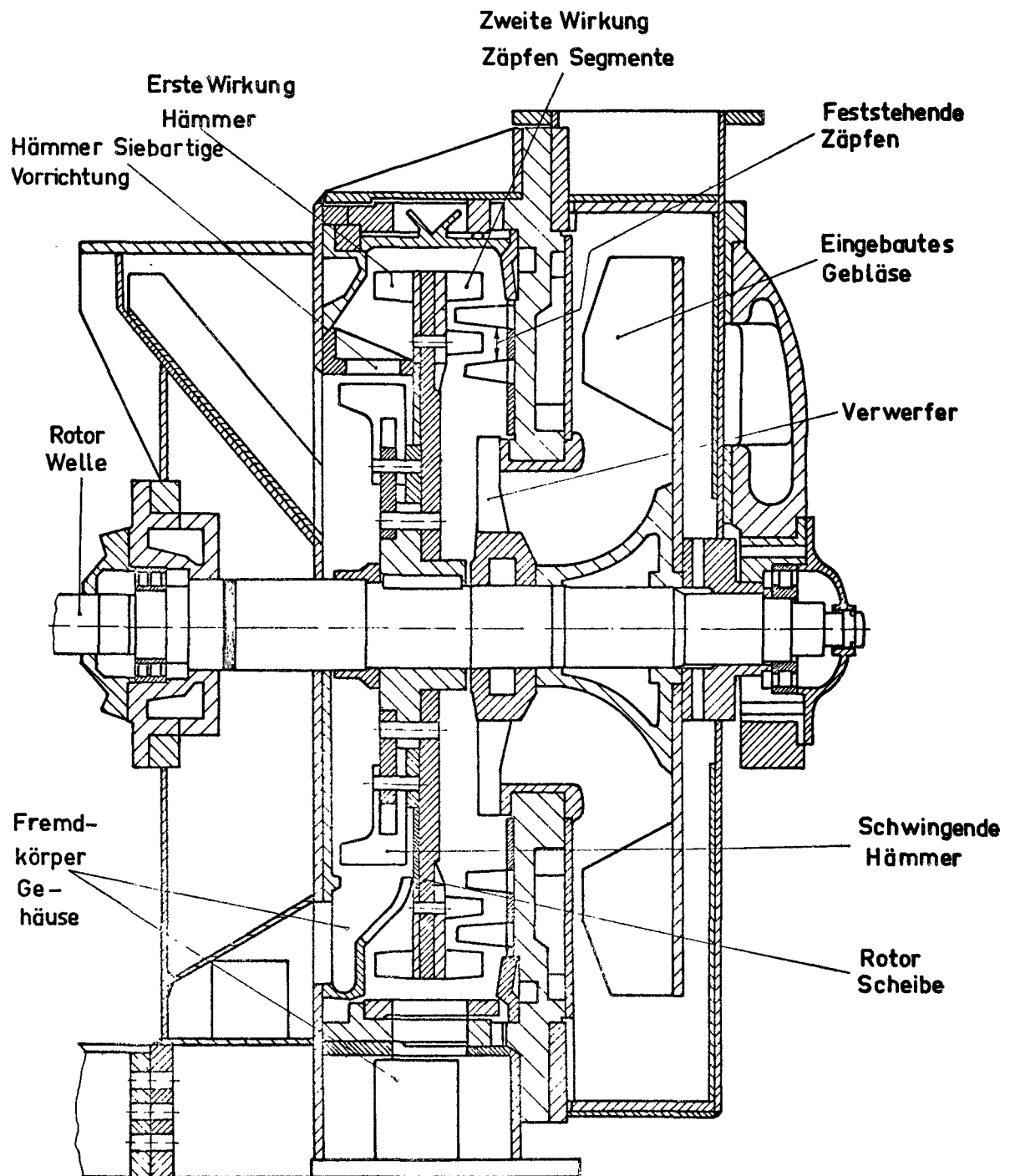


Abb. 5 : Schnittzeichnung der Attritor-Mühle

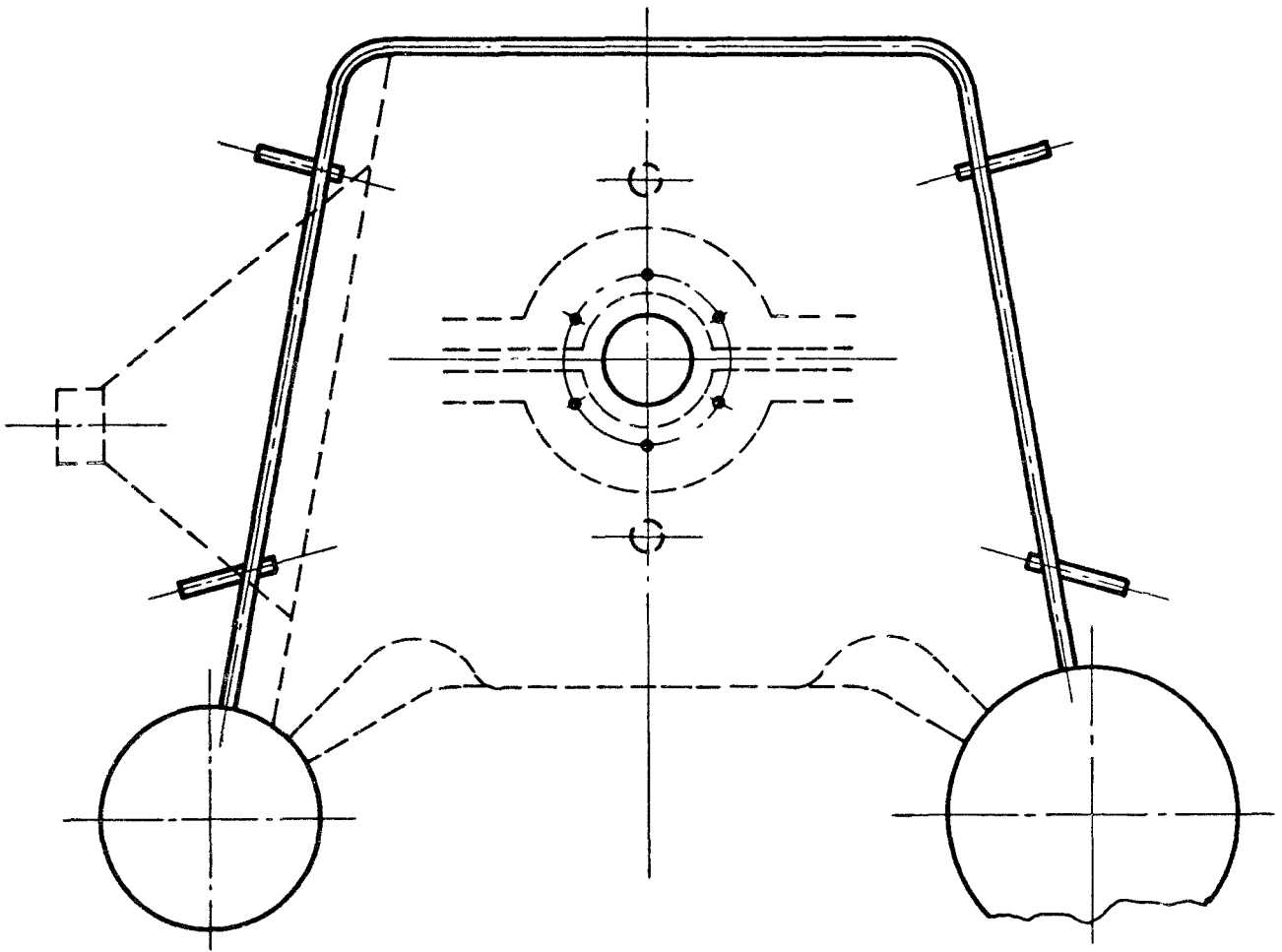


Abb. 6 : Lage der Tertiärluftdüsen über den Feuerraumquerschnitt (insgesamt 3 Ebenen)

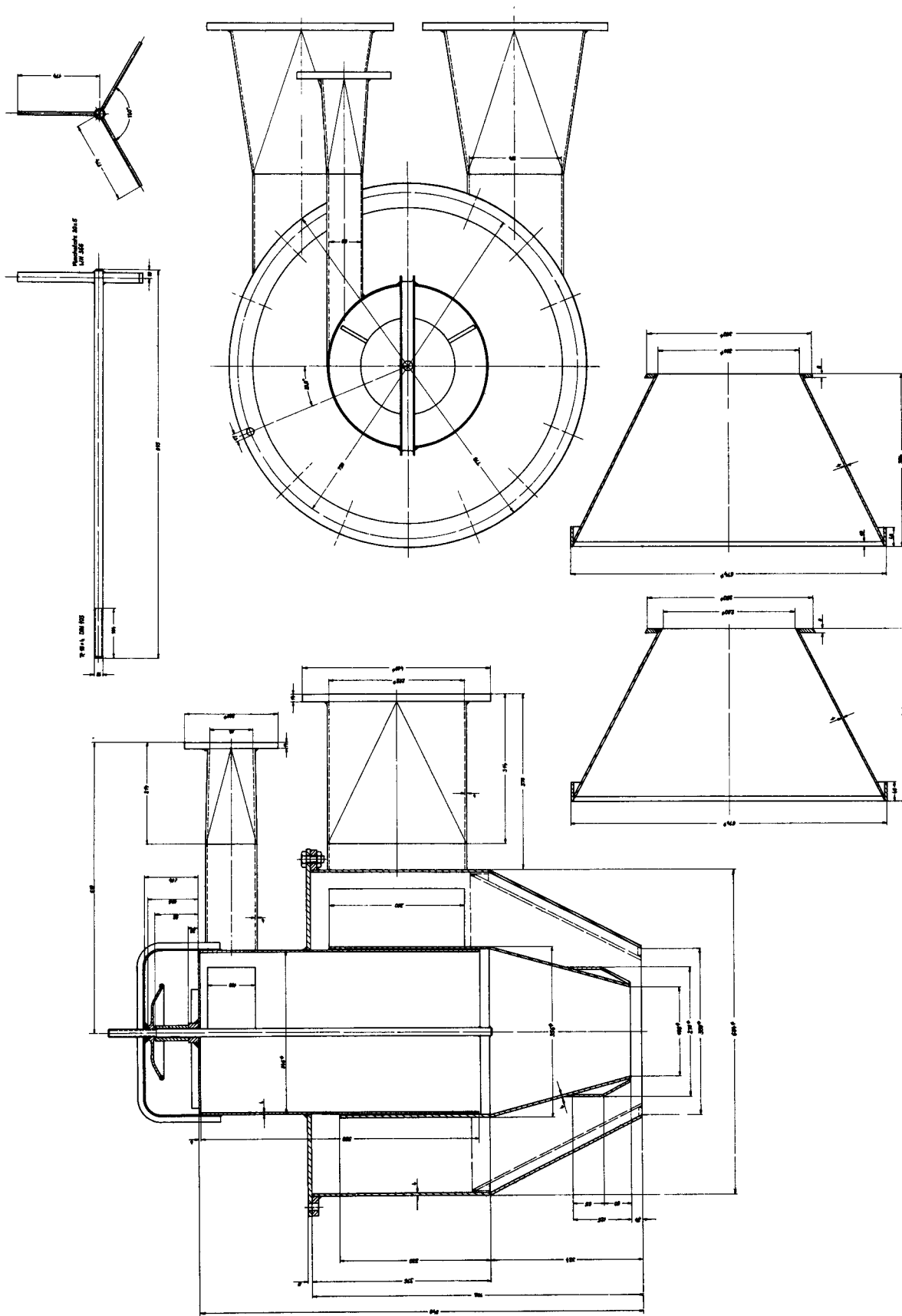


Abb. 7 : Aufbau des Rotationsbrenners

Schnitt A-B Schnitt C-D

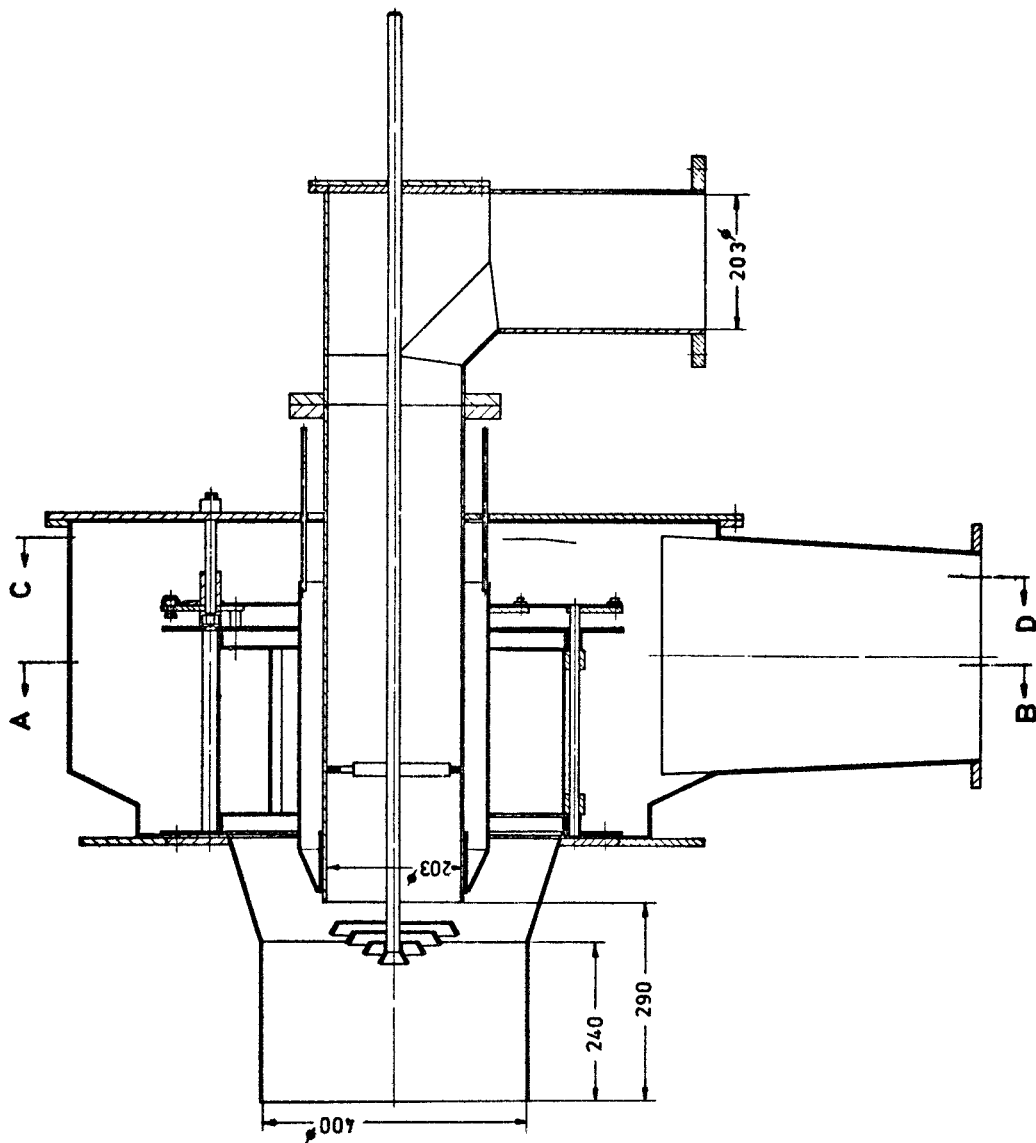
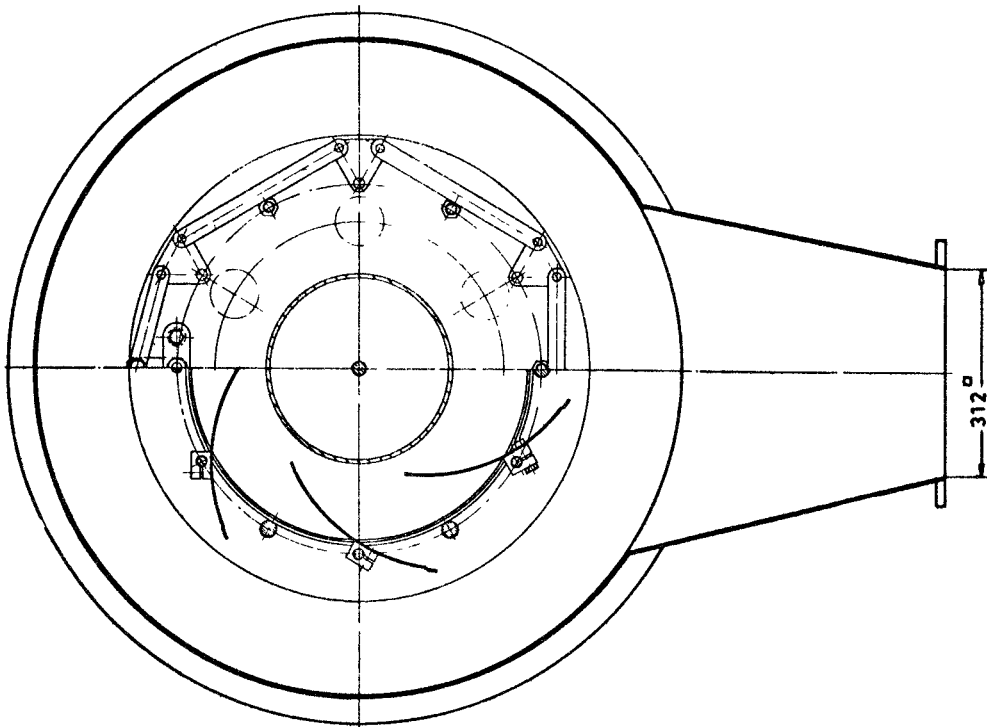


Abb. 8 a : Schnittzeichnung des Rundbrenners

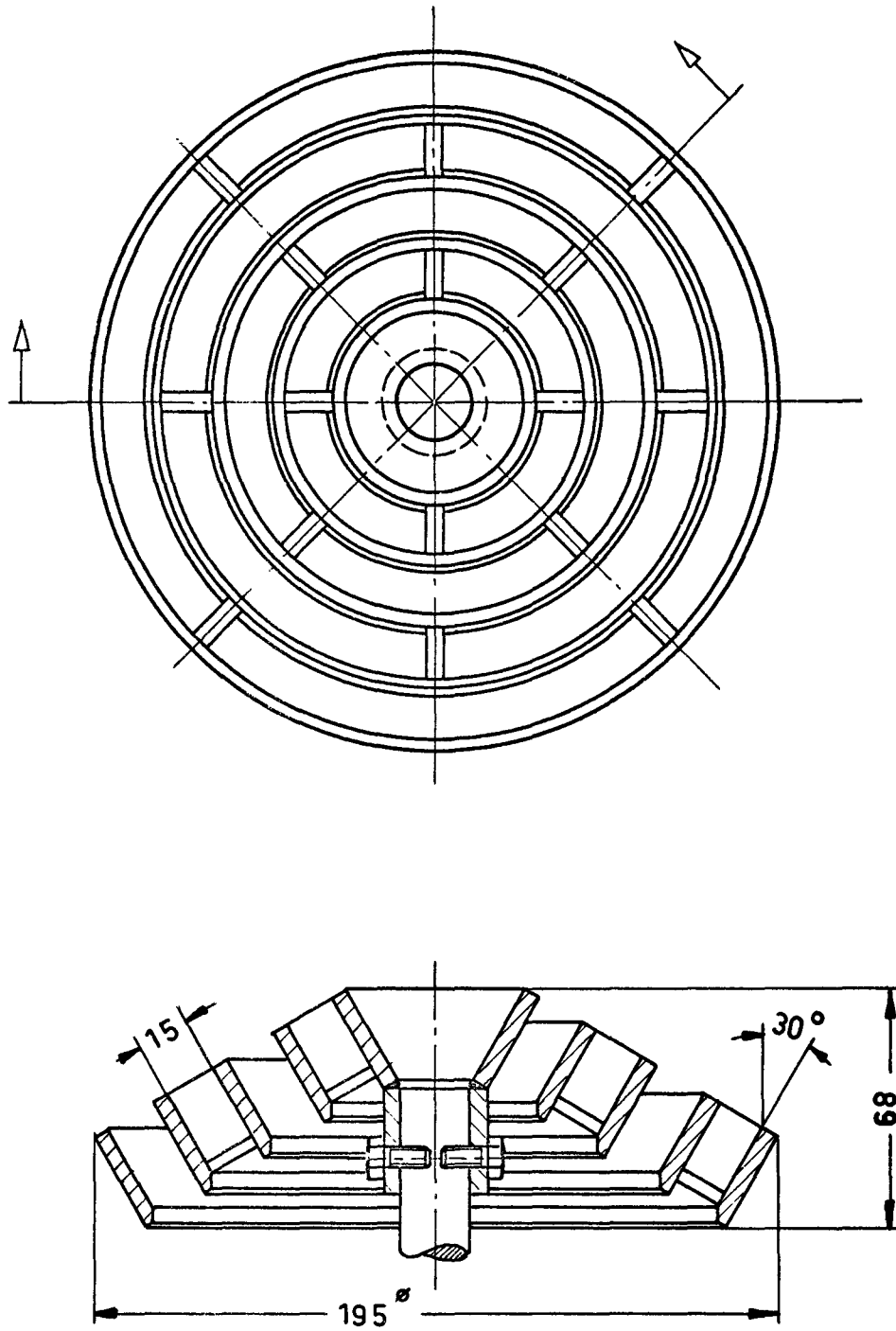


Abb. 8 b : Detailzeichnung des Kohlenstaubverteilers

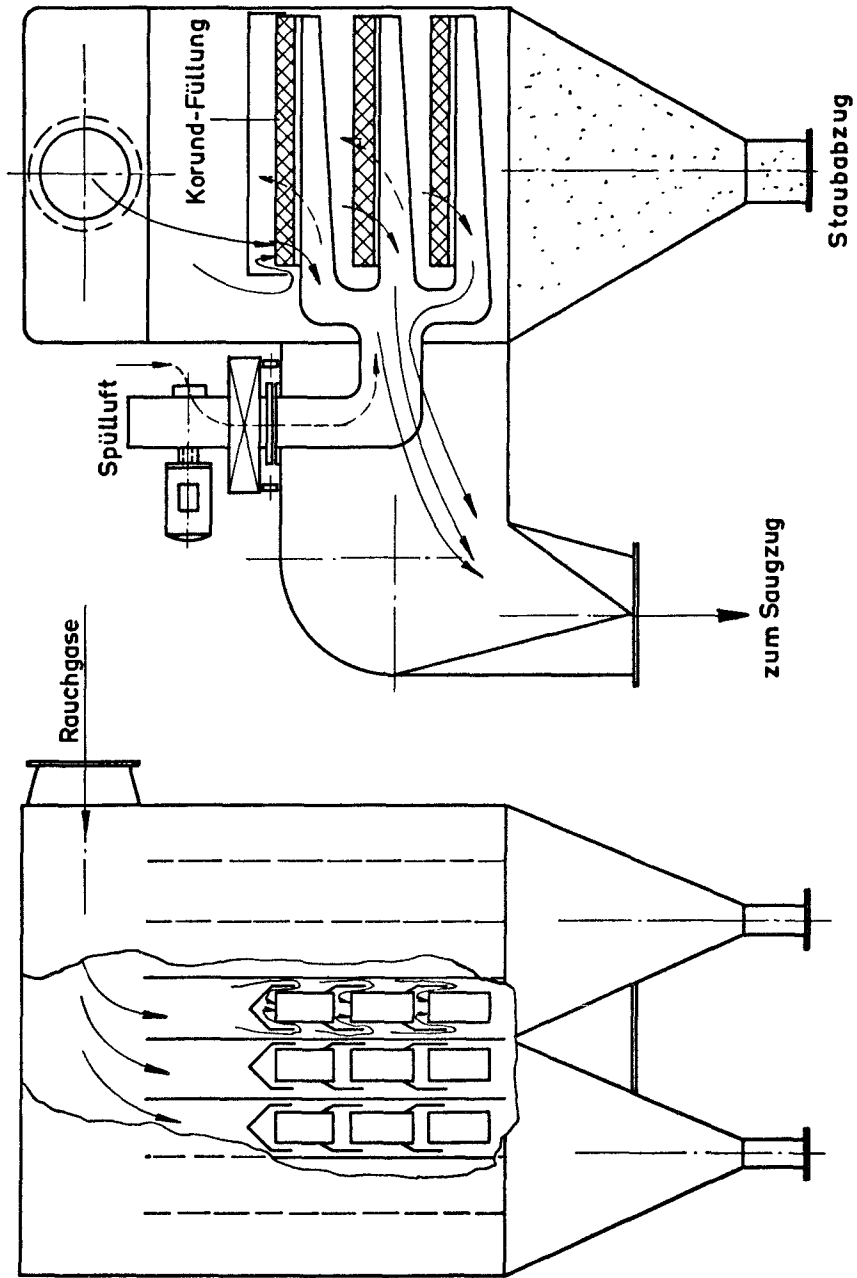


Abb. 9 : Schnitt durch das Lühr-Füllkörperfilter, Verdeutlichung der Wirkungsweise



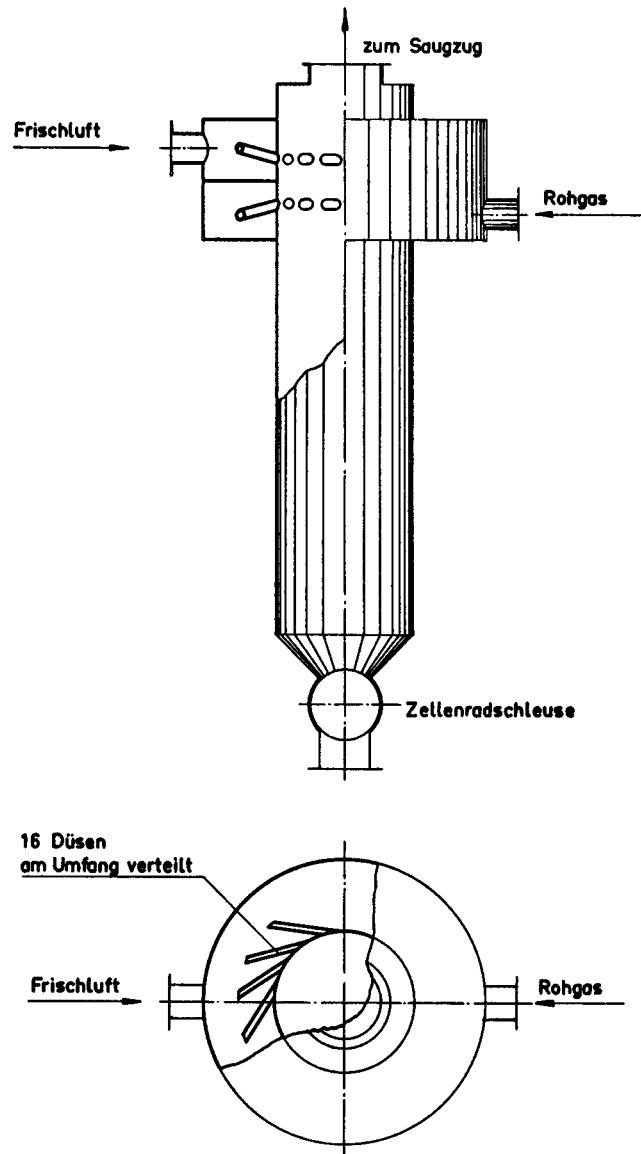


Abb. 10 : Aufbau des Drehströmungsentstaubers

## Eigenschaft der Kohle

Zeche	Art	Sorte	Wasser	Asche	fl. Best.	Heizwert
			%			H <sub>u</sub>
			i. roh	i. roh	i. waf	kcal/kg i. roh
Lohberg	Gasflamm	Feinkohle	9,0- 9,5	4,5- 5,5	35,0- 36,0	6830- 6950
Auguste Viktoria	Gaskohle	"	9,0- 9,5	6,0- 7,0	33,5- 35,0	6790- 6920
Osterfeld	Fettkohle	"	8,5- 9,5	5,5- 6,5	24,5- 25,5	6995- 7165
Concordia 4/4	"	"	6,5- 7,0	5,0- 6,0	19,5- 20,5	7280- 7420
Carboral	Mager	Staub	0,1	18,0 20,0	8,8	6720

## Eigenschaft der Asche

Zeche	Art	Sorte	Ascheschmelzverhalten					
			schw. red. Atmosph.			oxyd. Atmosph.		
			Erw.P.	Schm.P.	FL. P.	Erw.P.	Schm.P.	FL. P.
Lohberg	Gasflamm	Feinkohle	1140- 1170	1250- 1320	1360- 1430	1240- 1280	1340- 1360	1380- 1400
Auguste Viktoria	Gaskohle	"	1150- 1180	1500	1500	1290- 1360	1500	1500
Osterfeld	Fettkohle	"	1100- 1130	1370- 1420	1500	1200- 1230	1460- 1490	1480- 1500
Concordia 4/4	"	"	1100- 1130	1340- 1370	1430- 1550	1200- 1240	1430- 1470	1440- 1480
Carboral	Mager	Staub	1080	1290	1180	1180	1330	1400

Abb. 11 : Eigenschaften der verfeuerten Kohlenarten und deren Aschen

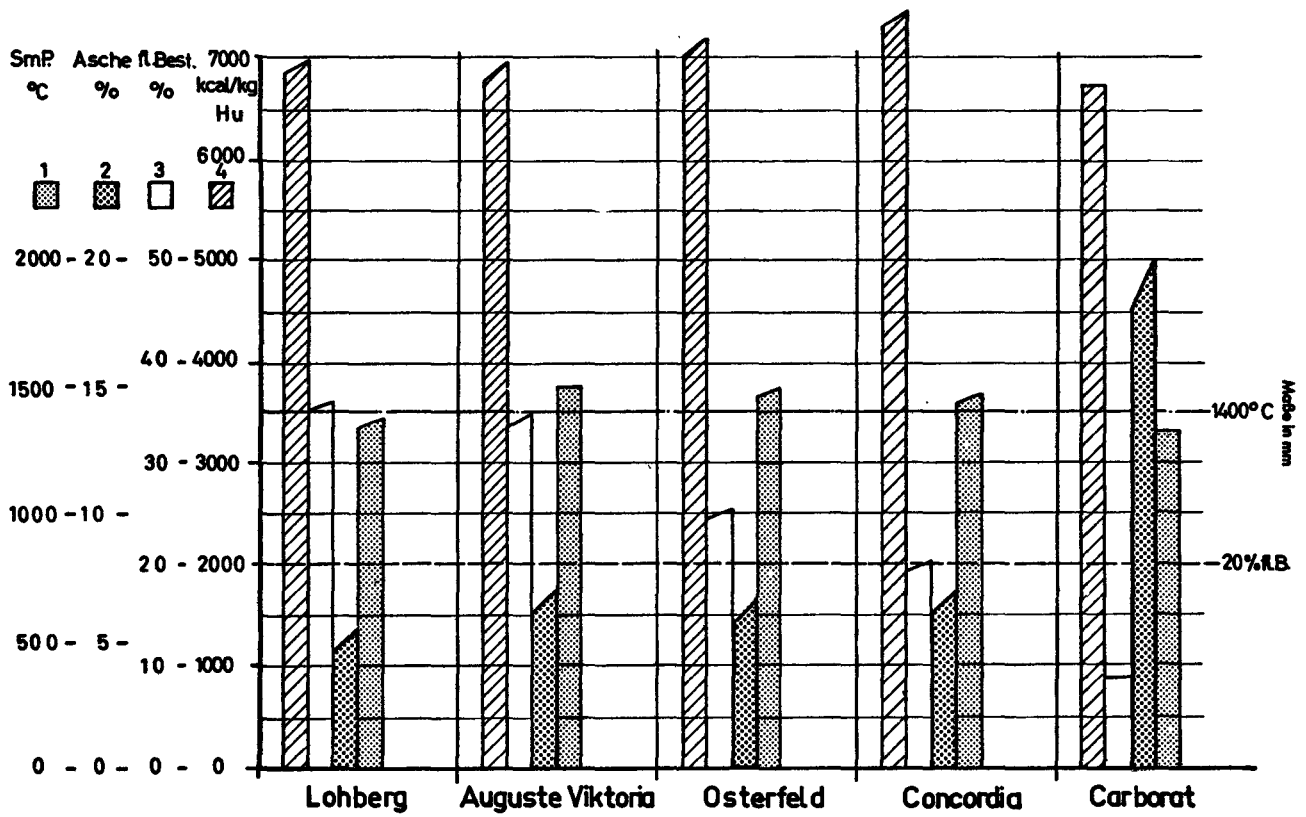


Abb. 12 : Graphische Darstellung wichtiger Eigenschaften von Kohlen und Aschen

# Rotationsbrenner am FM-Kessel

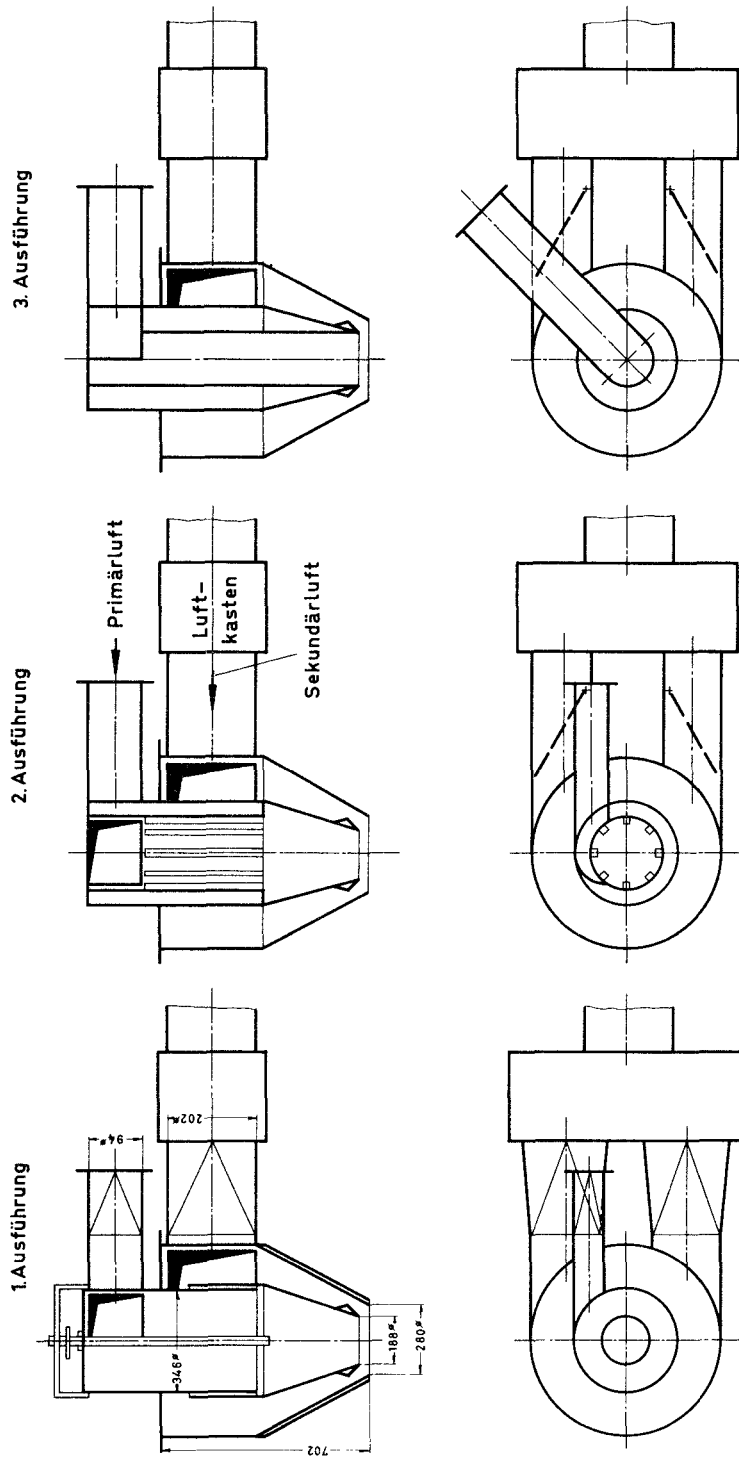


Abb. 13 : Untersuchte konstruktive Ausführungen des Rotationsbrenners

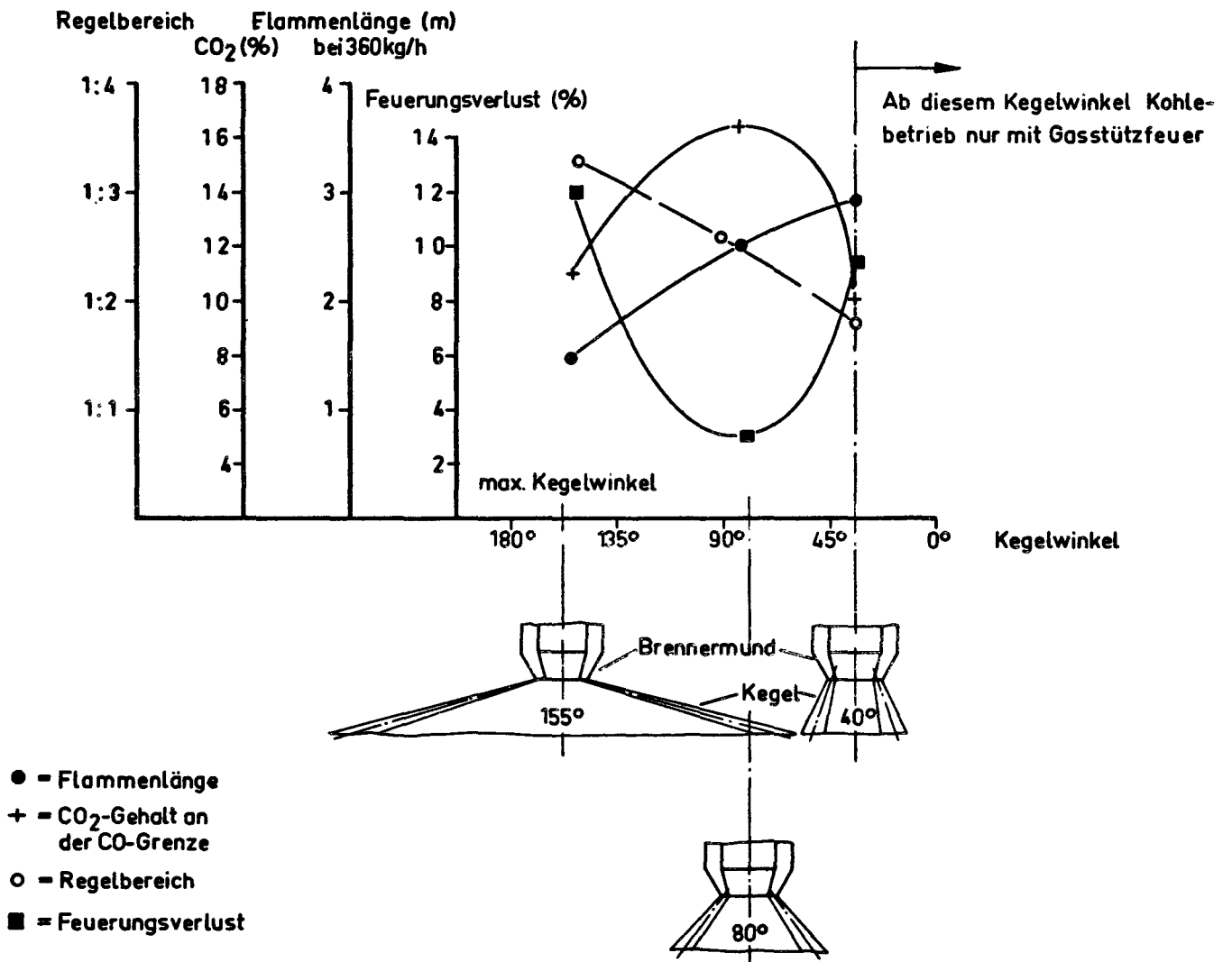


Abb. 14 : Ausbrand, Regelverhalten, Flammenlänge und CO<sub>2</sub>-Gehalt an der CO-Grenze als Funktion des Kegelwinkels

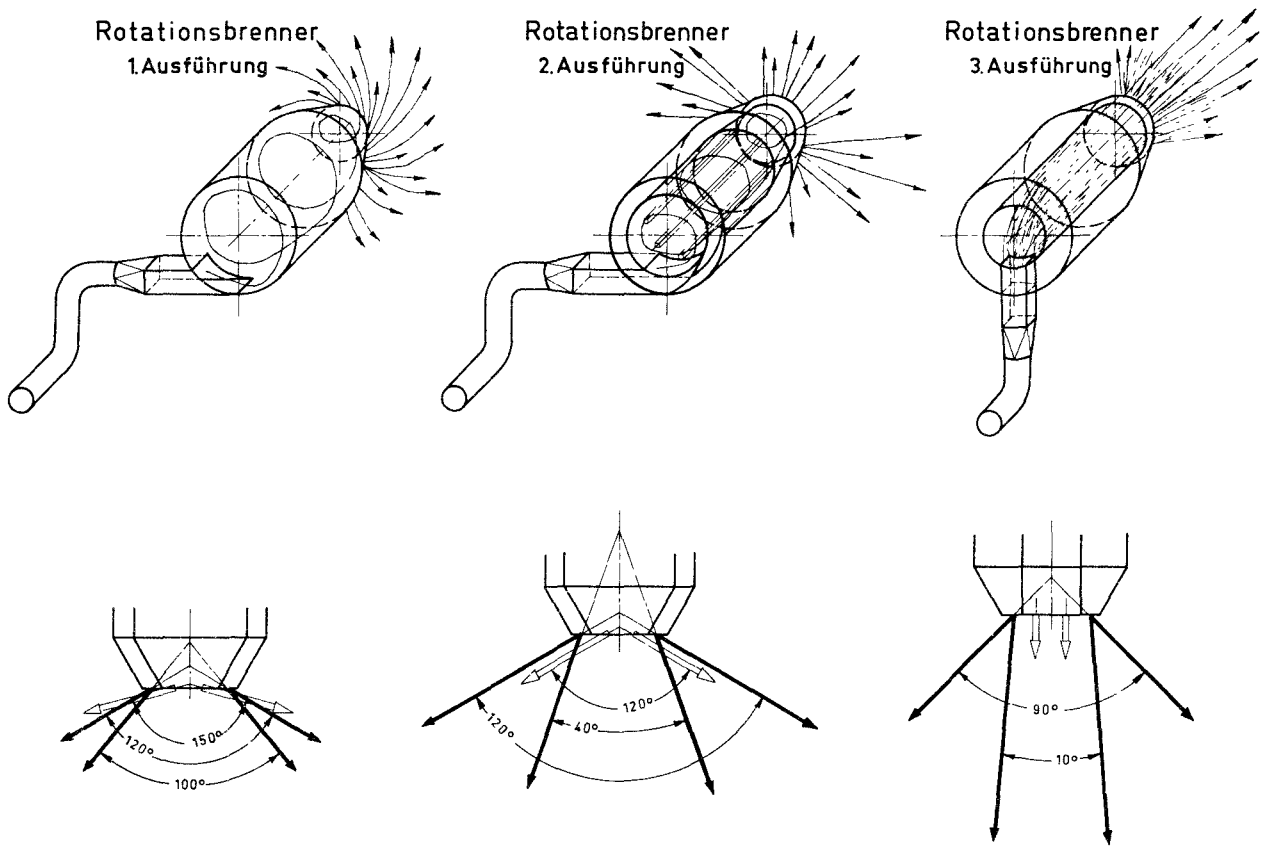
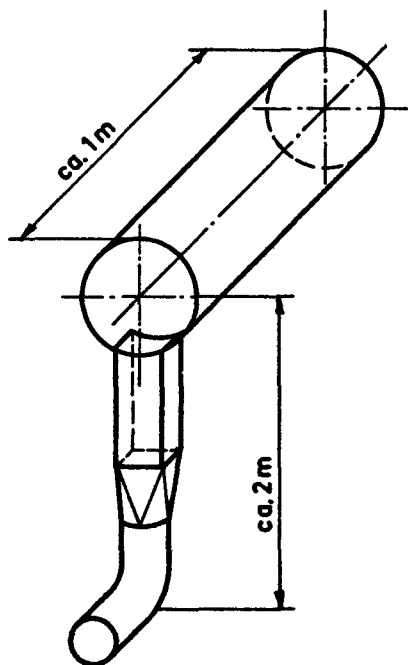
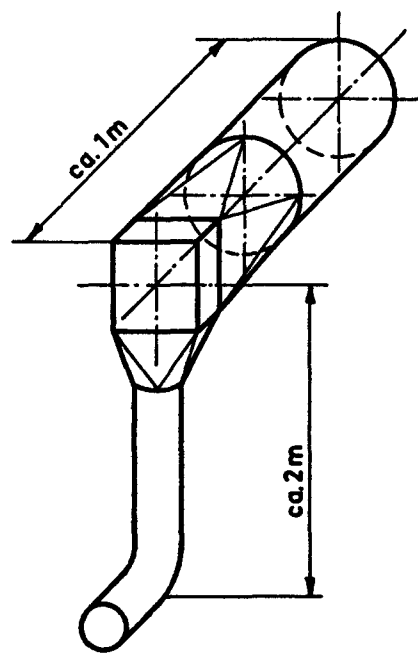


Abb. 15 : Qualitativer Strömungsverlauf bei den untersuchten Brennerausführungen

## Rotationsbrenner III



## Rundbrenner



Führung des Kohlenstaubluftegemisches bei Rotations- und Rundbrenner

Abb. 16 : Vergleich zwischen der Kohlenstaubzuführung am Rotationsbrenner, Ausführung 3, und am Rundbrenner

# Rundbrenner

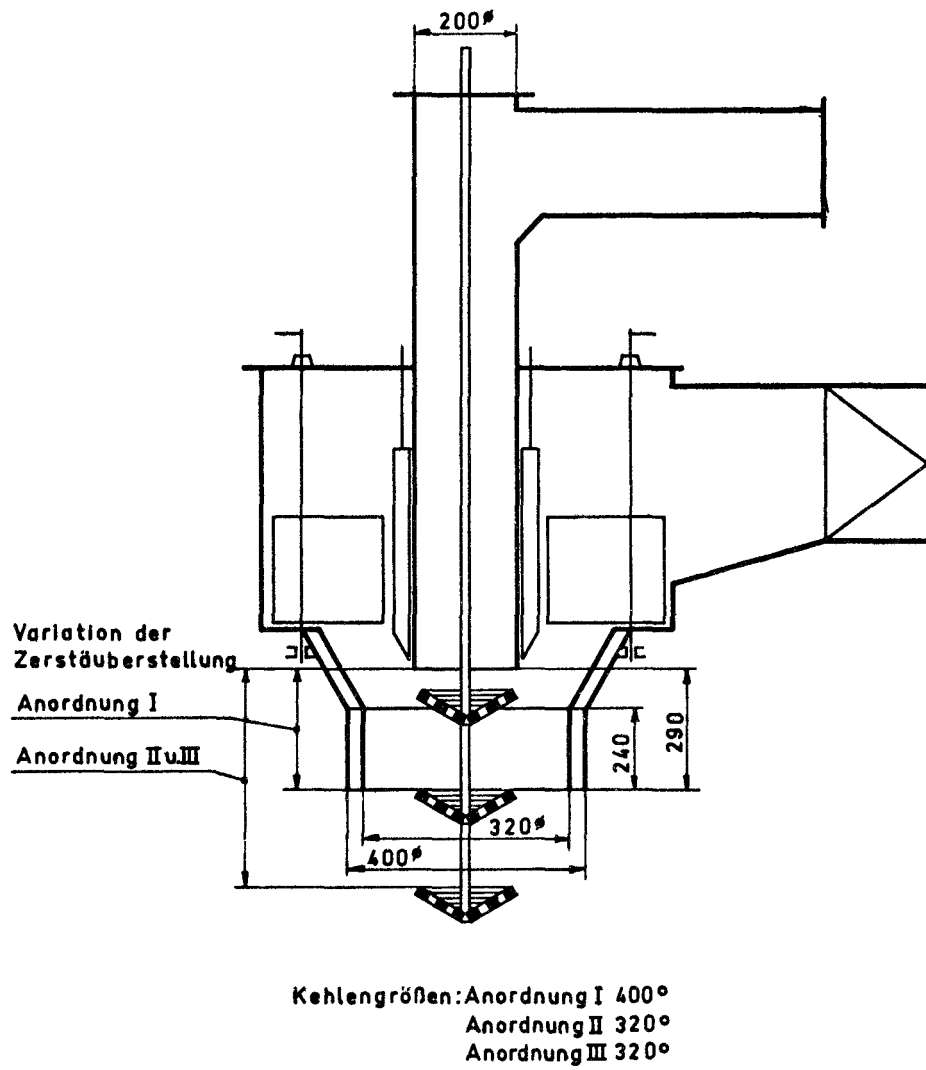


Abb. 17 : Untersuchte Ausführungen des Rundbrenners



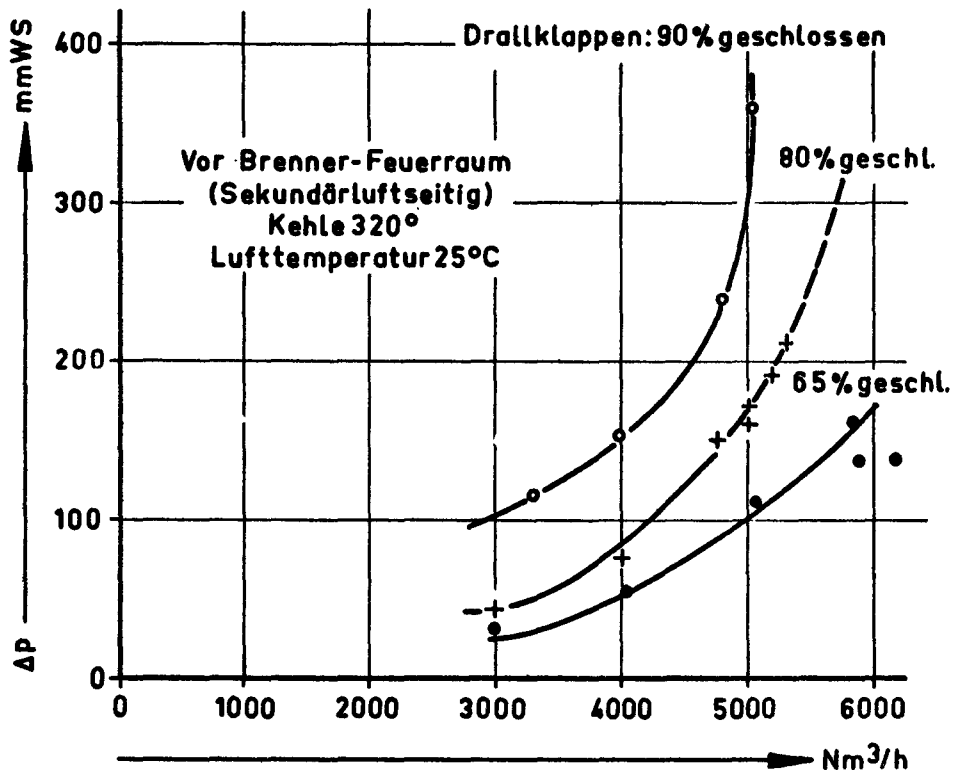
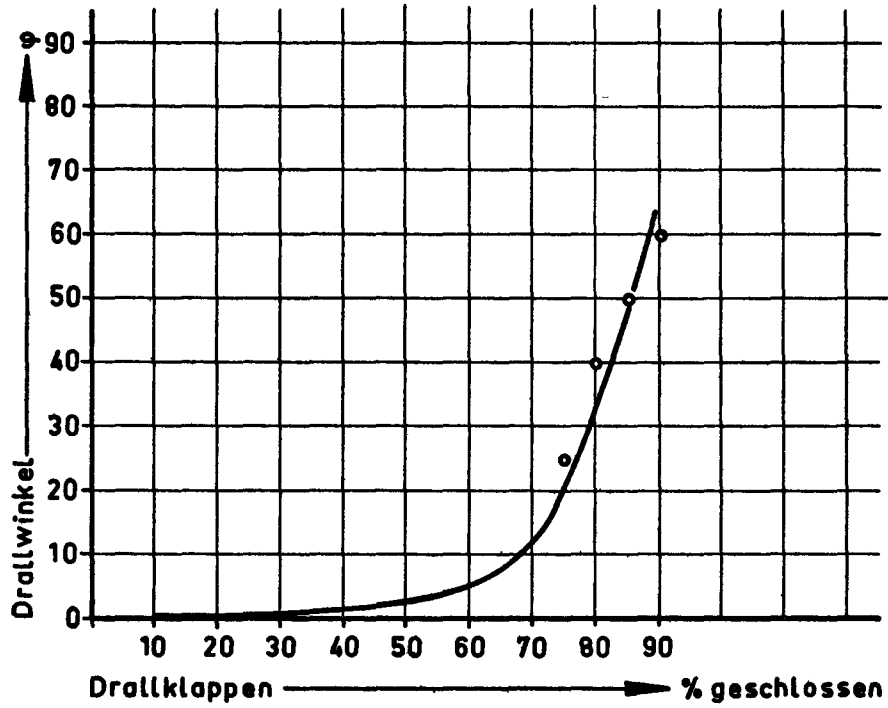


Abb. 18 : Drallwinkel (Abb. 19) als Funktion der Drallklappenstellung (oben) und Druckverlust des Brennergesschränks für verschiedene Drallklappenstellungen als Funktion des Luftdurchsatzes (unten)

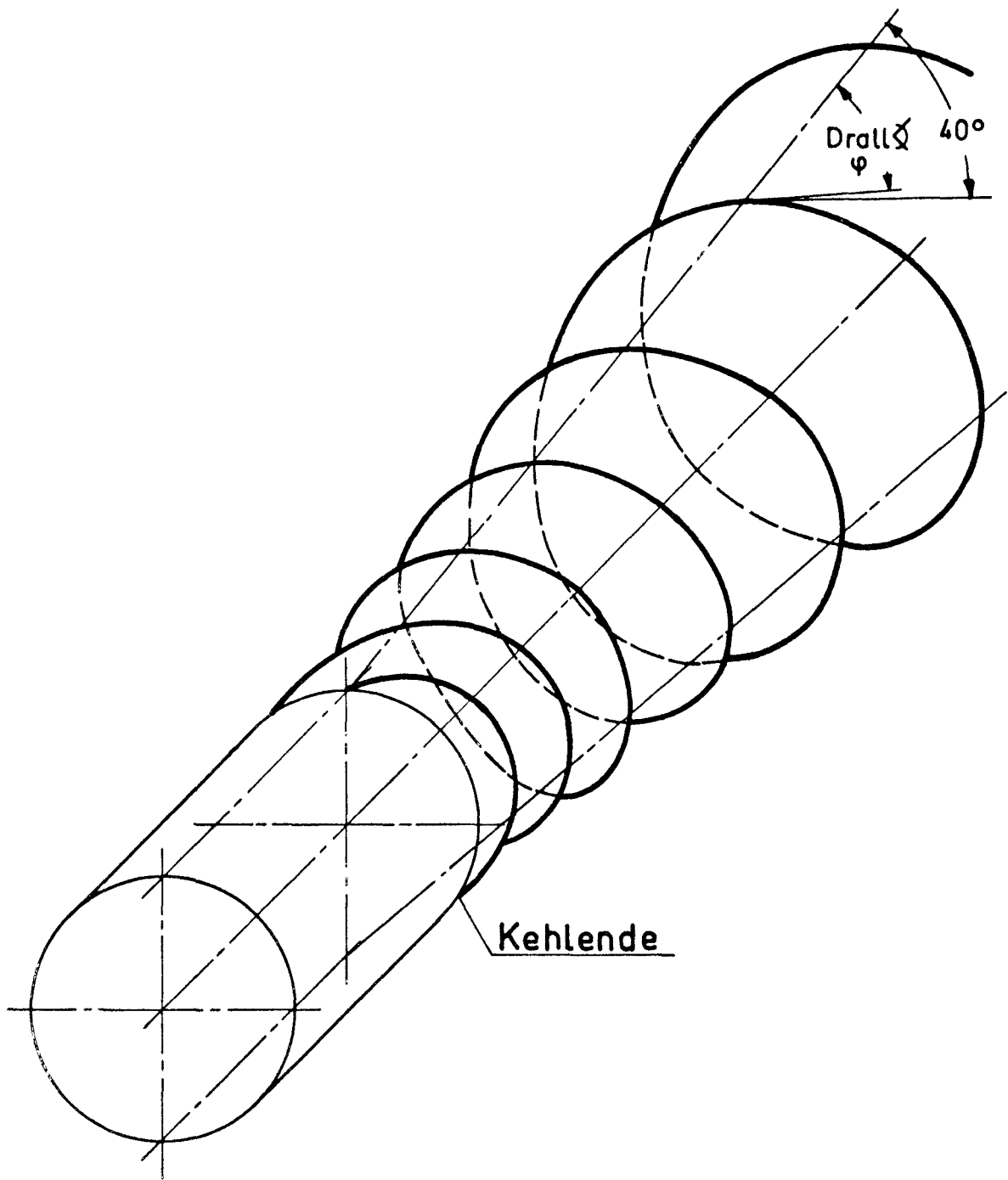


Abb. 19 : Zur Definition des Drallwinkels

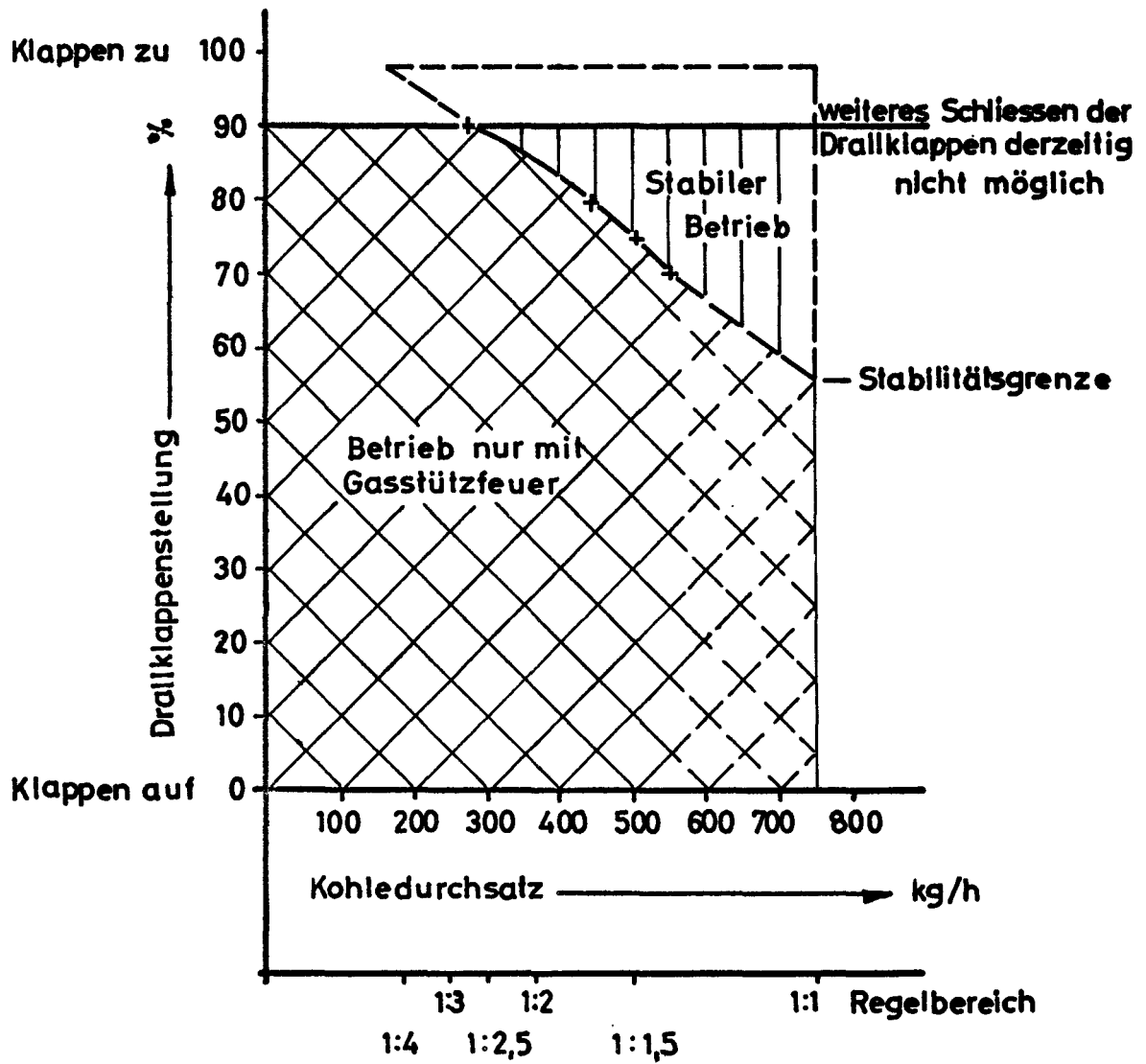


Abb. 20 : Einfluß der Drallklappenstellung auf die Stabilitätsgrenze (Regelbereich) als Funktion des Kohledurchsatzes bei Anordnung 3

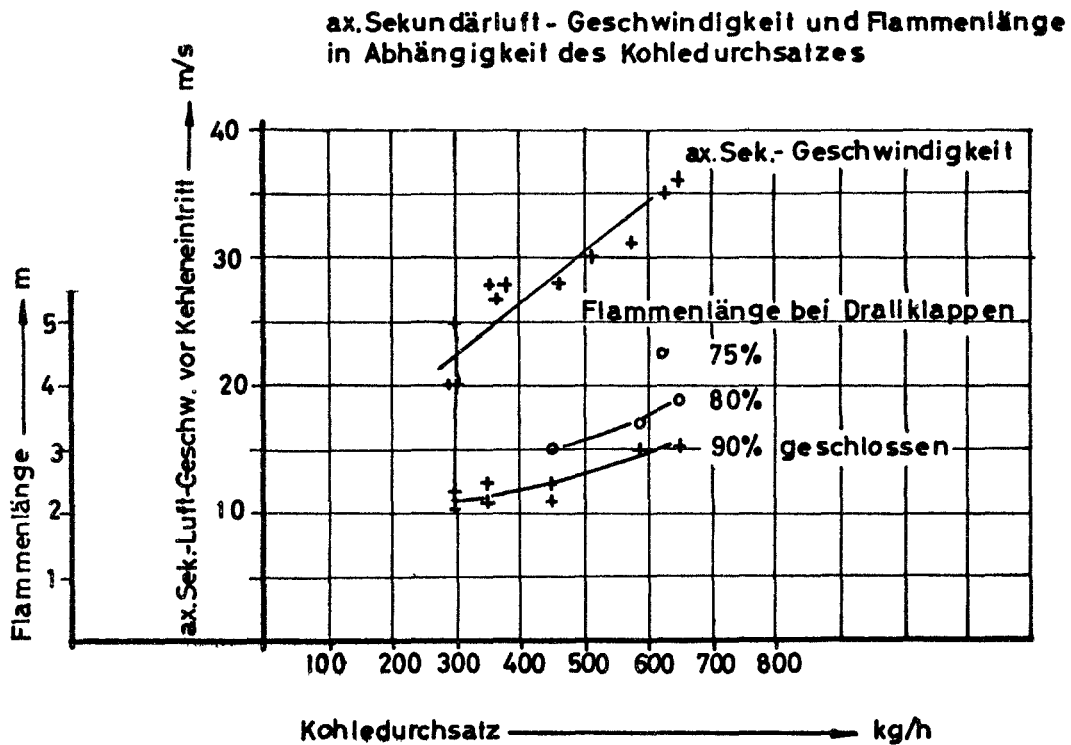
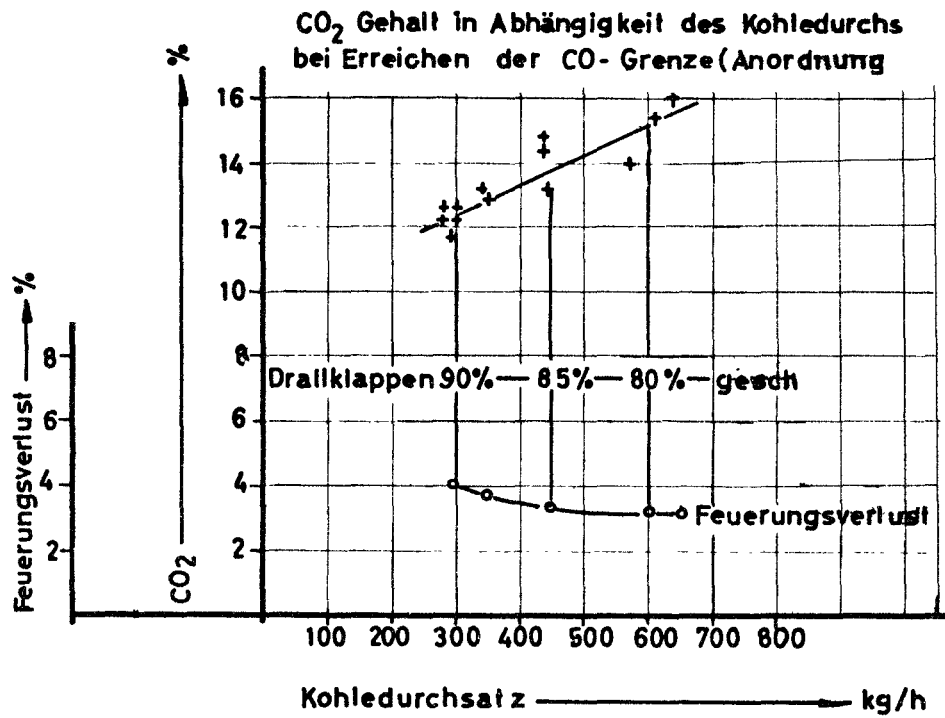
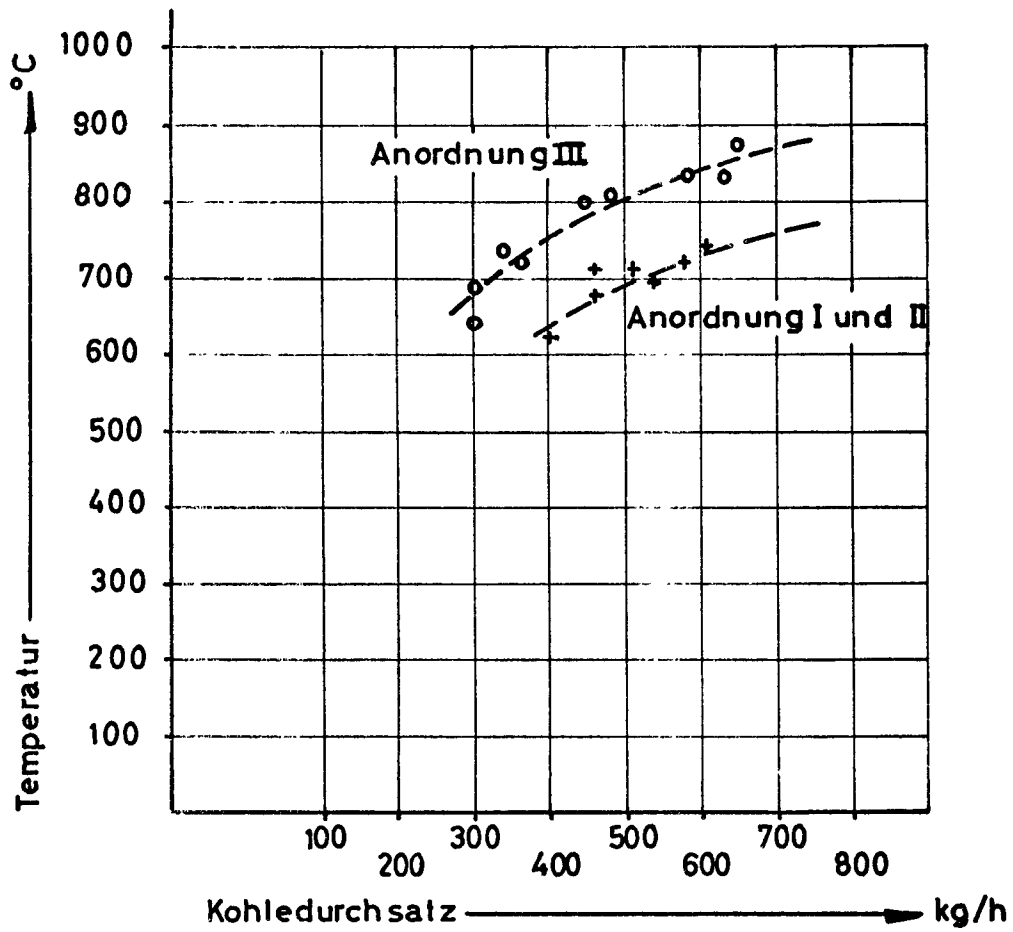


Abb. 21 : Feuerungsverlust, CO<sub>2</sub>-Gehalt an der CO-Grenze, axiale Komponente der Sekundärluftgeschwindigkeit und Flammenlänge als Funktion des Brennstoffdurchsatzes



Feuerraumendtemperatur in Abhängigkeit des Durchsatzes bei Anordnung I, II und III.

Frischlufitemperatur 25°C

( amerikan. Rundbrenner )

Abb. 22 : Feuerraumendtemperatur bei verschiedenen Brennkammerauskleidungen als Funktion des Brennstoffdurchsatzes

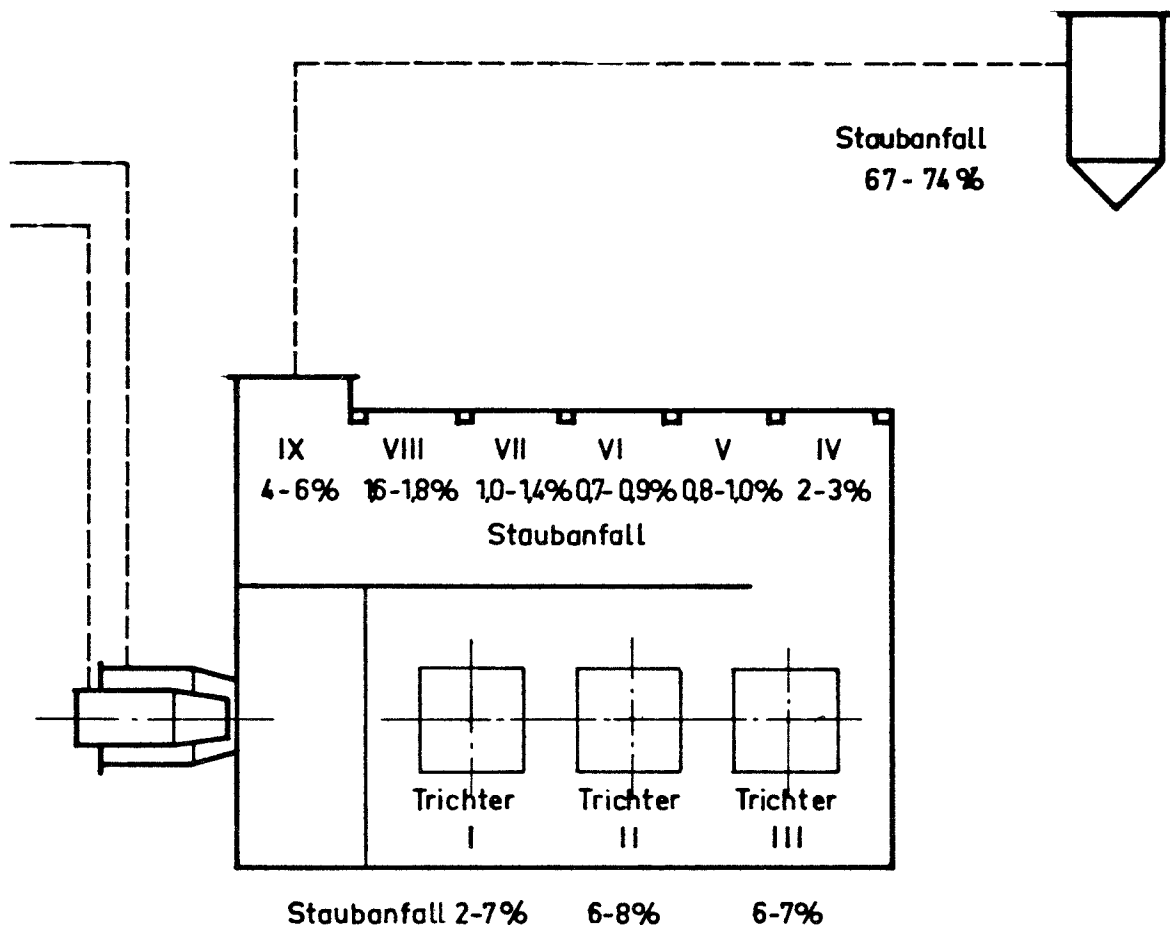


Abb. 23 : Aufteilung des Flugstaubs auf Aschetrichter und Zyklon

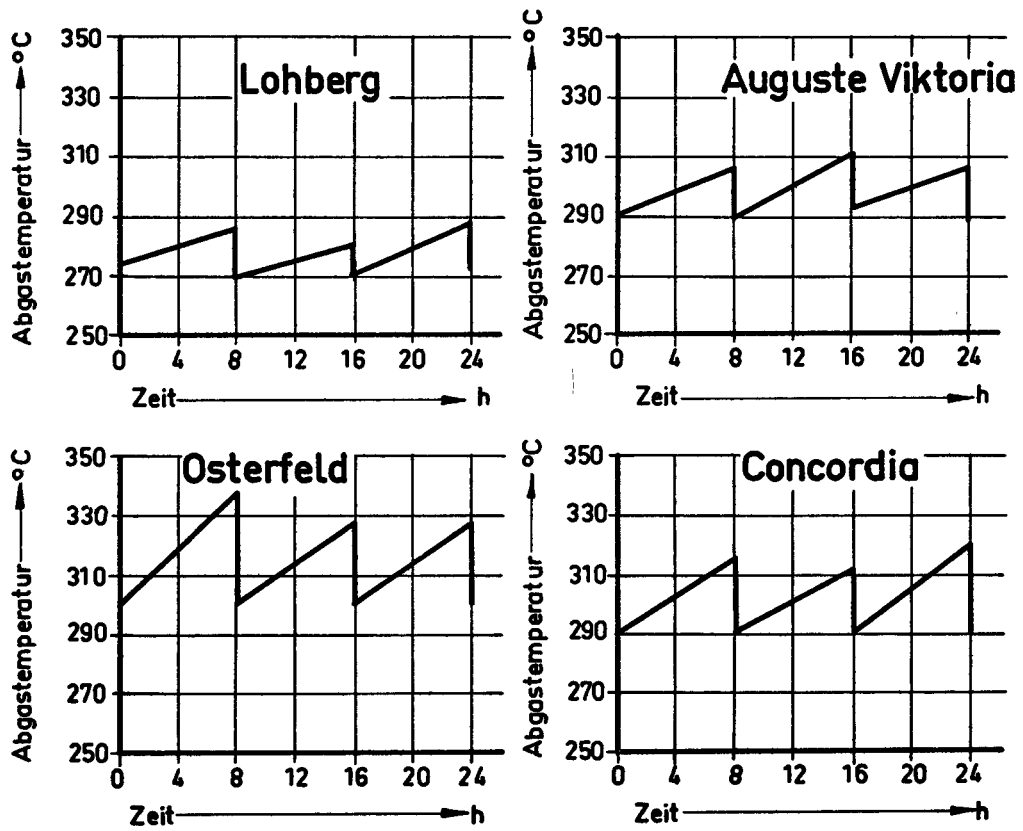


Abb. 24 : Anstieg der Abgastemperatur über der Kesselbetriebszeit bei verschiedenen Kohlenarten. Wirkung der Rußbläser

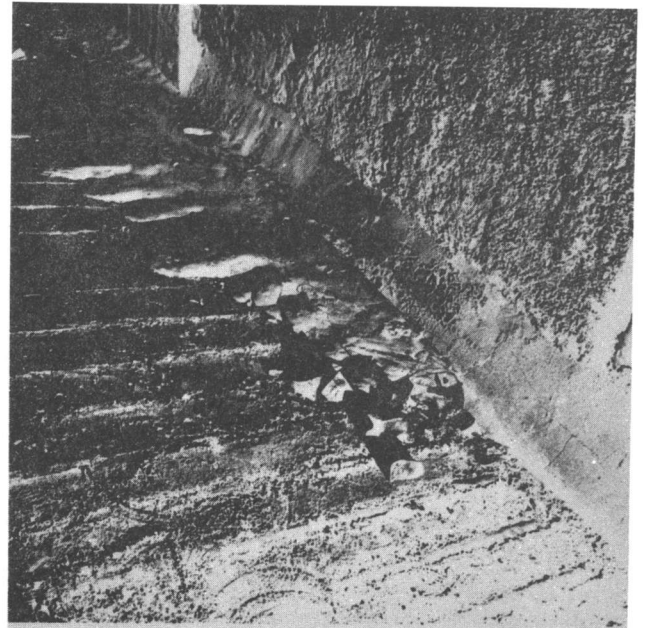
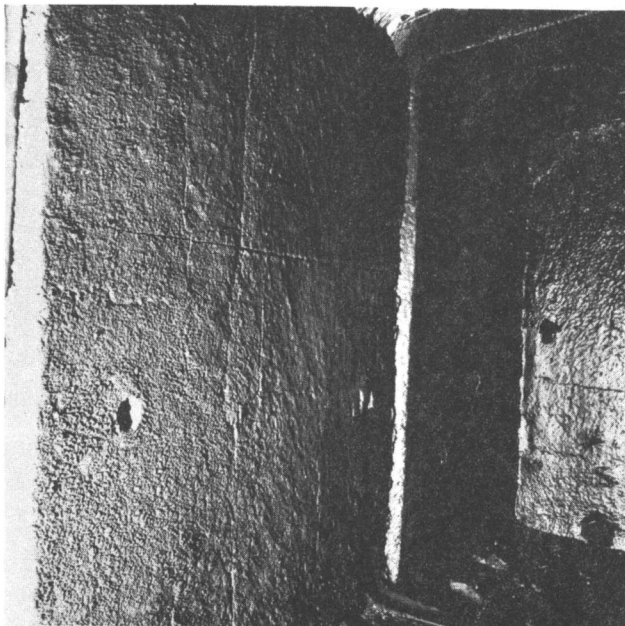
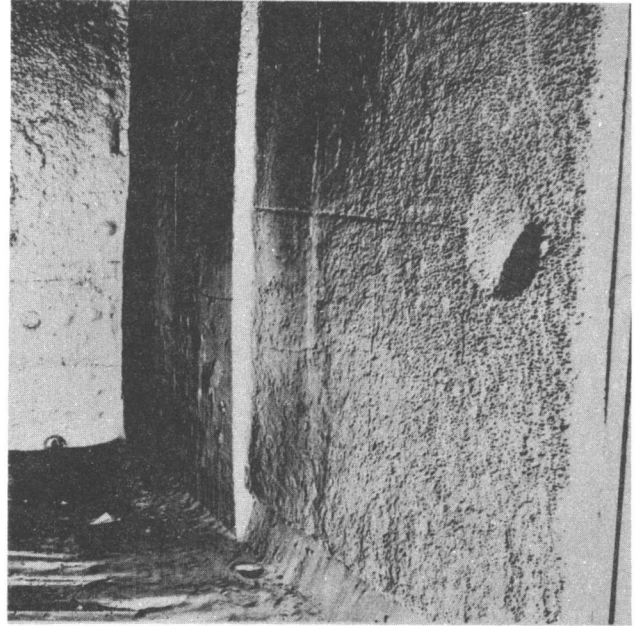
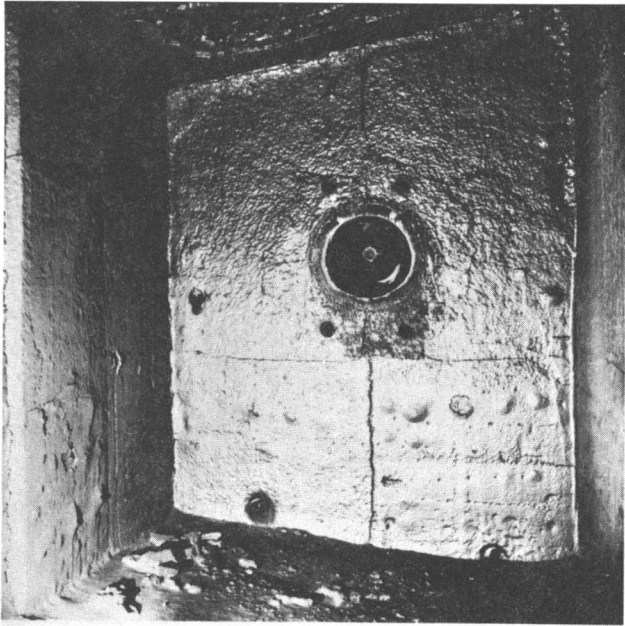


Abb. 25 a : Aussehen des Feuerraums vor Beginn der Versuche mit 4 Kohlenarten



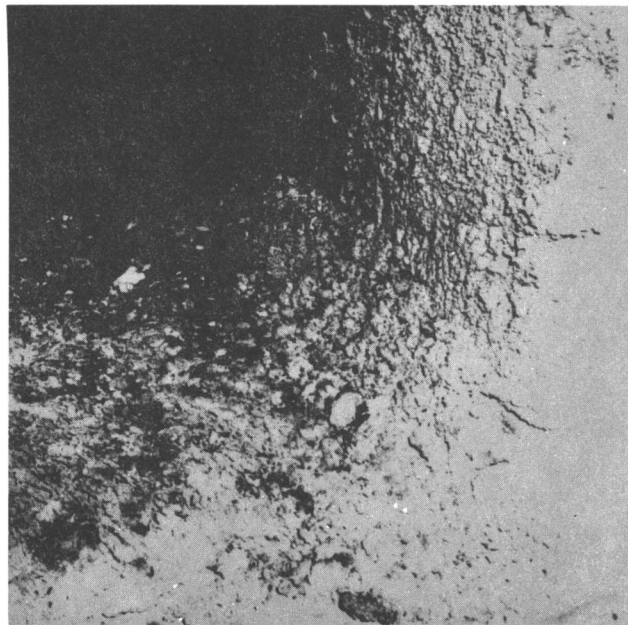
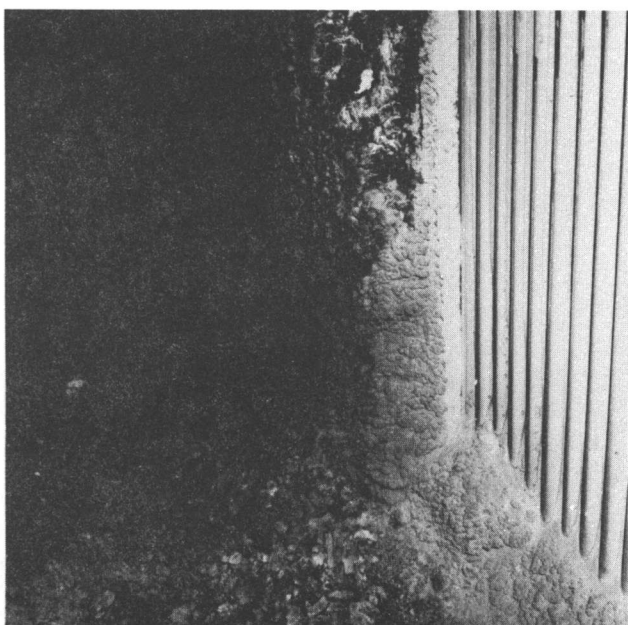
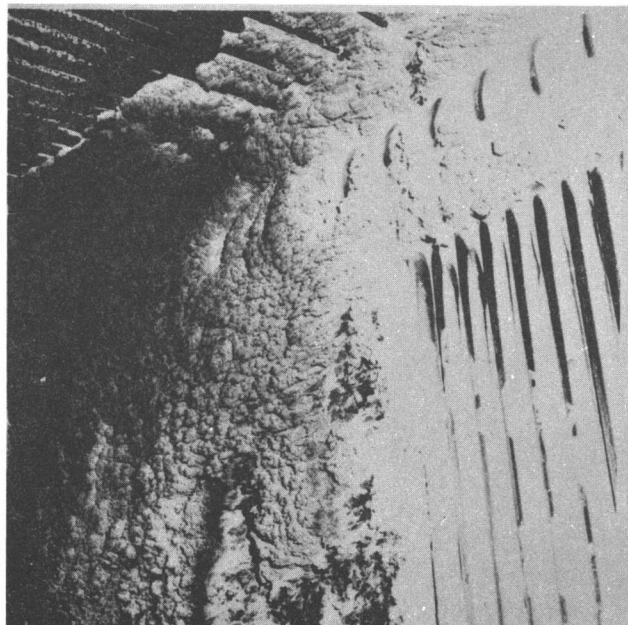
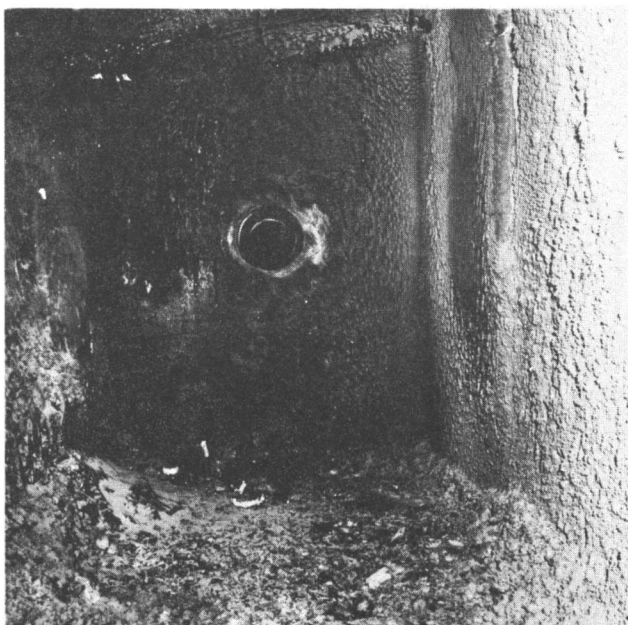


Abb. 25 b : Aussehen des Feuerraums nach Abschluß der Versuche (Lohberg)

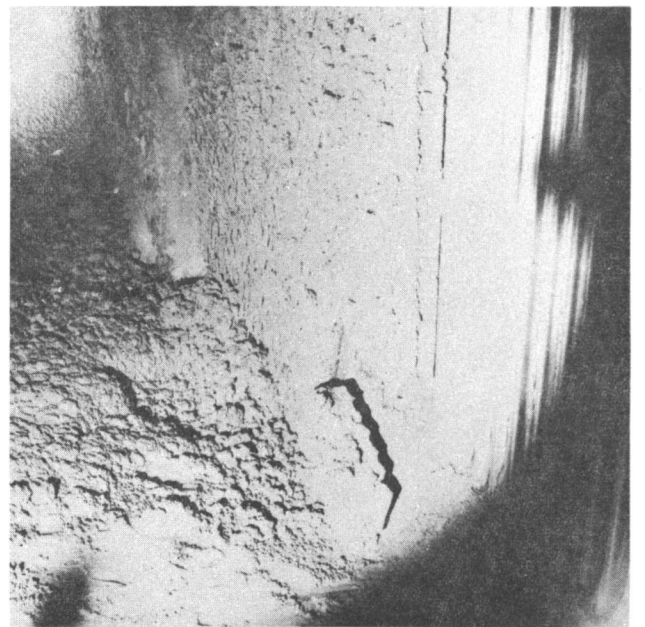
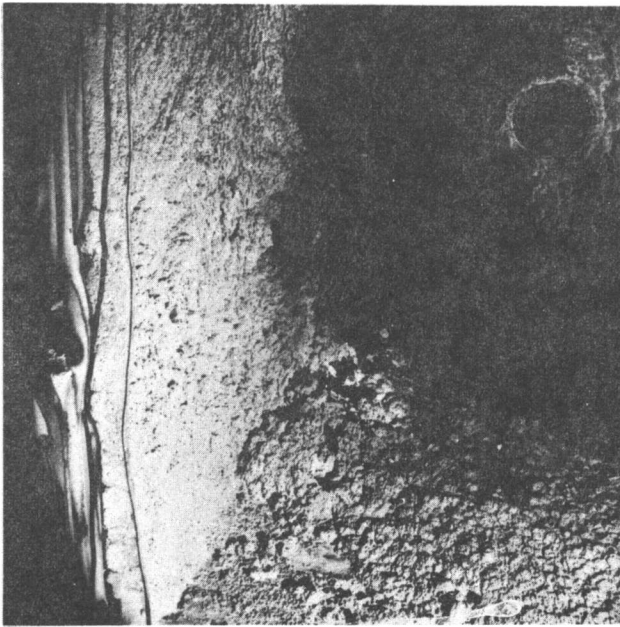
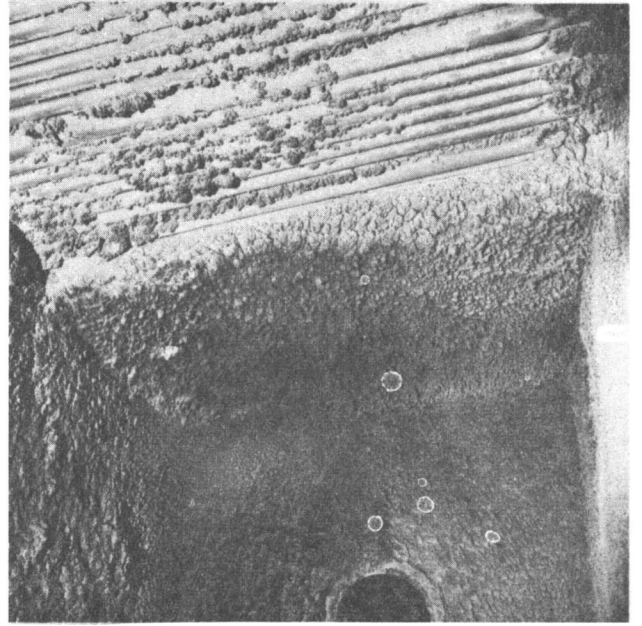
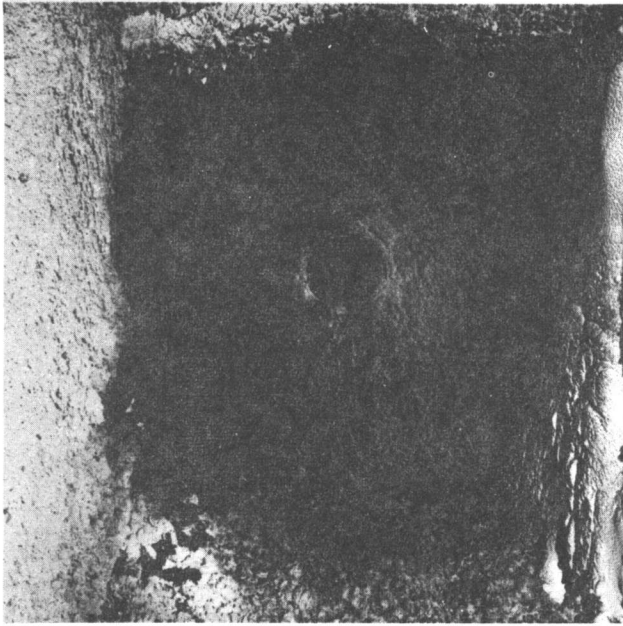


Abb. 25 c : Aussehen des Feuerraums nach Abschluß der Versuche (Auguste Victoria)

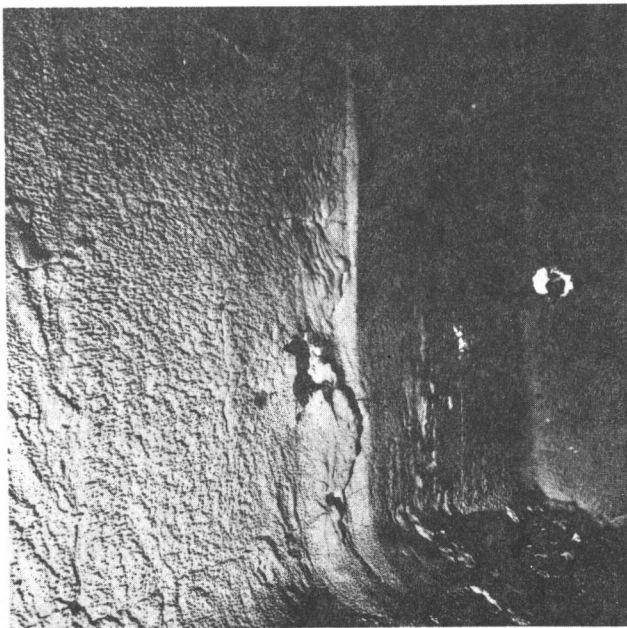
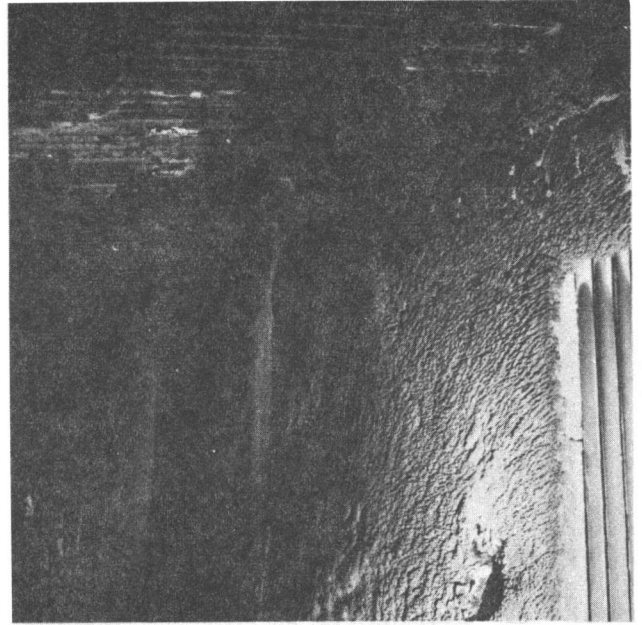
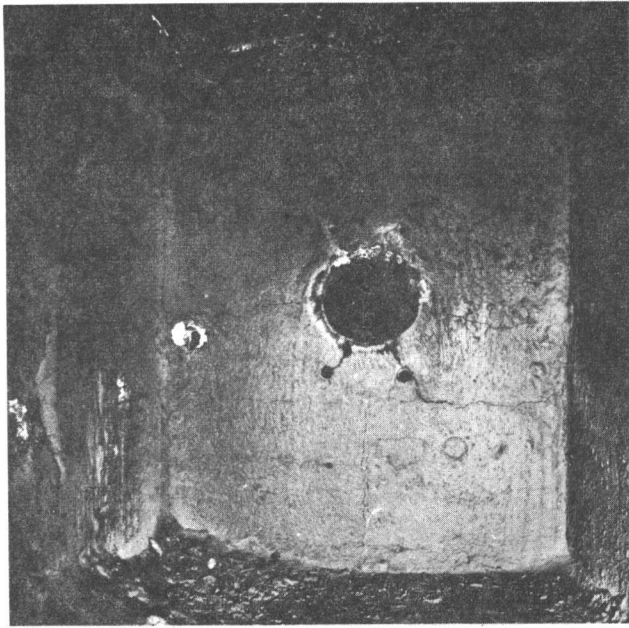


Abb. 25 d : Aussehen des Feuerraums nach Abschluß der Versuche (Osterfeld)

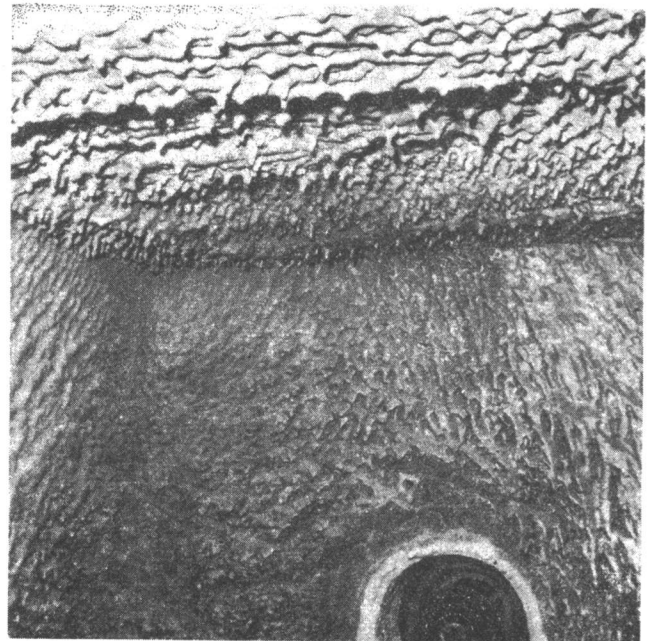
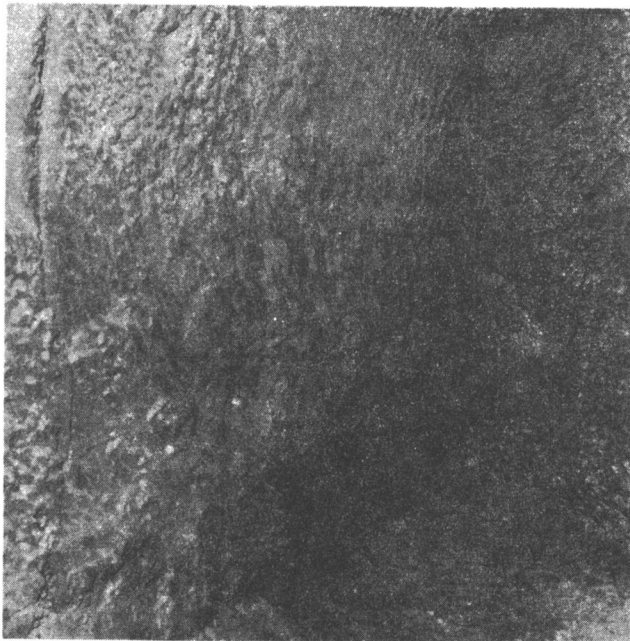
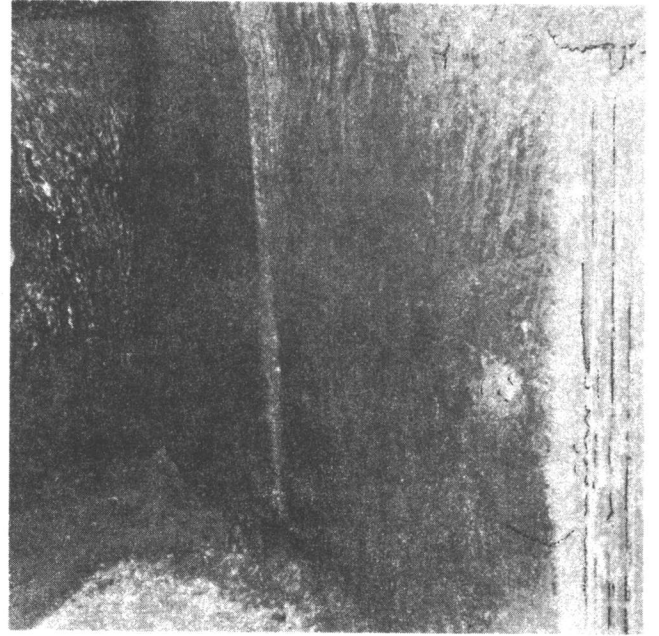
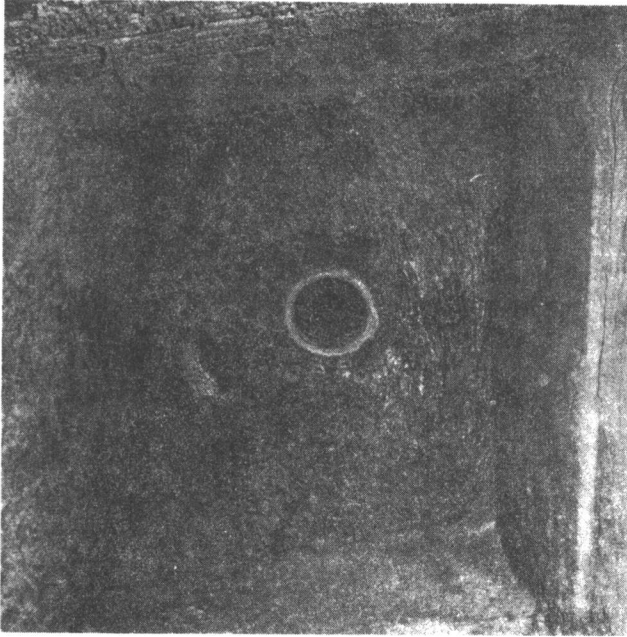


Abb. 25 e : Aussehen des Feuerraums nach Abschluß der Versuche (Concordia)

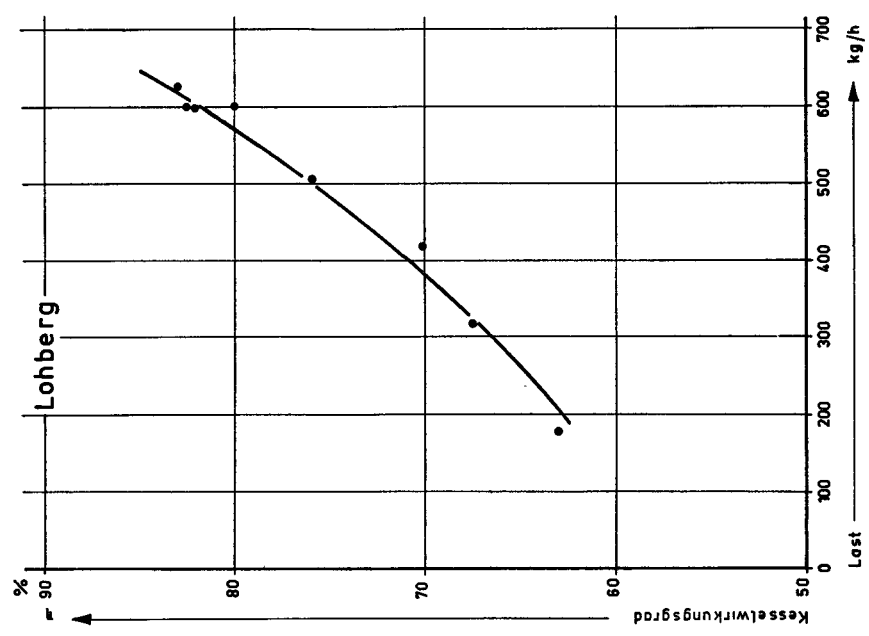
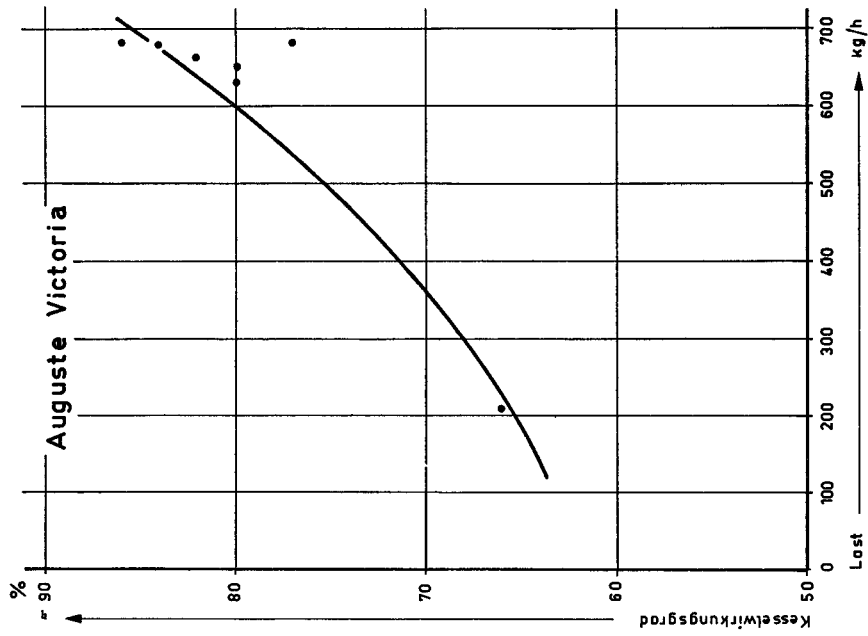


Abb. 26 a, b : Kesselwirkungsgrad als Funktion des Brennstoffdurchsatzes (Lohberg, Auguste Victoria)

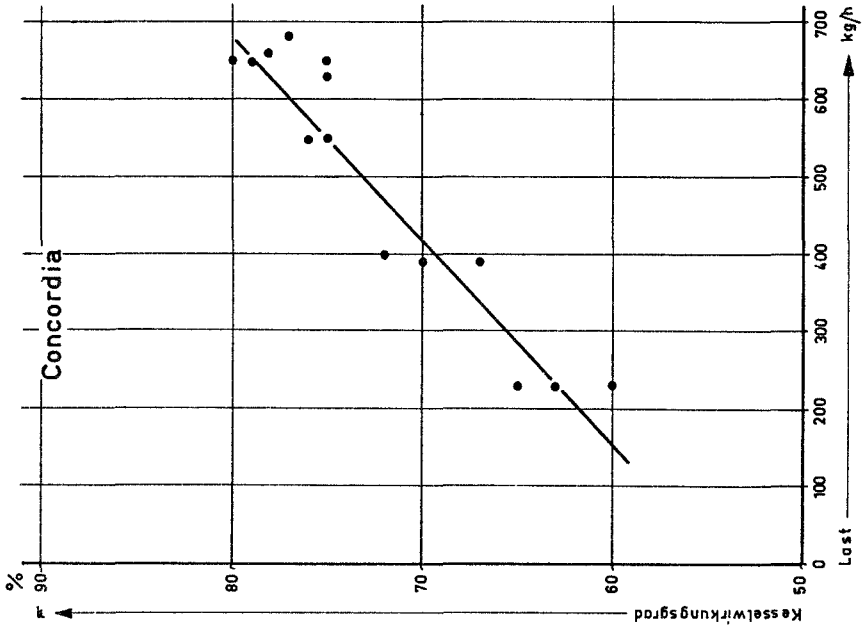
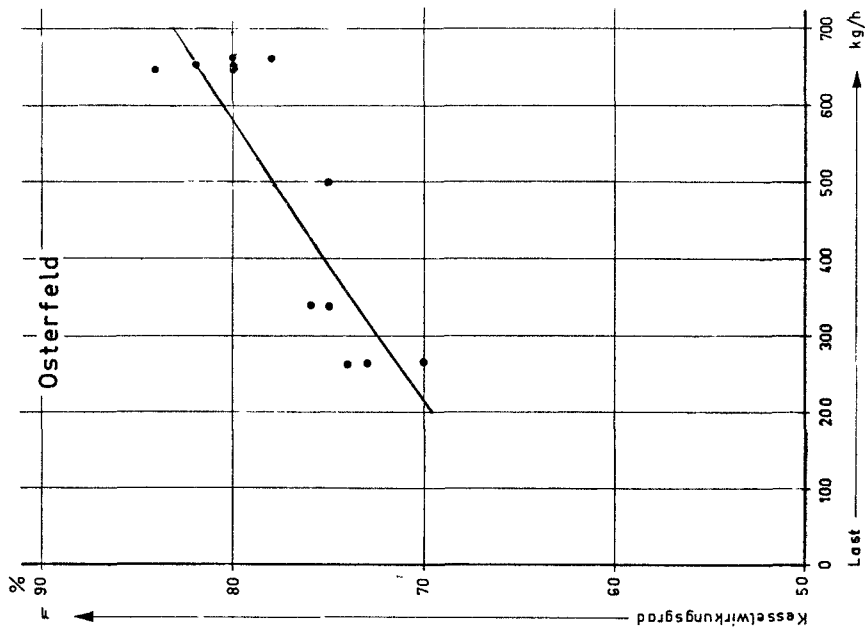


Abb. 26 c, d : Kesselwirkungsgrad als Funktion des Brennstoffdurchsatzes (Osterfeld, Concordia)

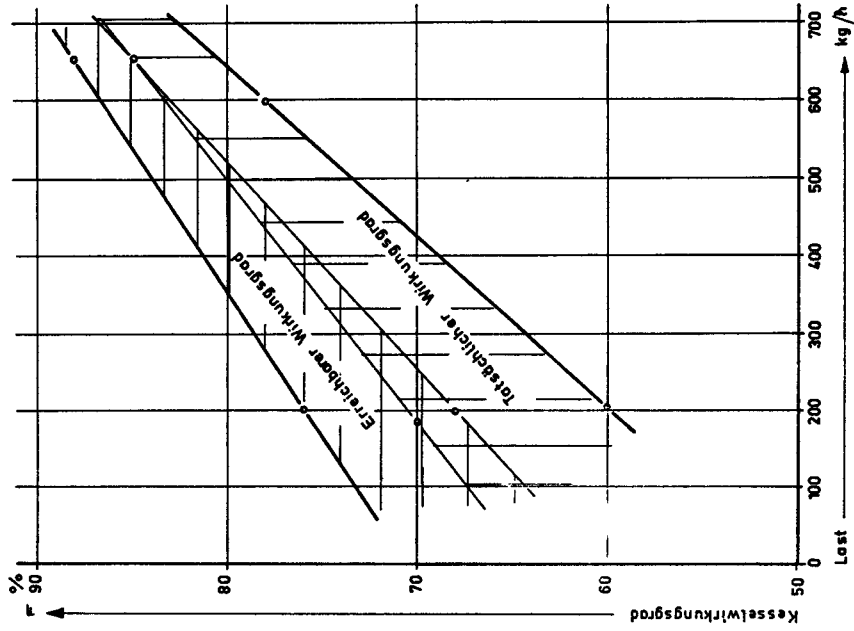


Abb. 28 : Streubereich der tatsächlichen (fremdbeheizter Luvo) und erreichbaren Kesselwirkungsgrade

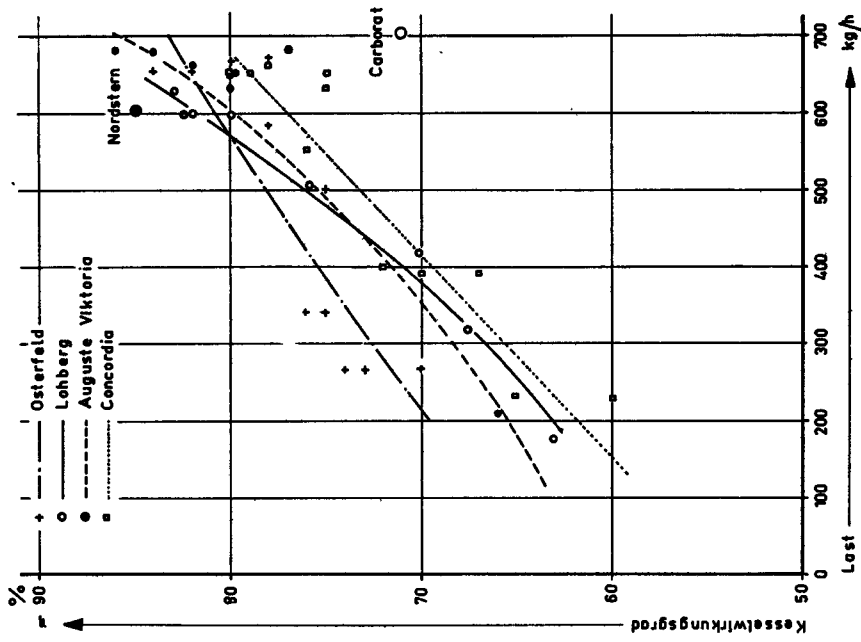


Abb. 27 : Zusammenstellung der Wirkungsgrade bei den einzelnen Kohlenarten einschließlich Nordstern-Kohle und Carborat

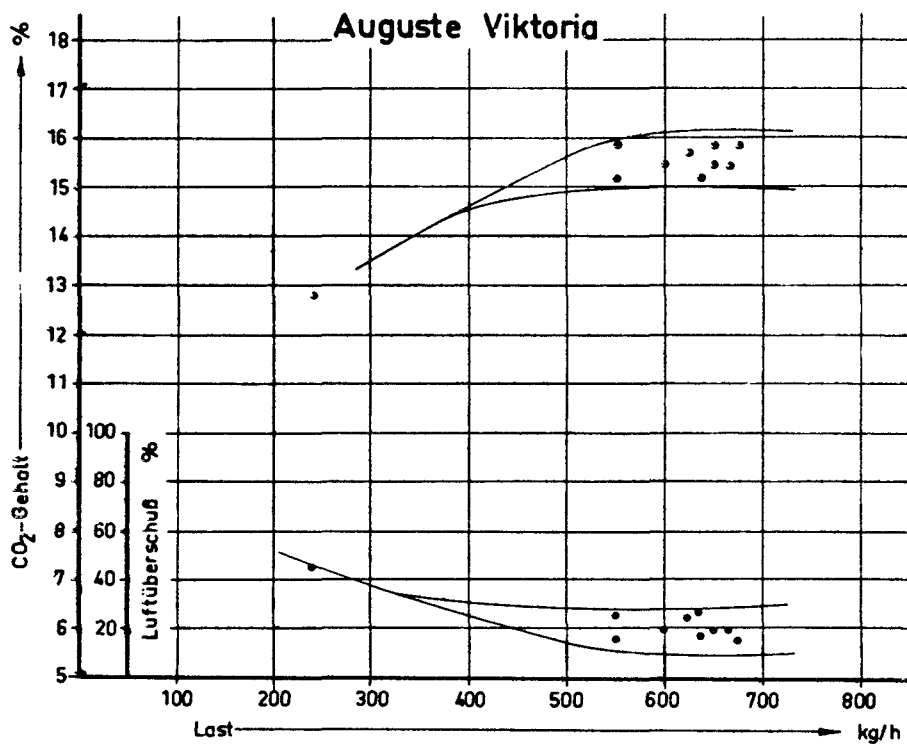
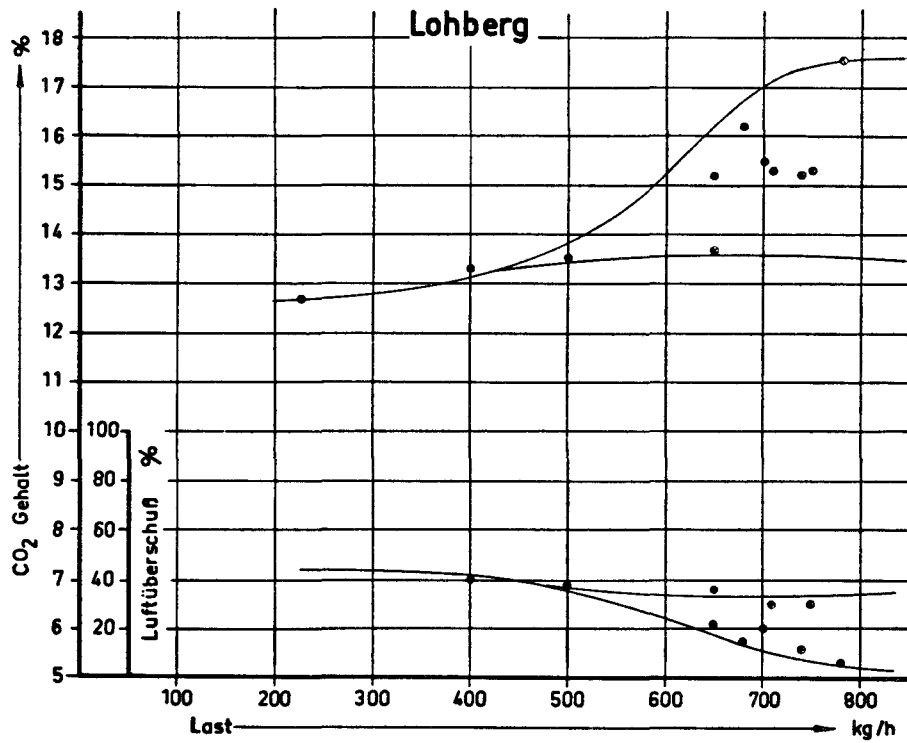


Abb. 29 a, b : CO<sub>2</sub>-Gehalt und Luftüberschuß bei optimaler Brennereinstellung als Funktion des Brennstoffdurchsatzes (Lohberg, Auguste Viktoria)



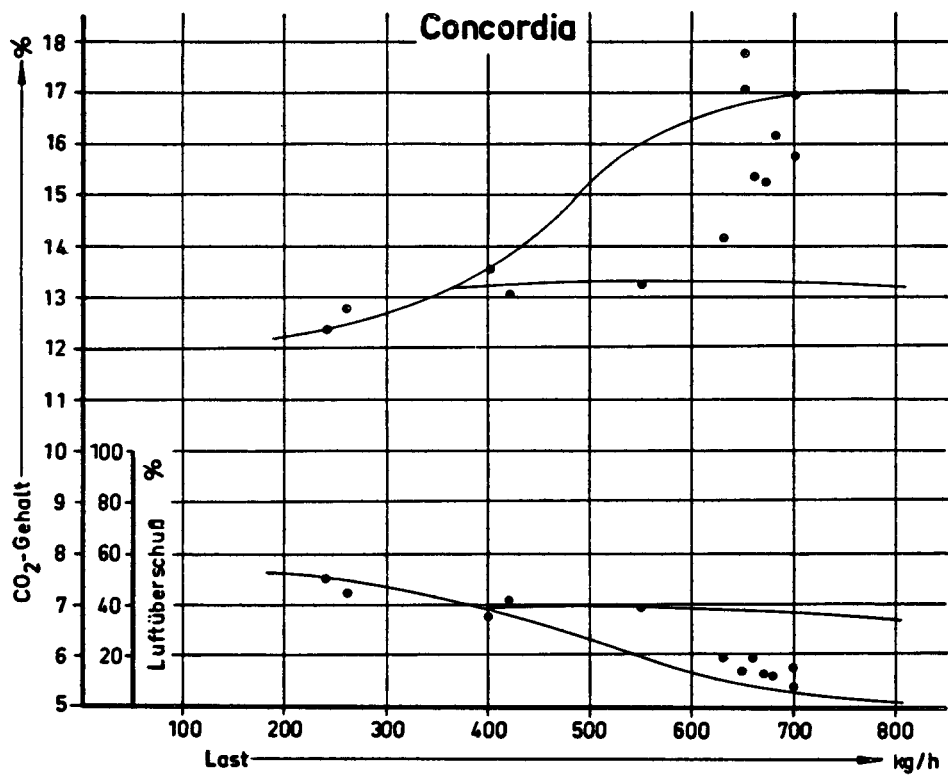
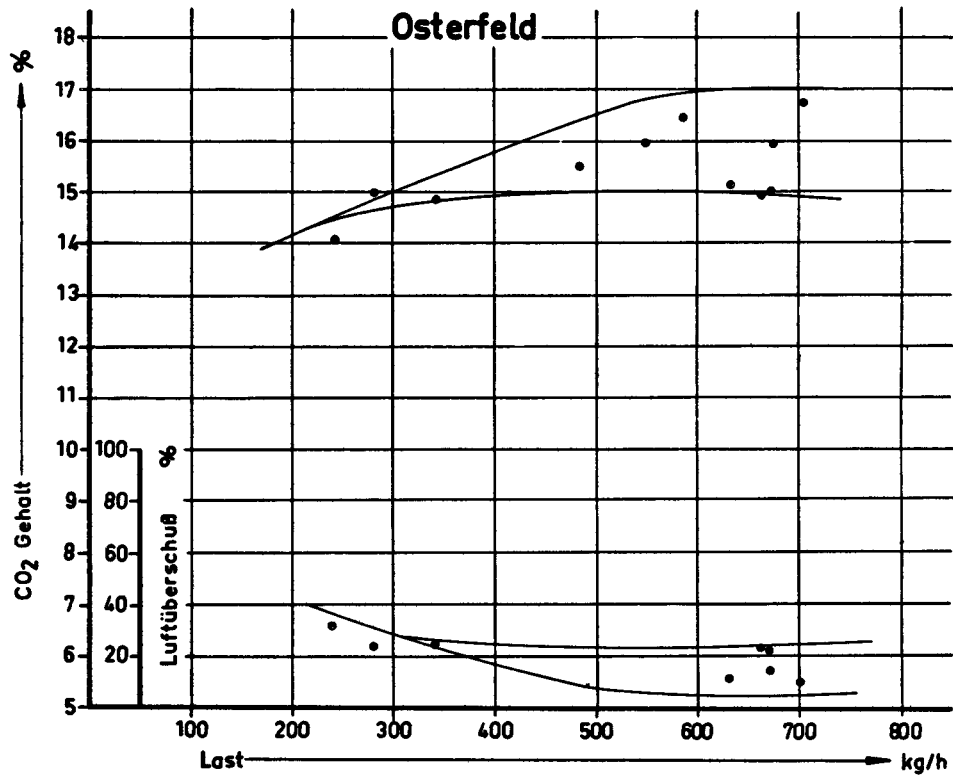


Abb. 29 c, d : CO<sub>2</sub>-Gehalt und Luftüberschuß bei optimaler Brennereinstellung als Funktion des Brennstoffdurchsatzes (Osterfeld, Concordia)

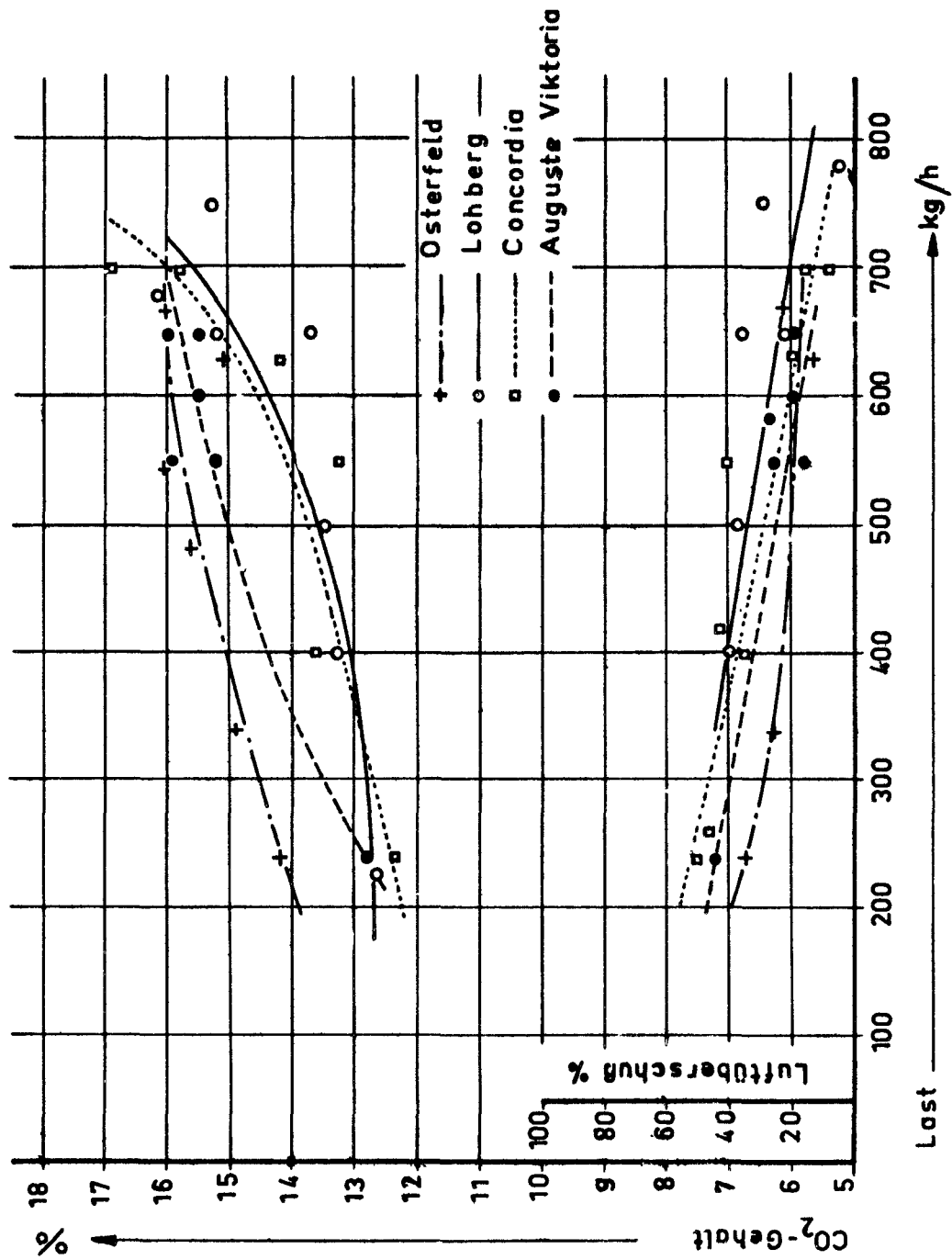


Abb. 30 : CO<sub>2</sub>-Gehalt und Luftüberschuß bei optimaler Brenneinstellung als Funktion des Brennstoffdurchsatzes (Zusammenstellung der Ergebnisse)

## Regelverhalten des Rundbrenners

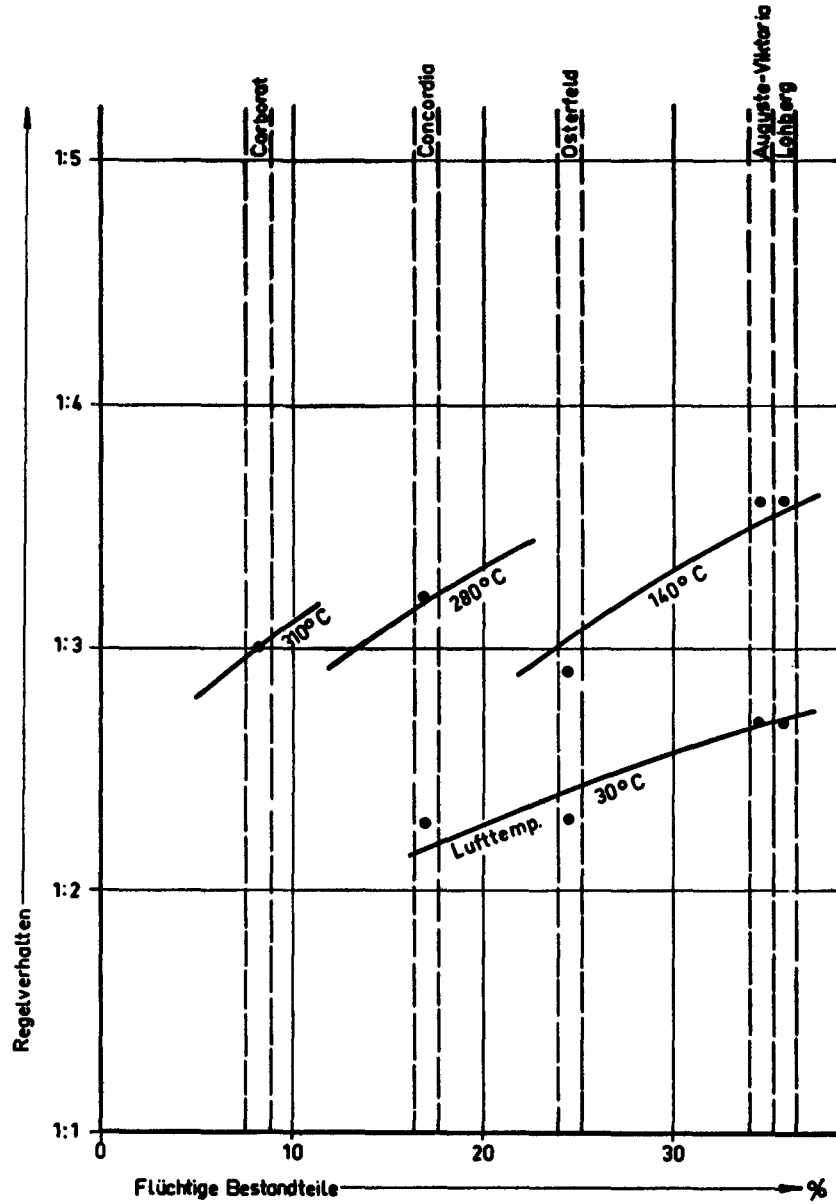


Abb. 31 : Regelbereich des Rundbrenners mit verschiedenen Kohlenarten als Funktion der flüchtigen Bestandteile bei unterschiedlichen Luftvorwärmtemperaturen

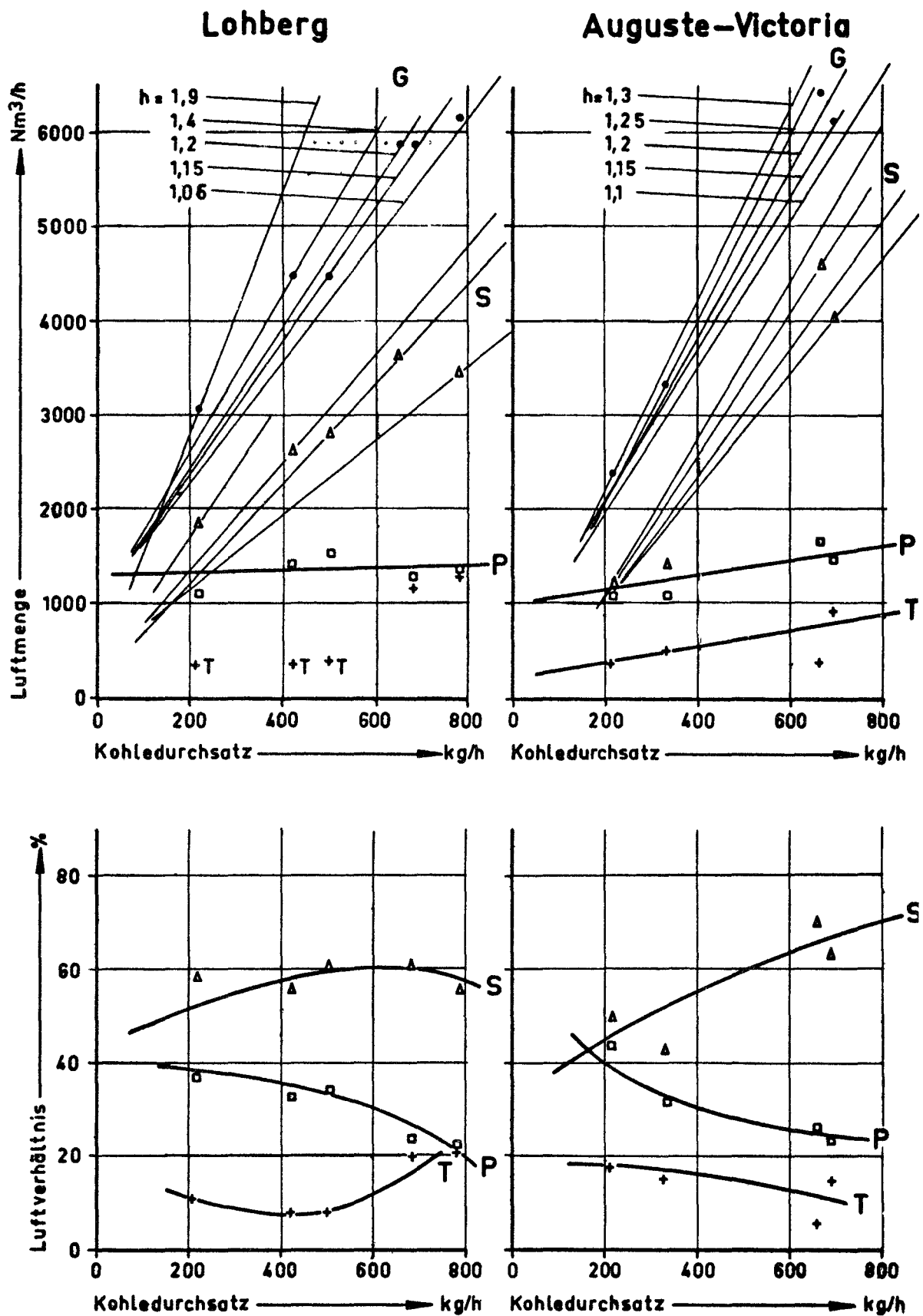


Abb. 32 a, b : Aufstellung der Gesamtluftmenge und ihre Aufteilung auf Primär-, Sekundär- und Tertiärluftmenge bei unterschiedlichen Luftzahlen als Funktion vom Brennstoffdurchsatz (Lohberg, Auguste Victoria)

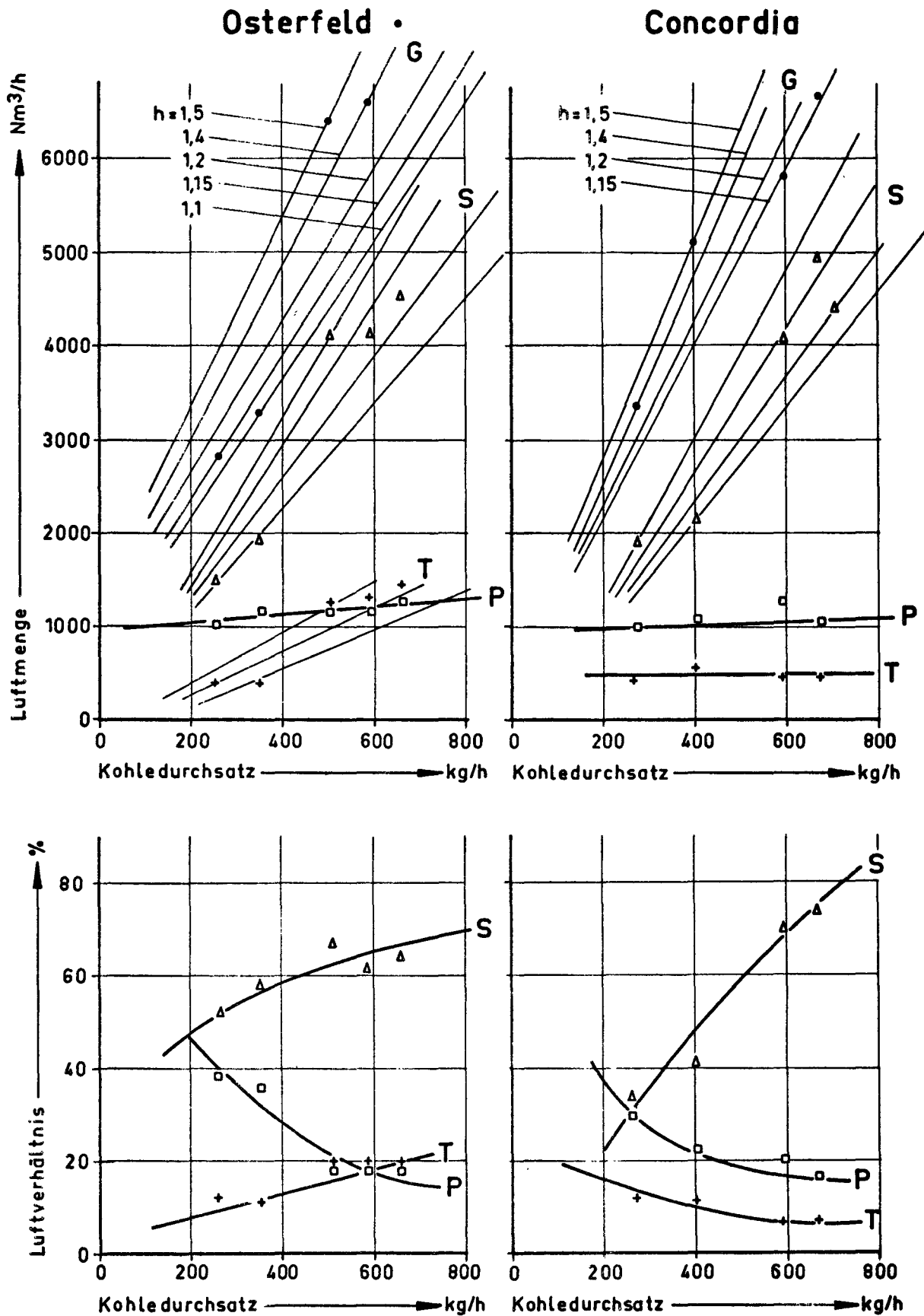


Abb. 32 c, d : Aufstellung der Gesamtluftmenge und ihre Aufteilung auf Primär-, Sekundär- und Tertiärluftmenge bei unterschiedlichen Luftzahlen als Funktion vom Brennstoffdurchsatz (Osterfeld, Concordia)

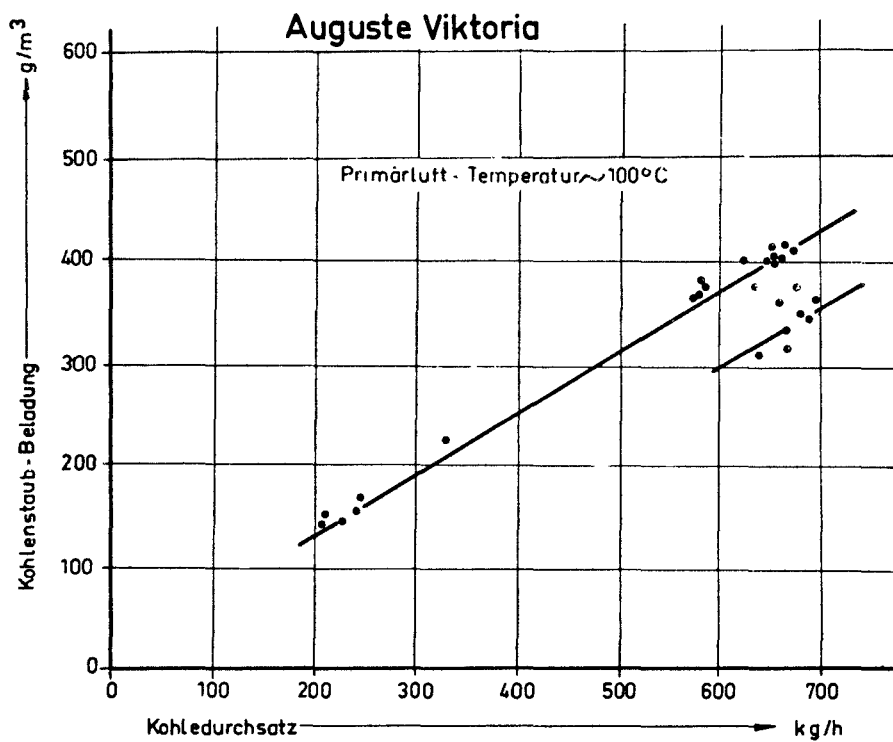
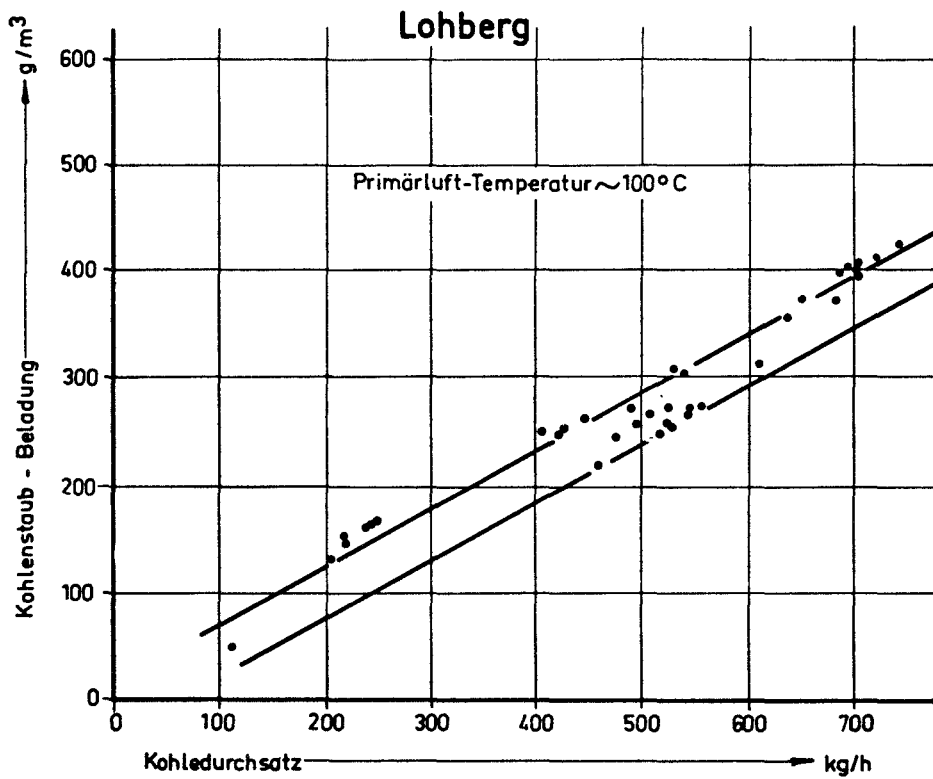


Abb. 33 a, b : Kohlenstaubbeladung des Primärluftstroms als Funktion der Kessellast (Lohberg, Auguste Viktoria)

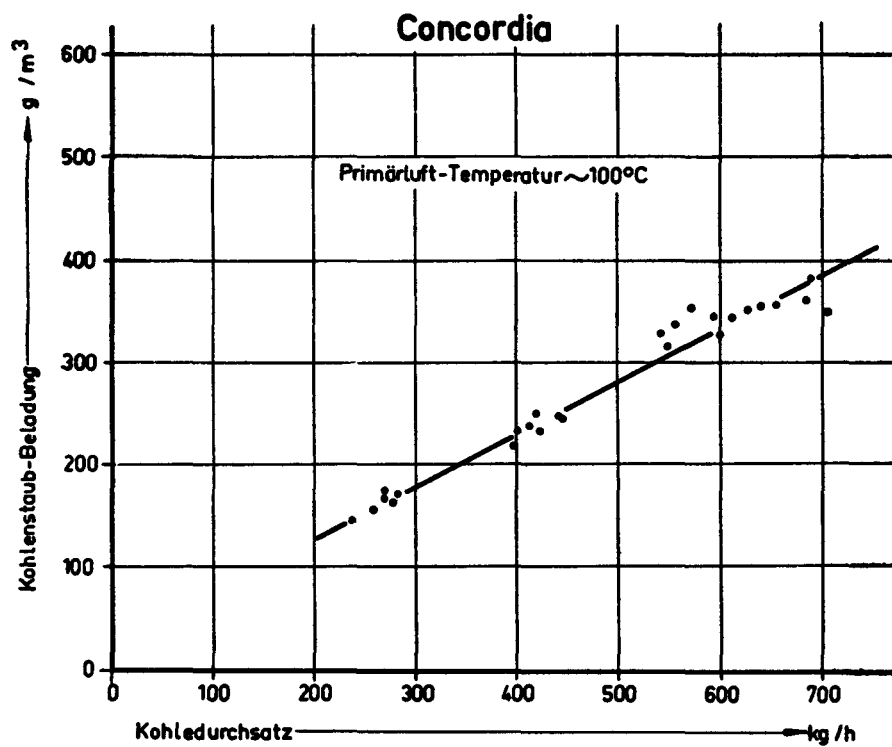
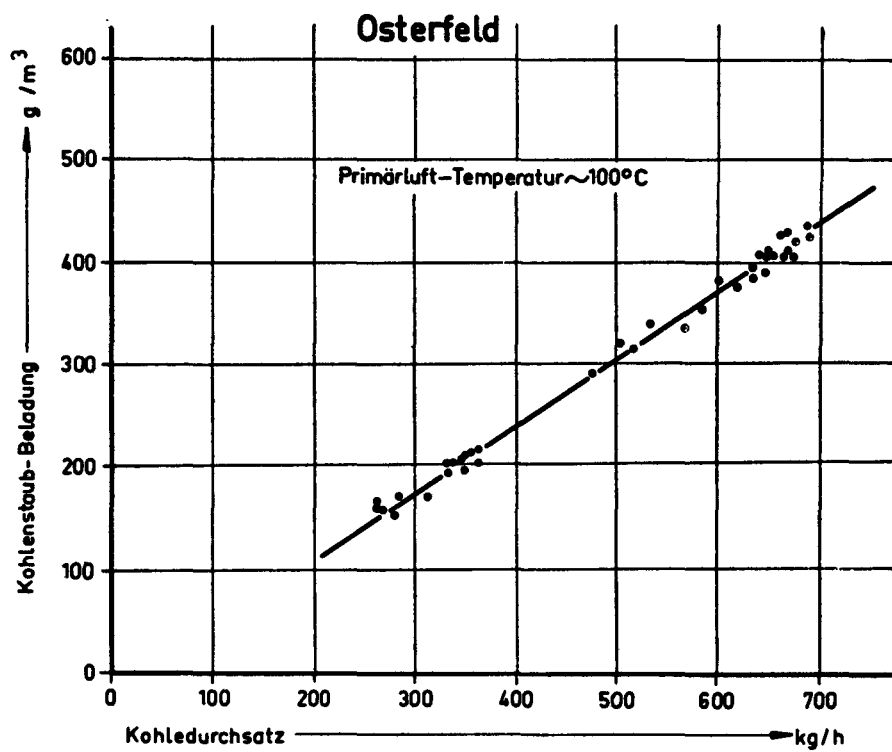


Abb. 33 c, d : Kohlenstaubbeladung des Primärluftstroms als Funktion der Kessellast (Osterfeld, Concordia)

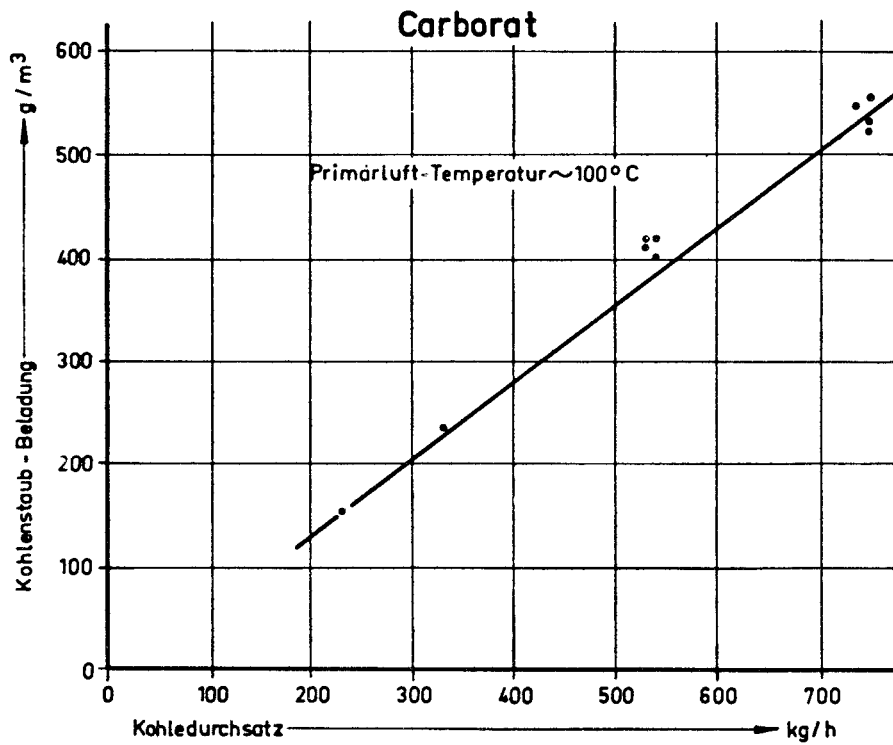


Abb. 33 e : Kohlenstaubbeladung des Primärluftstroms als Funktion der Kessellast (Carborat)

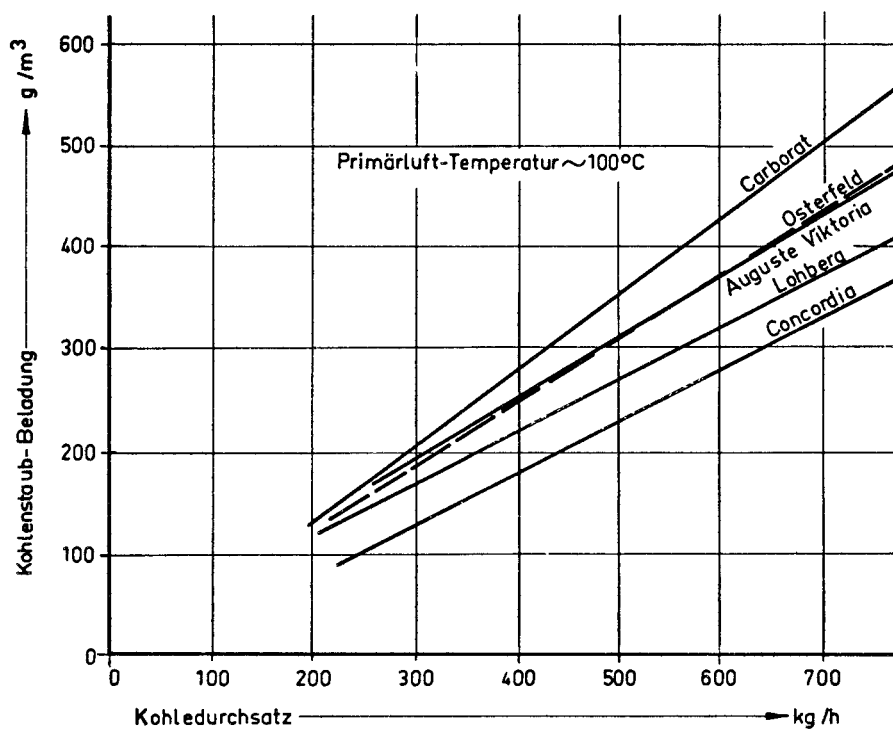


Abb. 34 : Kohlenstaubbeladung bei den einzelnen Kohlenarten (Zusammenfassung der Ergebnisse)



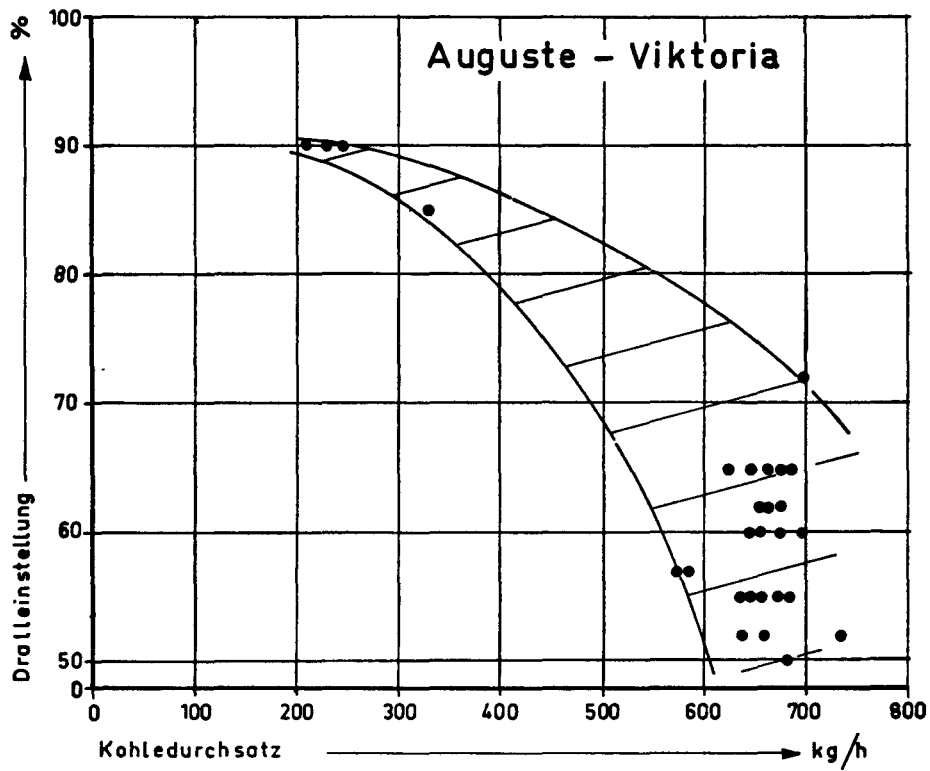
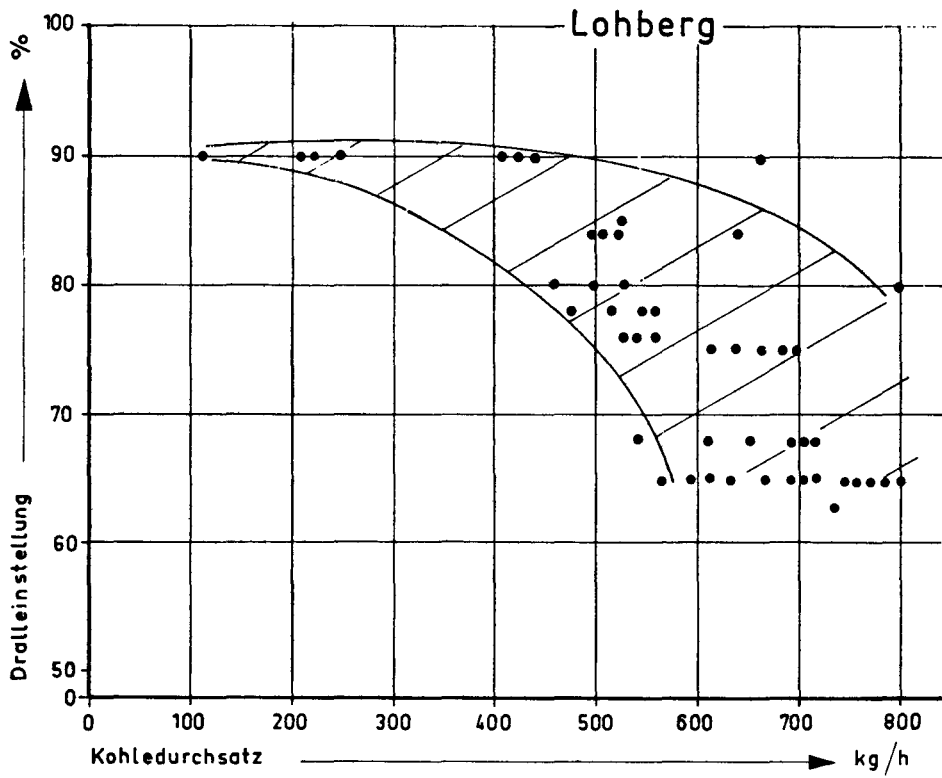


Abb. 35 a, b : Dralleinstellbereich des Rundbrenners bei den verschiedenen Kohlenarten als Funktion des Brennstoffdurchsatzes (Lohberg, Auguste Victoria)

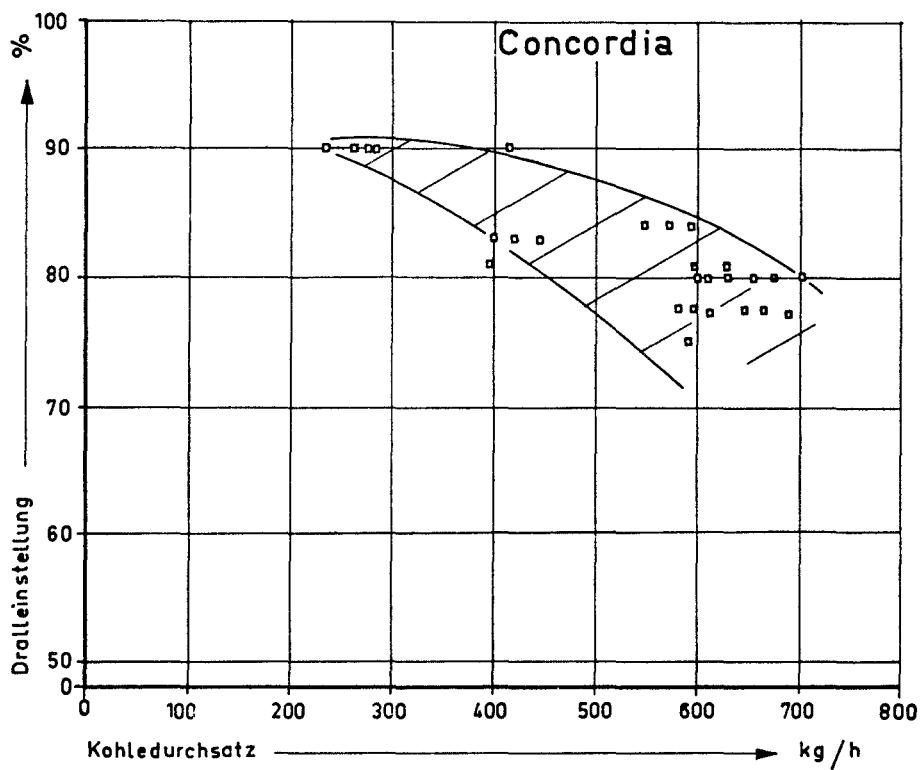
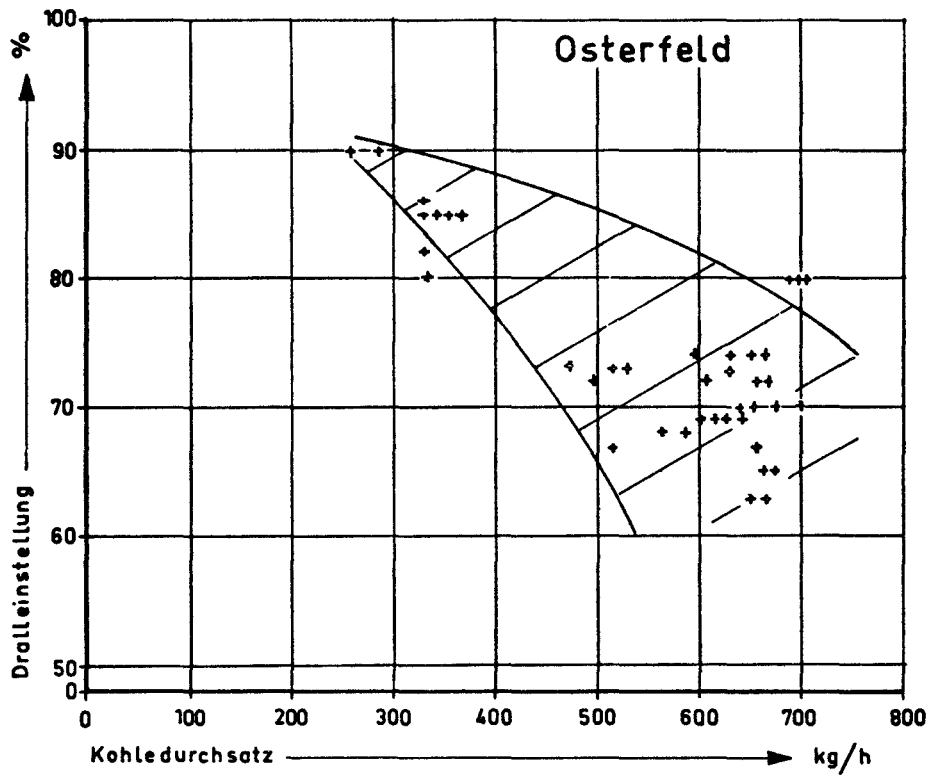


Abb. 35 c, d : Dralleinstellbereich des Rundbrenners bei den verschiedenen Kohlenarten als Funktion des Brennstoffdurchsatzes (Osterfeld, Concordia)

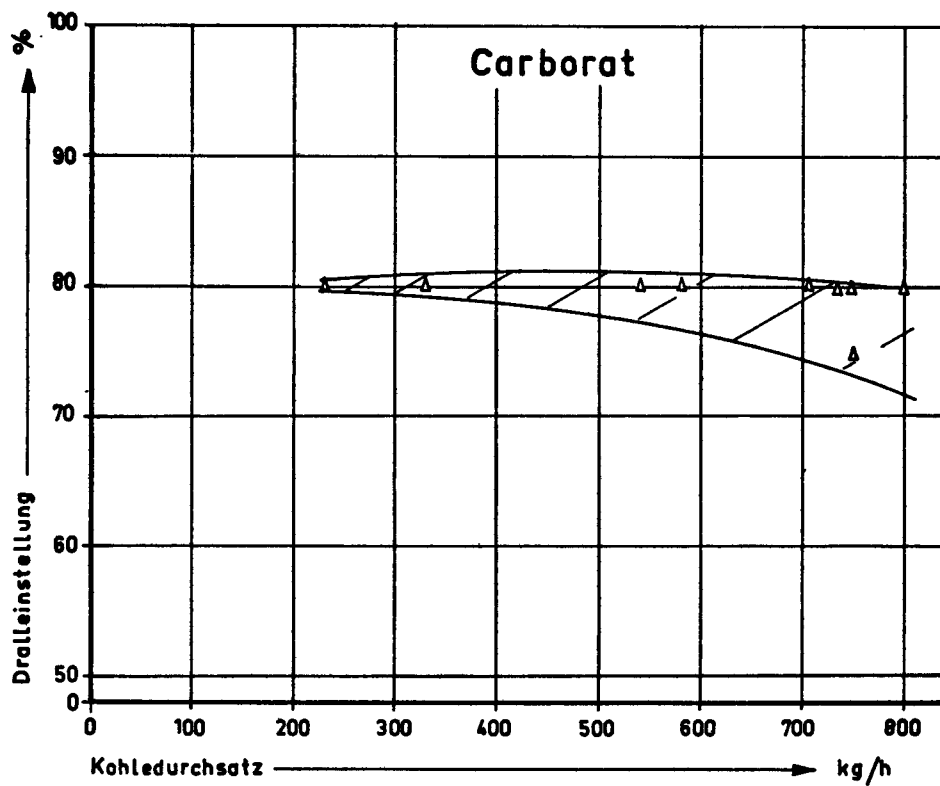


Abb. 35 e : Dralleinstellbereich des Rundbrenners bei den verschiedenen Kohlenarten als Funktion des Brennstoffdurchsatzes (Carborat)

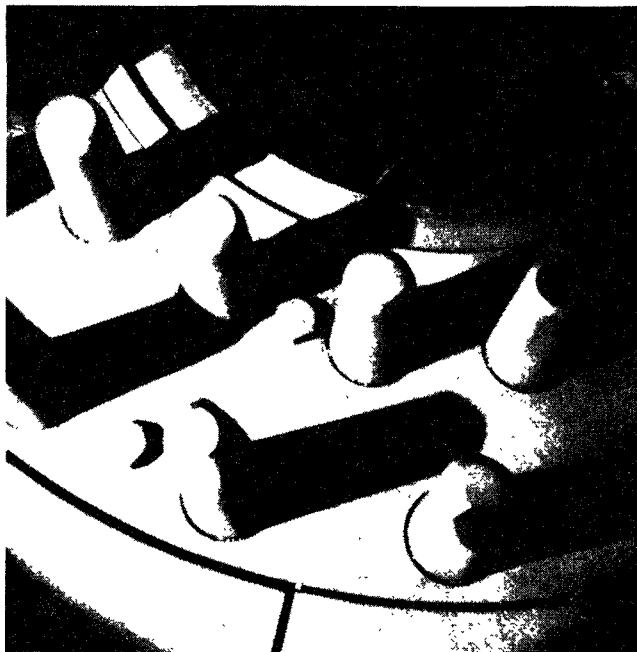
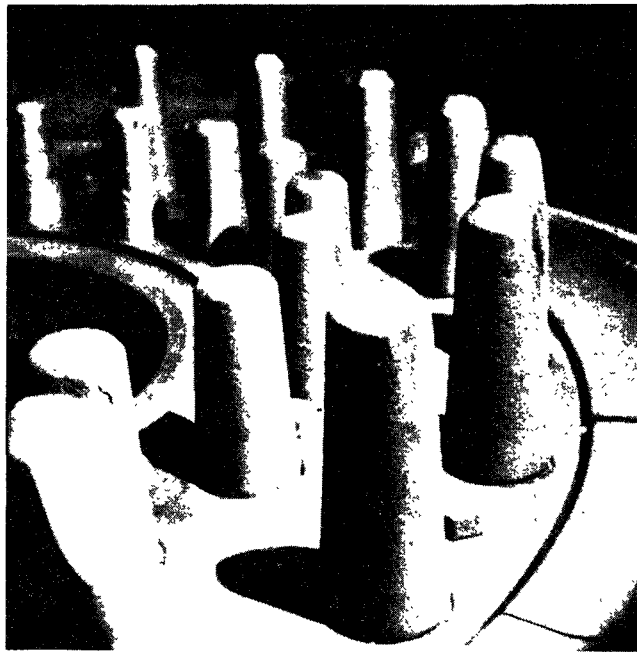


Abb. 36 : Verschleiß der Attritor-Mühle nach 800 Betriebsstunden. Fotografie der Statorzapfen

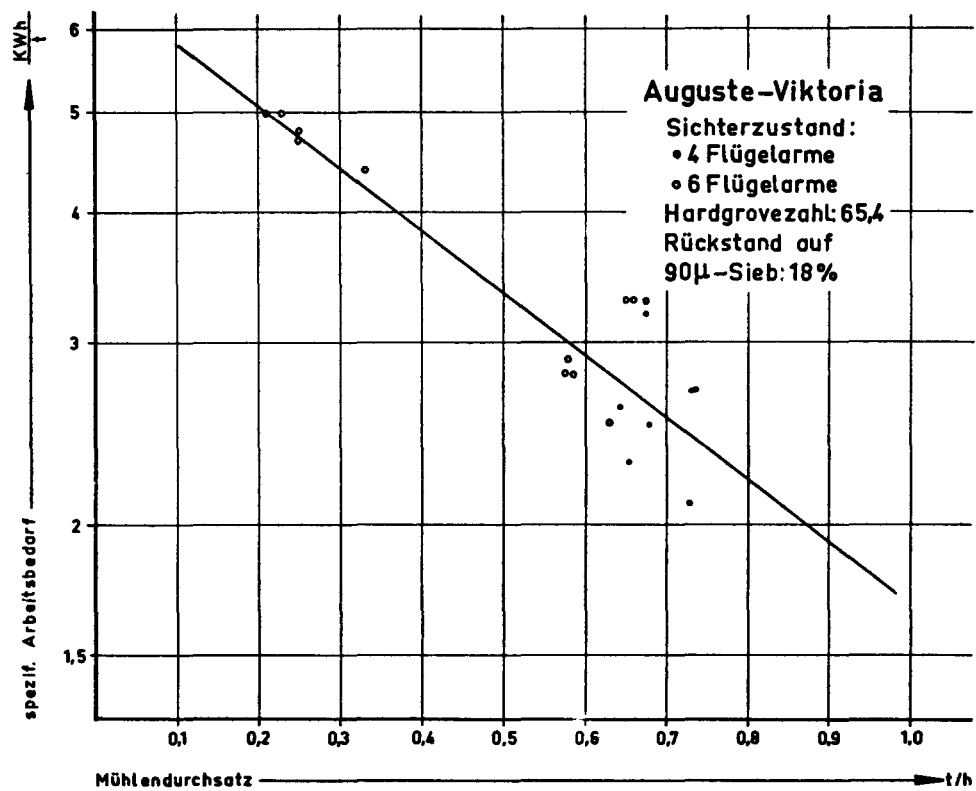
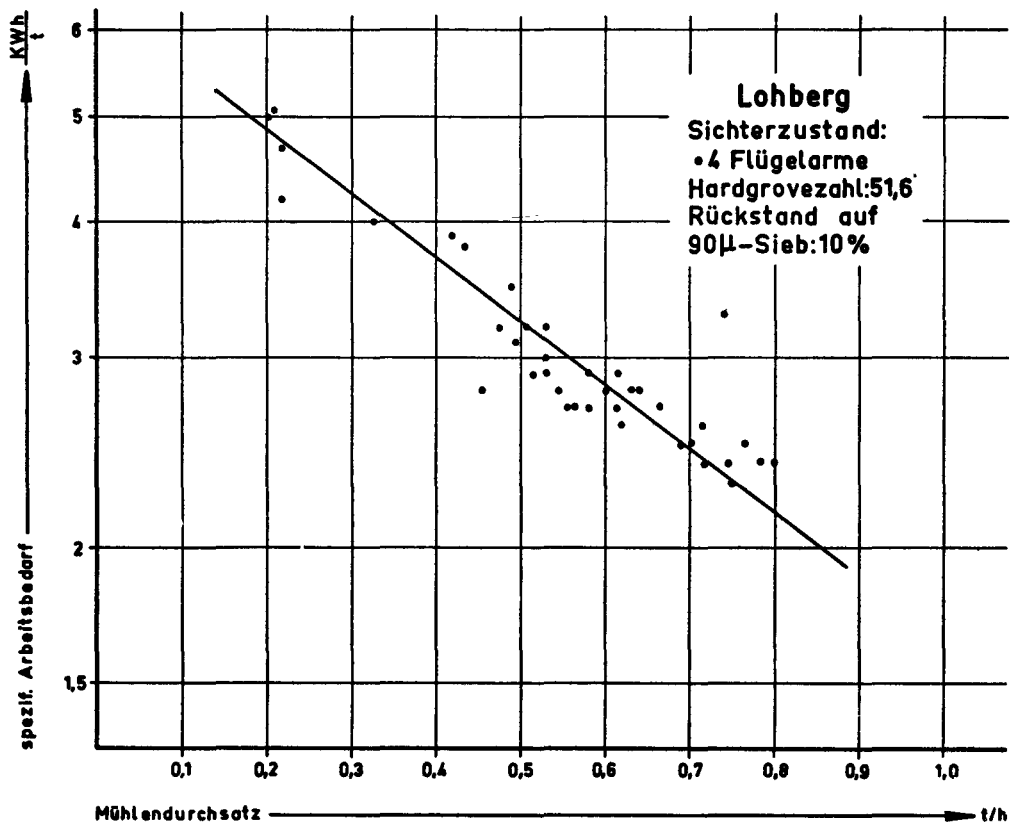


Abb. 37 a, b : Spezifischer Arbeitsbedarf der Attritor-Mühle als Funktion des Brennstoffdurchsatzes (Lohberg, Auguste Victoria)

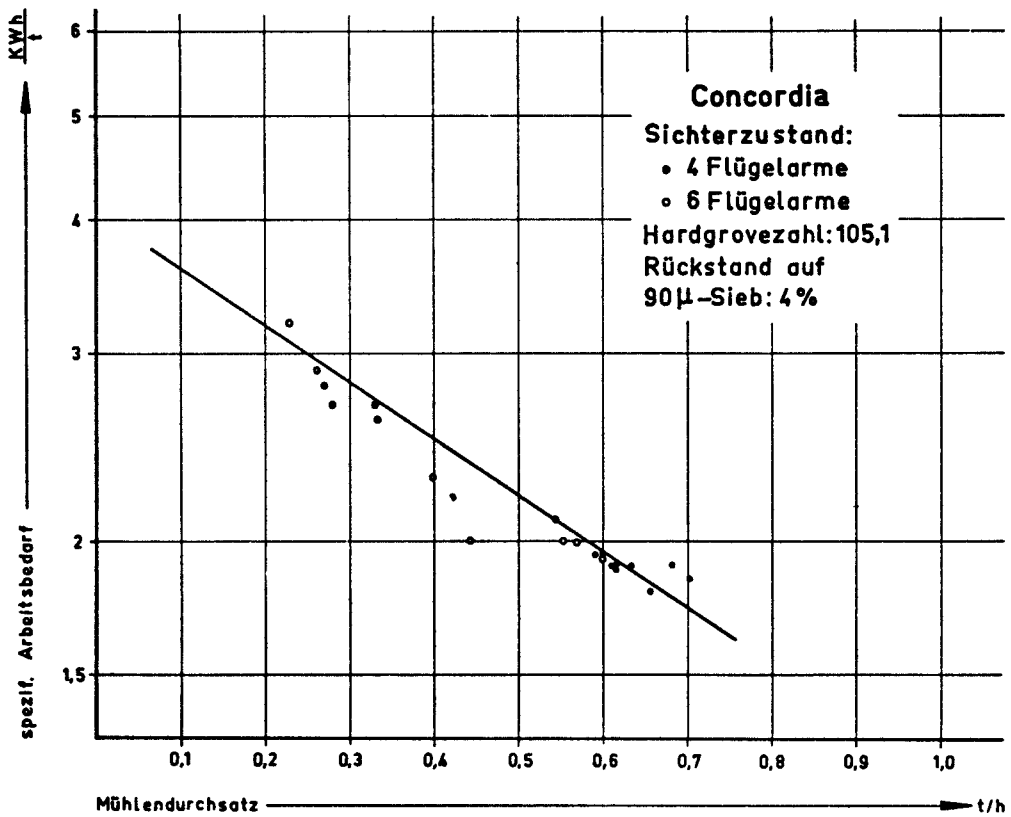
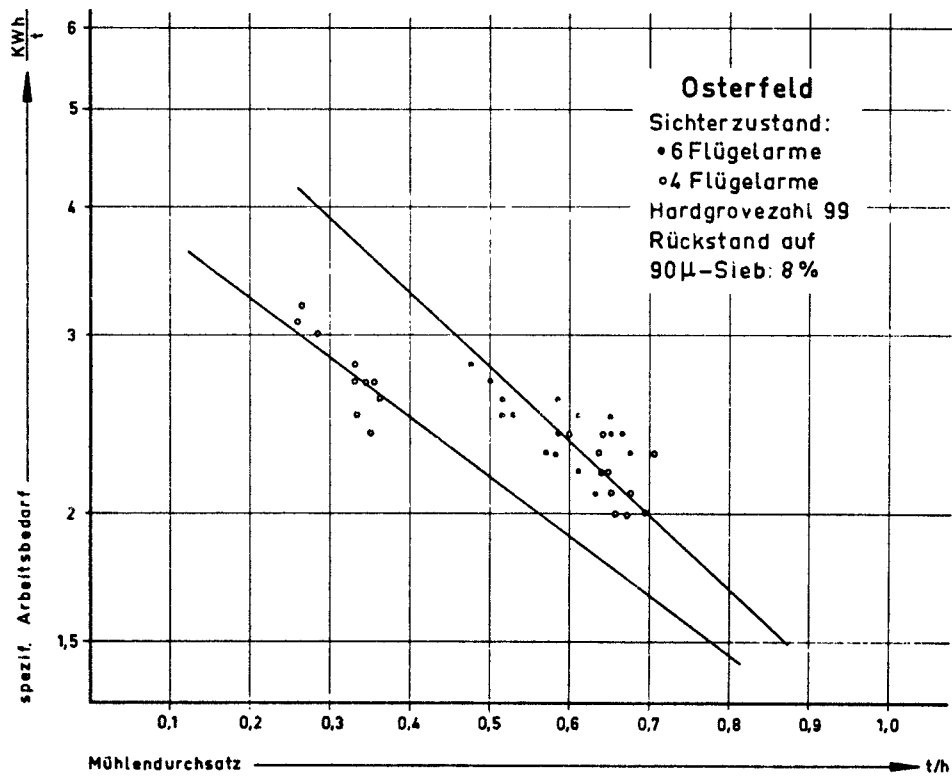


Abb. 37 c, d : Spezifischer Arbeitsbedarf der Attritor-Mühle als Funktion des Brennstoffdurchsatzes (Osterfeld, Concordia)

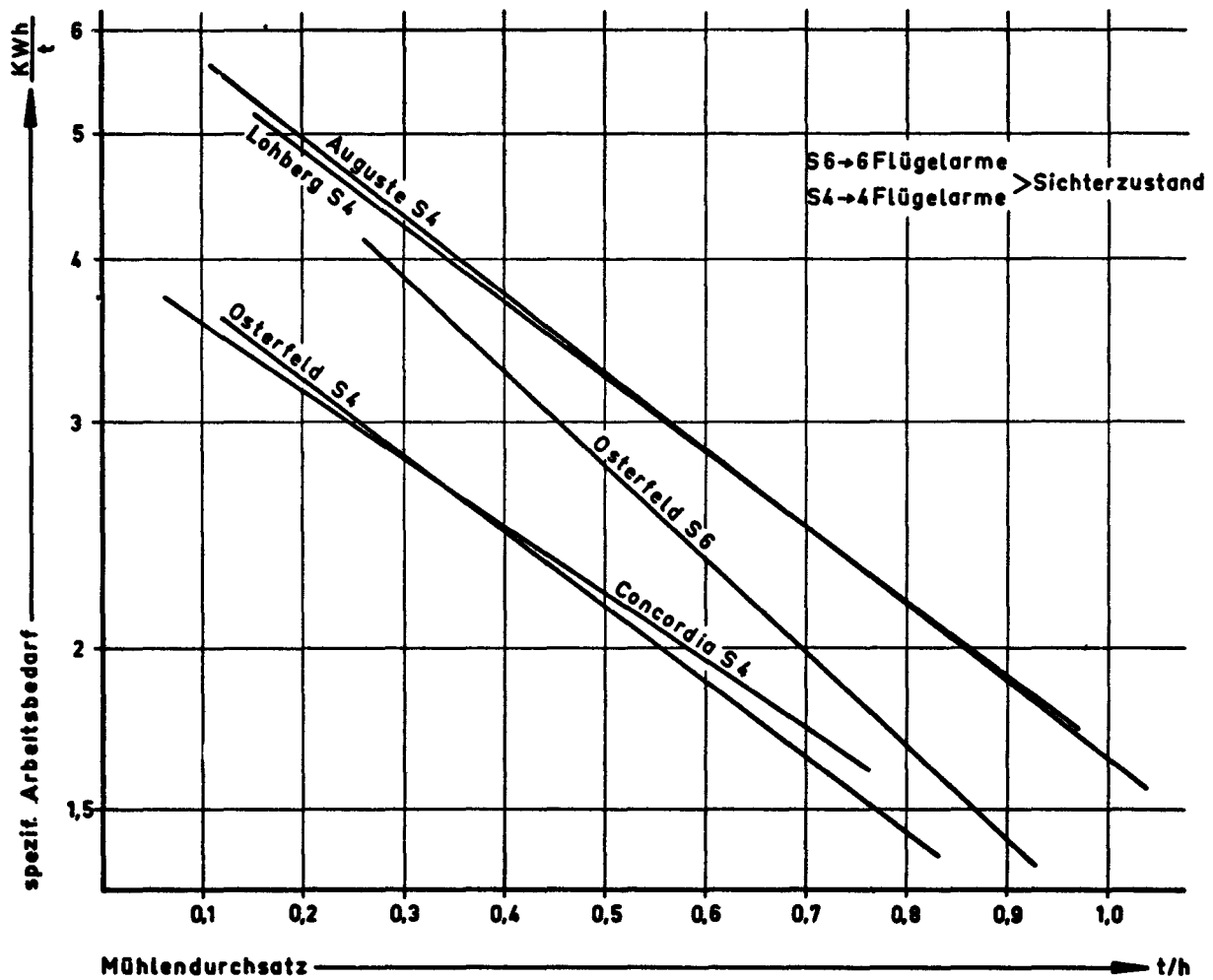


Abb. 38 : Vergleich des spezifischen Arbeitsbedarfs der Attritor-Mühle bei verschiedenen Kohlenarten

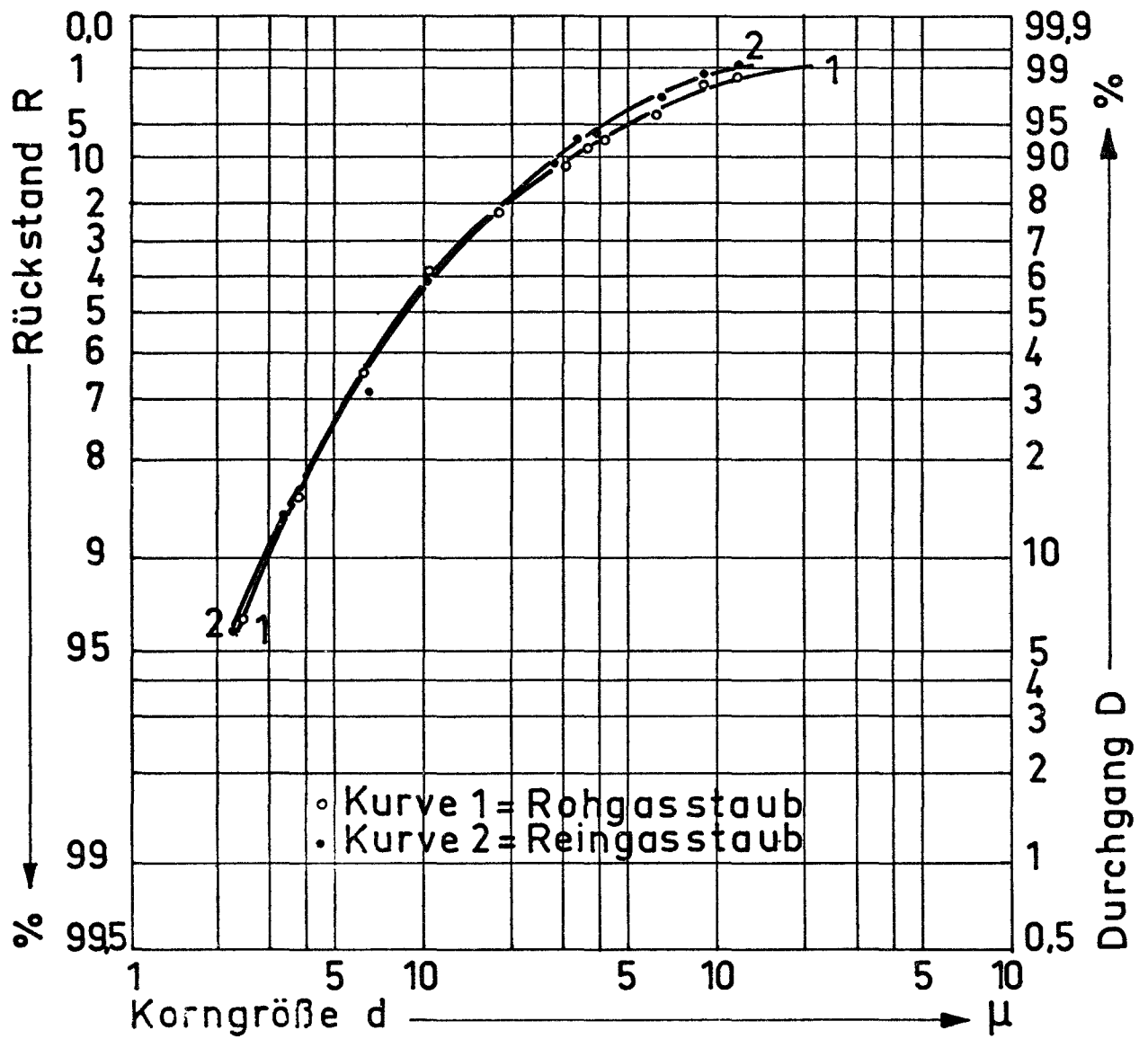


Abb. 39 : Körnungskennlinien des Flugstaubs vor (Rohgasstaub) und nach (Reingasstaub) Passieren des Lühr-Filters



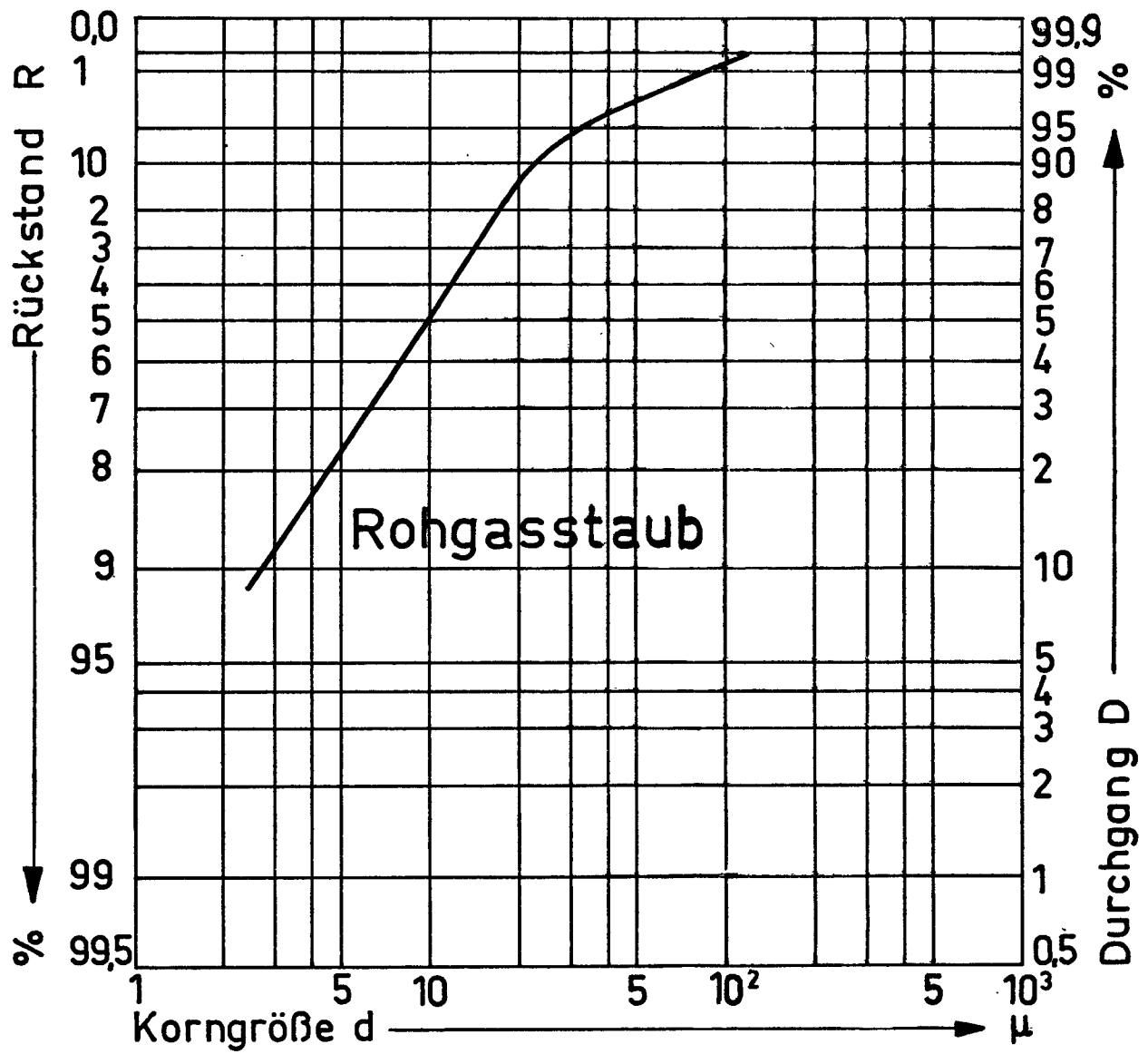


Abb. 40 : Körnungskennlinien des in den Drehströmungsentstauber gelangenden Rohgasstaubs



**Bisherige technisch-wirtschaftliche Veröffentlichungen  
der Generaldirektion „Kohle“ der Hohen Behörde**

Dok. Nr.	Titel	Jahr	Sprachen	Preis in EWA-RE
9591/1/59/1	Schnelles Auffahren von Strecken im Gestein und in der Kohle	1959	d	2,50
6740/1/60/1	Rationalisierungsmaßnahmen im Steinkohlenbergbau	1960	d, f	2,50
11848/2/66/1	Modernisierung und Rationalisierung im Saarbergbau und im lothringischen Revier	1966	d, f	3,00
<b>Forschungshefte Kohle</b>				
11466/1/65/1	1 — Beschickung von Koksöfen mit vorerhitzter Kohle	1966	d, f, i, n	1,50
11734/1/66/1	2 — Verbrennung von Kohle	1966	d, f, i, n	1,50
11735/1/66/1	3 — Zündung und Verbrennung von Fettkohlen auf Rosten	1966	d, f, i, n	1,50
12546/1/66/1	4 — Mechanisierung der Auffahrung von Gesteinsstrecken - Streckenvortriebsmaschine SVM 40	1966	d, f	1,50
12633/1/66/1	5 — Kompakt-Wasserrohrkessel mit Schüttelrosten	1966	d, f	1,50

Weitere Exemplare des vorliegenden Berichtes können ebenso wie die oben aufgeführten Veröffentlichungen bezogen werden beim

Zentralvertriebsbüro der Veröffentlichungen  
der Europäischen Gemeinschaften

Luxemburg, Goethestraße 9

