

# **Optimierung eines Gleichstromvergasers im industriellen Massstab für die Verga- sung von feuchten Holzschnitzeln und Altholz und Entwicklung der trockenen Gasreinigung**

Projekt Nr. 32603 Vertrag Nr. 72501

Ausgearbeitet durch

**PYROFORCE Energietechnologie AG**  
**CH-6020 Emmenbrücke**

Im Auftrag des

**Bundesamtes für Energie**

Schlussbericht Juli 2002

**Auftraggeber:**

Forschungs- und P+D Programm Biomasse des  
Bundesamtes für Energie

**Auftragnehmer:**

PYROFORCE Energietechnologie AG  
Reusseggstrasse 17  
CH-6020 Emmenbrücke  
Tel. 041 420 44 33, Fax 041 420 44 76 • [welcome@pyroforce.ch](mailto:welcome@pyroforce.ch)

**Autoren / Koautoren:**

Dr. B. Meyer, H. Gemperle, H. Gürber, R. Mörgeli

**Begleitgruppe:**

Dieses Dokument ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie erarbeitet worden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist alleine der/die Autor/in/en verantwortlich.

**Bundesamt für Energie BFE**

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • [office@bfe.admin.ch](mailto:office@bfe.admin.ch) • [www.admin.ch/bfe](http://www.admin.ch/bfe)

**Vertrieb:****ENET**

Egnacherstrasse 69 · CH-9320 Arbon  
Tel. 071 440 02 55 · Tel. 021 312 05 55 · Fax 071 440 02 56  
[enet@temas.ch](mailto:enet@temas.ch) · [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) · [www.energie-schweiz.ch](http://www.energie-schweiz.ch)

Schlussbericht 2002, Juli 2002

# Optimierung eines Gleichstromvergaser im industriellen Massstab für die Vergasung von feuchten Holzschnitzeln und Altholz und Entwicklung der trockenen Gasreinigung

Autor und Koautoren	Dr. B. Meyer, H. Gemperle, H. Gürber, R. Mörgeli
Beauftragte Institution	PYROFORCE Energietechnologie AG
Adresse	Reusseggstrasse 17, CH-6020 Emmenbrücke
Telefon, E-mail, Internet-Adresse	041 - 420 44 33, welcome@pyroforce.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	32603 / 72501
Dauer des Projekts	17. Mai 1999 – Mitte Juli 2002

## ZUSAMMENFASSUNG

Nach Abschluss des Vertrages mit dem Bundesamt für Armeematerial und Bauten im Mai 1999 wurde im AC-Zentrum Spiez eine Holzvergasungsanlage bestehend aus Holzschnitzellagerung und -transport, Gleichstromvergaser, trockener Gasreinigung, Fackel und Blockheizkraftwerk (BHKW) mit 200 kW<sub>el</sub> Leistung erstellt. Auf dieser Anlage wurde in den Jahren 2000 bis Mitte 2002 ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt durchgeführt. Die gesteckten Ziele der Projektarbeit wurden nicht alle erreicht. Die beiden angesetzten 150-Stunden-Dauertests mit den entsprechenden Messkampagnen mussten aufgrund technischer Defekte der Anlage abgesetzt werden. Eine Neuaufnahme dieses Tests ist vorerst nicht vorgesehen.

Im Mittelpunkt des Forschungs- und Entwicklungsprojektes stand die Entwicklung der trockenen Gasreinigung. Die Zielvorgabe war, dass sich die trockene Gasreinigung mindestens 500 Betriebsstunden im Zusammenspiel mit dem Vergaser und Motor bewährt. Die Gasreinigung bestand ursprünglich aus einem Zyklon, einem Rohrbündelwärmetauscher, einer Dosiereinrichtung für pulverförmige Adsorptionsmittel, einem Gewebefilter und einer Waschkolonne. Letztere hat hauptsächlich die Aufgabe, das Gas vor der Verwendung im BHKW weiter abzukühlen. Eine besondere Herausforderung stellte die Optimierung der

Betriebsweise des Gewebefilters und die optimale Wahl des Filtermaterials dar. Die Gasreinigung wurde nachträglich durch einen Koaleszenzfilter auf der Druckseite des Gebläses zwischen der Gasreinigung und dem BHKW ergänzt.

In der Anlage traten ab einer elektrischen Motorenleistung von 160 kW<sub>el</sub> Probleme mit einer kurzfristig stark schwankenden Gaszusammensetzung und der Kondensation von teerartigen Stoffen in den Filtern der Gasstrasse des BHKW's auf. Es ist offensichtlich, dass diese Teere vor allem während dieser kurzen aber sehr deutlichen Konzentrationsschwankungen auftreten. Daraus entstandene Verstopfungen und Verklebungen mussten gereinigt werden und führten somit jeweils zu längeren Betriebsunterbrüchen. Ebenso wie verfahrenstechnische, mussten auch technische Probleme erkannt werden. Im Mittelpunkt standen hauptsächlich temperaturbedingte, materialspezifische Fehlauslegungen sowie messtechnische Störungen. Bei BHKW-Betriebsstunde 432, musste die Anlage infolge eines grösseren Anlageschadens Ende Dezember 2001 ausser Betrieb genommen werden. Sie stand dann über 5 Monate still. Diese Zeit wurde von der PYROFORCE Energietechnologie AG, ihren Planungspartnern und den beteiligten Bundesstellen sowie deren Beratern genutzt, um den Stand des Projektes genau zu untersuchen und die daraus notwendigen Umbauten, Anpassungen, Optimierungen und Umstellungen einzuleiten. Ende Mai 2002 war die Anlage wieder betriebsbereit. Im Einverständnis mit dem Bundesamt für Energie (BFE) hat die PYROFORCE Energietechnologie AG beschlossen, den Betrieb der Anlage vorerst auf 100 kW<sub>el</sub> zu begrenzen um möglichst viele Betriebsstunden zu erlangen und um erste weitere Störungsquellen zu erkennen, diese aufzuzeigen und zu beheben. Seit Wiederaufnahme des Anlagenbetriebs wurden bis Mitte Juli 2002 weitere 570 erfolgreiche Betriebsstunden im Zusammenspiel zwischen Vergaser, trockener Gasreinigung und BHKW gefahren. Mittlerweile wurden mit über 1'000 Betriebsstunden rund 125'000 kW<sub>el</sub> und 190'000 kW<sub>therm</sub> produziert und ins Netz eingespiesen.

Im AC-Zentrum Spiez steht heute eine auf dem neusten Stand der Technik entsprechende Holzvergasungsanlage, die es erlaubt, Erfahrungswerte zu sammeln welche für den Betrieb und Unterhalt der Anlage notwendig und kostenrelevant sind. Der sichere Betrieb der Anlage lässt heute zu, viele für die Wissenschaft interessante Messprogramme durchzuführen, die effektive Strom- und Wärmeproduktion zu erfassen und sicherheitstechnische Installationen zu überprüfen um Standards zu erarbeiten. In Zukunft werden alle Anstrengungen dahingehend konzentriert, um Anwendungsmöglichkeiten für die Praxis zu erhalten. Dieses Ziel wird erreicht, wenn die Anlage vorerst weiter unter Beaufsichtigung gefahren und betreut wird und weiterhin die Unterstützung aller im Projekt involvierten Stellen erfährt. Wir schlagen deshalb vor, mit dem Know-how der PYROFORCE Energietechnologie AG und der Unterstützung durch das BFE, ein zweijähriges Begleit- und Demonstrationsprojekt durchzuführen um die Anlage weiter zu optimieren, schrittweise die Leistung zu steigern und möglichst viele Betriebsstunden- und somit Erfahrungen für die Biomasseverstromung zu gewinnen.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>1. Ausgangslage</b>	<b>3</b>
<b>2. Projektziele</b>	<b>3</b>
<b>3. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse</b>	<b>4</b>
3.1 Erweiterte Zusammenfassung	4
3.1.1 Komponenten der Vergasungsanlage	6
3.1.2 Erster Dauertest	8
3.1.3 Betriebsphase November und Dezember 2001	12
3.1.4 Phase von Januar bis Mai 2002	14
3.1.5 Betriebsphase von Ende Mai bis Mitte Juli 2002	15
<b>4. Nationale Zusammenarbeit</b>	<b>17</b>
<b>5. Internationale Zusammenarbeit</b>	<b>17</b>
<b>6. Bewertung und Ausblick</b>	<b>17</b>

## 1. Ausgangslage

Die PYROFORCE Energietechnologie AG wurde, gestützt auf ihr Angebot vom 5. März 1998 sowie ihrem Nachtragsangebot vom 8. April 1999 für das AC Zentrum Spiez mit der Lieferung, Montage und Inbetriebnahme einer kompletten Holzvergasungsanlage beauftragt. Diese Anlage wurde zudem mit einer Brennstofftrocknungsanlage ausgerüstet.

Gegenüber der Bauherrschaft (Bundesamt für Armeematerial und Bauten, BAB) zeichnete die PYROFORCE Energietechnologie AG als Generalunternehmer verantwortlich. Während die PYROFORCE Energietechnologie AG intern für die Konzeption, das Engineering, den Bau und Betrieb der kompletten Vergasungsanlage verantwortlich zeichnete, lagen die Konzeption, das Engineering und der Betrieb der Trocken-Gasreinigung beim Subunternehmer CTU, CT Umwelttechnik AG, Winterthur, sowie bei den Jenbacher Motorenwerke AG, Jenbach und der EWE als Subunternehmer, zwischenzeitlich auf die IWK AG, Zürich, übergegangen, für das Blockheizkraftwerk (BHKW). Die so konzipierte Holzvergasungsanlage mit einer maximalen Leistung von 200 kW<sub>el</sub> und 260 kW<sub>therm</sub> eignete sich hervorragend für die Durchführung eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes. Das entsprechende Gesuch für die Optimierung eines Gleichstromvergasers im industriellen Massstab für die Vergasung von feuchten Holzschnitzeln und Altholz und Entwicklung der trockenen Gasreinigung wurde dem Bundesamt für Energie (BFE) 1999 eingereicht. Das Projekt sollte im Jahr 2001 abgeschlossen werden. Bedingt durch den massiv erhöhten Aufwand für die baulichen Massnahmen und den langwierigen Prozessen zur Erlangung einer ausreichenden Zuverlässigkeit der Arbeitsweise der Gesamtanlage, konnte der Terminplan für das Forschungsprojekt jedoch nicht eingehalten werden.

## 2. Projektziele

Bei der Holzvergasung wird durch einen thermischen Prozess ein brennbares Gas (Holzgas) aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz gewonnen. Dieses Gas muss vorerst gekühlt und gereinigt werden. Danach kann es in einem Verbrennungsmotor zur Erzeugung elektrischer Energie genutzt werden. Diese Methode der Energieerzeugung ist nahezu CO<sub>2</sub>-neutral. Die nachhaltige Energieerzeugung und die Nutzung heimischer Energiequellen stehen im Zentrum der Bemühungen um die Holzvergasung.

Gegenstand des Forschungs- und Entwicklungsprojektes bildete die Optimierung der Gesamtanlage. Im Zentrum stand dabei die trockene Gasreinigung im Vergleich zur nassen Gaswäsche. Diese Verfahrensführung erfordert eine etwas komplexere technische Ausrüstung, erlaubt jedoch die Vergasung von kontaminierten Brennstoffen (Altholz).

Folgende Anlagenbereiche sollten bearbeitet werden:

- Optimierung des Betriebes des Vergasers. Ein Kaltgaswirkungsgrad von  $\geq 75\%$  wurde angestrebt.
- Optimierung des Betriebes der Gasreinigung (kurzfristig auch Altholz und belastete Brennstoffe)
- Optimierung der Energieausnutzung (Nutzung der Wärme aus dem Rohgaskühler, zur Trocknung von feuchtem Waldholz)
- Optimierung des Betriebes des Blockheizkraftwerkes (BHKW)
- Einhaltung der relevanten LSV-Vorschriften im Abgas des BHKW
- Nachweis der Eignung zum Betrieb ohne ständige Beaufsichtigung
- Nachweis der umwelt- und sicherheitstechnischen Einrichtungen sowie die Erreichung der Konformität

Im weiteren wurde folgende Reingasqualität angestrebt:

Tabelle 1: Ziele der Trockengasreinigung

Parameter	Wert
Staub gesamt	$< 10 \text{ mg/Nm}^3$
Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	$\Sigma < 0.5 \text{ mg/Nm}^3$
Cd, Hg	$< 0.05 \text{ mg/Nm}^3$
HCl	$< 20 \text{ mg/Nm}^3$
Teere, schwerflüchtig	$< 10 \text{ mg/Nm}^3$
PAK (Naphtaline)	$< 50 \text{ mg/Nm}^3$
Phenole	$< 50 \text{ mg/Nm}^3$
Temperatur	$< 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Feuchtigkeit	$< 80 - 90 \%$

Zur Beurteilung des Projektfortschrittes sollten Messungen durchgeführt werden. Die Erfassung der Roh- und Reingasparameter und Auswertung sollten eine Beurteilung der Gasreinigung und der Gasqualität für den Motor erlauben.

- Vergaser: Messung der Rohgaszusammensetzung und Berechnung des Kaltgaswirkungsgrades.
- Gasreinigung: Analyse der Reingasqualität und Erfassung des Waschwassers und des Kondensats sowie der Zyklon- und der Filterasche. Das Messprogramm wurde auf die Optimierung der Gasreinigung ausgerichtet.
- BHKW: Überwachung der Motorenkomponenten, von Motorenöl, Katalysator und Abgaswerten.
- Gesamtanlage: Zum Erfolgsnachweis sollte die Anlage während 500 Stunden unterbrechungsfrei betrieben werden, 150 Stunden davon gemäss dem standardisierten 150 Stundentest (jedoch mit reduziertem Messprogramm).

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

#### 3.1 Erweiterte Zusammenfassung

Die baulichen Voraussetzungen für die Erstellung der Anlage wurden im Auftrag des Bundesamtes für Armeematerial und Bauten geschaffen. Hierfür wurde die bestehende Heizzentrale angepasst und ein Schnitzelsilo vor dem Gebäude erstellt. Danach wurden die **Komponenten der Vergasungsanlage (3.1.1)** installiert und durch Fördersysteme respektive Rohrleitungen miteinander verbunden. Daneben wurde ein Ölkessel für die Abdeckung der Spitzenlast installiert, sowie die Anpassungsarbeiten an den Sanitärinstallationen, die Einbindung in das Heizungssystem, die Elektroinstallationen und die Anpassung an die übergeordnete Steuerung vorgenommen. Nach der Fertigstellung der Anlage, wurde diese für ausführliche Tests und Optimierungsaufgaben in Betrieb gesetzt.

Das Schnitzelzufuhrsystem, der Vergaser und die Fackel, konnten im Oktober 2000 in Betrieb genommen werden. Die Holzgasqualität bei ca. 20-prozentiger Teillast war so gut, dass ein unterbrechungsfreier Betrieb der Fackel ohne Stützflamme über mehrere Stunden völlig problemlos war.

Danach wurde mit der Inbetriebnahme der Gasreinigung begonnen. Erhebliche Probleme beim Rohrbündelwärmetauscher und dem Gewebefilter, wie auch der Betrieb der MSR-Technik und die noch ungleichmässige Rohgaszusammensetzung, führten zu einer 3-monatigen Inbetriebnahmephase. Die Abstimmung und das Zusammenspiel der bis dato noch nie erprobten Anlagenkonfiguration erwies sich viel komplexer als angenommen. Versuche mit verschiedenen Gewebefilterprodukten, die Zusammensetzung und Menge an dosierten Adsorptionsmittel wie auch die Dauer und Frequenz der Abreinigungsimpulse mit Stickstoff, führten zunehmend zu signifikanten Funktionsverbesserungen der Gasreinigung, wobei die getesteten Lösungen noch über weiteres Optimierungspotential verfügen.

Infolge des sehr trockenen Brennstoffes, einer Fehlmanipulation durch die Inbetriebnahme-Crew sowie inbetriebnahmespezifischer „Handsteuerung“, ereignete sich anfangs Februar 2001 ein Brandfall in der Schnitzeltrocknungsanlage. Glücklicherweise und dank dem raschen Handeln der Personen vor Ort wie auch der Feuerwehr Spiez, wurde niemand verletzt und der Sachschaden hielt sich in Grenzen. Die Inbetriebnahme des Blockheizkraftwerkes (BHKW) verzögerte sich jedoch um einen weiteren Monat auf Mitte März 2001. Von April 2001 bis Ende Mai 2001 wurden erste Erfahrungen über den gesamten Betrieb der Anlage gesammelt. In dieser Zeit lieferte das BHKW über 210 Stunden elektrische und thermische Energie. Stete Ergänzungen, Modifikationen und veränderte Fahrweise am Gesamtsystem ermöglichte den Beginn des am 5. Juni 2001 angesetzten **ersten Dauertests (3.1.2)** auf Vollast.

Dabei traten periodisch (ca. vier mal pro 24 Stunden) Unregelmässigkeiten des Vergaserbetriebes auf, die zu zeitlich erhöhten Teerkonzentrationen und zu einer Störung des BHKW-Betriebes führten. Aus diesem Grund wurde der Test nach etwas mehr als 60 Stunden beendet. Da diese Periode messtechnisch genau verfolgt wurde, werden die dabei gewonnenen Ergebnisse in diesem Bericht dargestellt.

In den darauffolgenden vier Monaten wurden die gewonnen Ergebnisse intern genau untersucht und ausgewertet. Es erfolgten An- und Umbauten am Reaktor sowie diverse Ergänzungen und Nachrüstungen an der Gasreinigung. Speziell zu erwähnen ist eine Wärmehochhaltung beim Wärmetauscher, der Einbau von zusätzlichen Stickstoffimpulsrohre zur Abreinigung des Gewebefilters und der an verschiedenen Punkten der Gasstrasse versuchsweise Einbau eines Koaleszenzabscheiders. Beim BHKW wurde eine neue, teerbeständigere Gasregelstrecke nachgerüstet und optische Kontrollen des Kraftwerkes durchgeführt, sowie die Gasdruckregelung ersetzt und angepasst. Alle diese neuen Elemente mussten in die MSR-Technik integriert und die neuen steuerungstechnischen Abhängigkeiten verändert, ergänzt und optimiert werden. Ende Oktober 2001 konnte der Betrieb der Anlage mit veränderter Fahrweise, beim Stand von 270 BHKW-Betriebsstunden, wieder aufgenommen werden. Signifikante Verbesserungen und eine drastische Reduzierung der Störungen ermöglichten es, während **der Betriebsphase November und Dezember 2001 (3.1.3)**, bei einer Leistung von durchschnittlich 170 kW<sub>el</sub>, mit dem BHKW zusätzliche 160 Betriebsstunden zu fahren.

Anhand der Erfahrungen, welche nach dieser erneuten Inbetriebsetzung der Anlage gesammelt werden konnten, und nachdem das Zusammenspiel zwischen Reaktor, Gasreinigung und BHKW weiter systematisch optimiert wurde, stand aus technischer Sicht einem erneuten zweiten 150-Stunden-Dauertest und dem erfolgreichen Abschluss des Projekts nichts mehr entgegen. Vorbereitend auf den am 14. Dezember 2001 angesetzten Test, wurde die ganze Anlage einer gründlichen Inspektion und Reinigung unterzogen. Bereits in der Anfangsphase des Tests bemerkte das Betriebspersonal auf dem On-Line-Gasmessgerät eine noch nie beobachtete schlechte Rohgaszusammensetzung mit über 5% Sauerstoffgehalt. Diese Gaszusammensetzung reichte nicht aus, damit das BHKW ein gutzündbares Brenngas mischen konnte. Ein ständiges automatisches An- und Abfahren des Triebwerkes war die Folge. Einzige Erklärung für den überhöhten Sauerstoffanteil im Gas konnte nur eine Leckstelle in der Rohgasstrecke sein. Der Test wurde daraufhin abgebrochen und es konnten keine Messungen durch die Verenum durchgeführt werden. Eine Analyse der Anlage ergab, dass der Flansch vor dem Rohgas-



zyklon bei den vorangegangenen Inspektionsarbeiten nicht dicht verschlossen wurde. Der Eintritt von Umgebungsluft in das System führte zu einem enormen Temperaturanstieg ( $>750^{\circ}\text{C}$ ), welchem die folgenden Anlageteile, Rohgaszyklon, Rohgasleitung, Schieber und Kompensatoren sowie der Röhrenwärmetauscher nicht schadenlos standhielten. Dieser Schaden führte erneut zu einem längeren Stillstand der Anlage. Die PYROFORCE Energietechnologie AG, ihre Projektpartner und die involvierten Bundesstellen beschlossen anfangs des Jahres 2002, für die **Phase von Januar bis Mai 2002 (3.1.4)** eine detaillierte Zwischenbilanz bezüglich des Projekts unter Berücksichtigung der grossen Betriebserfahrung zu erstellen. Zudem wurde eine Inventar- und Zustandesaufnahme über das Gesamtsystem vorgenommen. Anschliessend sollte rasch eine Wieder-Inbetriebnahme der Anlage erfolgen. Auch wurde beschlossen, vorerst eine Betriebsweise zu fahren, bei welcher unter Teillast von  $100\text{ kW}_{\text{el}}$  möglichst viele Motoren-Betriebsstunden erzielt werden konnten. Allfällige weitere Schwachstellen sollten erkannt, protokolliert, ausgemerzt und die Anlage weiter optimiert werden. Aufgrund der Ergebnisse der laufenden Erfolgskontrolle sollte sodann in Absprache mit dem BFE und seinem wissenschaftlichen Beauftragten das weitere Betriebsprogramm festgelegt werden.

Seit der erneuten Inbetriebnahme der **Betriebsphase von Ende Mai bis Mitte Juli 2002 (3.1.5)** wurden mit Teillast erfolgreiche 570 BHKW-Betriebsstunden gefahren. Die radikalen Änderungen der Anlage und die Fahrweise mit dem nun erfahrenen Betriebspersonal liessen es zu, die erste „1'000-Stunde Marke“, im Zusammenspiel zwischen Vergaser, Gasreinigung und BHKW zu überschreiten. Permanente Verbesserungen der Anlage bis zur Eignung für einen sicheren Betrieb ohne ständige Beaufsichtigung, die Erforschung und Optimierung des Betriebs in ökonomischer wie ökologischer Sicht sowie eine sukzessive Leistungssteigerung bis zur Volllast, bleiben weiterhin die Ziele des Projektes.

### 3.1.1 Komponenten der Vergasungsanlage

Die Anlage besteht in der Reihenfolge des Stoffflusses aus den Abschnitten Schnitzzellagerung, Transport und Trocknung, Schnitzeldosierung, Vergasung und Ascheaustrag, Gasreinigung und -kühlung und Gasnutzung.

Der Holzbrennstoff wird in einem unterirdischen Beton-Silo gelagert. Die Ausrüstung des Silos umfasst den hydraulischen Schubboden zum Austrag der Schnitzel mit den entsprechenden Hydraulikaggregaten, eine Lüftung und zwei hydraulisch angetriebene Silodeckel, durch welche das unterirdische Silo von oben befüllt werden kann.

Vom Schubboden werden die Schnitzel niveaugesteuert auf den ersten Rollenkettenförderer aufgegeben. Dieser transportiert die Schnitzel bei Bedarf zum Trockner. Der Trockner wird mit der Abwärme aus der Rohgaskühlung betrieben.

Vom Trockner gelangen die Schnitzel auf einen zweiten Rollenkettenförderer, der die Schnitzel zur Vibrorinne hochfördert, welche die Schleuse des Vergasers befüllt.

Bei der Schleuse handelt es sich um eine gegen oben hin semidicht abschliessende und horizontal gelagerte, elektrisch angetriebene Trommel, die auf einem Segment von ca.  $30^{\circ}$  offen ist. Ist die Öffnung oben, kann die Trommel aus der Vibrorinne befüllt werden. In der unteren Position fallen die Holzschnitzel in den Vergaser. Der Vergaser selbst arbeitet nach dem Gleichstromprinzip: sowohl der Brennstoff, als auch die Vergasungsluft und das erzeugte Gas, durchströmen den Reaktor von oben nach unten. Im Reaktor läuft ein komplexer thermischer Prozess ab, bei dem der Brennstoff weiter getrocknet und anschliessend pyrolysiert wird. Dabei zerfällt das Holz bei hohen Temperaturen in gasförmige Stoffe und Holzkohle. Die Wärmeenergie für diesen Prozess stammt aus der Oxidation, die der Pyrolyse folgt. In dieser Zone werden die Produkte der Pyrolyse mit Luft partiell verbrannt (oxidiert). In der letzten Zone reagieren die Oxidationsprodukte mit der verbliebenen Holzkohle zu den Permanentgasen Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Methan. Aus der eingesetzten Luft stammt der Stickstoffanteil, der ca. 50 Vol.-% des Produktgases ausmacht.

Das erzeugte Gas ist aufgrund der Anteile von Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan brennbar und enthält zwischen 70% und 80% der Energie (bezogen auf den Heizwert) des vergastem Holzes (Kaltgaswirkungsgrad). Die Rostasche bildet einen Reststoff (<5 Gew.-% org. Kohlenstoffanteil) des Vergasungsprozesses und wird durch einen Drehrost in den untersten Teil des Vergasers befördert, von wo sie mittels einer Schnecke in einen luftdicht angeschlossenen Container befördert wird.

Das Gas enthält beim Austritt aus dem Vergaser noch Staub, der grösstenteils durch einen Rohgaszyklon abgeschieden wird.

Das vom Vergaser erzeugte Rohgas wird in einem Rohrbündelwärmetauscher gekühlt, wobei Luft als Kühlmedium erhitzt wird. Die heisse Luft wird wie bereits erwähnt zur Trocknung von feuchtem Holz in einem Gegenstromtrockner eingesetzt.

Dem nun gekühlten Gas wird aus einem Silo mittels Dosierschnecke ein Adsorptionsmittel (Sorbalit) zugegeben, um schwerflüchtige Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle zu binden.

Das beladene Pulver wird anschliessend in einem Gewebefilter abgeschieden. Dieser ist im besten Fall selbstreinigend muss aber in der Regel zeitweise auch durch Stickstoffpulse abgereinigt werden.

In einem Gegenstromwäscher wird das Gas bis unter den Taupunkt weiter abgekühlt und gereinigt. Dabei entsteht ein Kondensat als weiteren Reststoff. Das Waschwasser wird im Kreislauf gefahren und gekühlt.

Ein Drehkolbengebläse erzeugt den Unterdruck, der den gesamten Luft- und Gasstrom durch den Vergaser und die Gasreinigung zieht. Dem Gebläse ist ein Koaleszenzfilter nachgeschaltet. Von hier gelangt das Gas zur Gasstrasse des Blockheizkraftwerkes. Der Motor treibt zur Erzeugung von elektrischem Strom einen Generator an. Aus dem Kühlwasserkreislauf und dem Motorenabgas wird Wärmeenergie ausgekoppelt.

Beim Kaltstart des Vergasers wird der Vergaser mit Holzkohle befüllt und gezündet. Durch einen Ventilator, der durch einen Injektor an der Fackelleitung Zug erzeugt, wird Luft in den Vergaser gesaugt und der Vergasungsprozess gestartet. Das erzeugte Schwelgas wird anfangs mit einer Stützflamme, danach autotherm auf der Fackel verbrannt.

Da der PYROFORCE®-Reaktor, einschliesslich Gasreinigung, im Unterdruckbereich arbeiten, können aus diesem Anlagebereich keine Gase unkontrolliert in die Atmosphäre entweichen. Nur während der kurzen An- und Abfahrphase wird das Gas über eine Fackel an die Umgebungsluft abgegeben.

Prinzipiell muss die Vergasung des Holzes im Vergaser so stattfinden, dass ein möglichst grosser Anteil vom Energieinhalt des Holzes in das Rohgas transferiert wird. Das Rohgas darf nur eine geringe Konzentration an kondensierbaren und festen Inhaltsstoffen enthalten. Ausserdem sollten die Konzentrationen von weiteren Komponenten, die den Motorenbetrieb stören, möglichst tief sein. Die Gasreinigung hat sodann die Aufgabe, das Rohgas zu kühlen und so weit zu reinigen, dass dieses im Turbolader des Gasmotors langfristig zu keiner Schädigung führt. Ausserdem darf das Reingas keine Komponenten beinhalten, welche im Motor und dem nachgeschalteten Oxidationskatalysator nicht umgesetzt werden können und zur Nichteinhaltung der Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung führen. Die Abgasbelastung des BHKW's hängt also vom Zusammenspiel von Vergaser, Gasreinigung und Gasmotor ab.

Die im Reingas zulässigen Konzentrationen wurden von der Jenbacher AG, dem BHKW-Lieferanten, angegeben. Zusätzlich zu den im Forschungs- und Entwicklungsprojekt festgelegten Zielwerten wird eine Ammoniakkonzentration angestrebt, die nicht wesentlich über 55 mg/10 kW<sub>el</sub> oder 6 mg/Nm<sup>3</sup> liegt. Ammoniak beeinträchtigt die Oberflächenspannung des Motorenöls, was zu erhöhtem Verschleiss führen kann. Es darf erwartet werden, dass in einem Spezial-Wäscher ca. 90% des Ammoniaks abgeschieden und durch Kohlensäure neutralisiert werden kann.

### 3.1.2 Erster Dauertest

Ein erster Versuch zur Erfüllung des 150-Stunden-Dauertests wurde mit Industrieholzschnitzeln (atro 25%) in der Periode vom 5. bis zum 7. Juni 2001 durchgeführt. Der Test wurde mit der Zündung des Vergasers am Dienstag, 5. Juni 2001 um 6<sup>00</sup> Uhr gestartet. Bis zur Umschaltung auf die Gasreinigung, sieben Stunden später, wurde das erzeugte Gas direkt auf der Fackel verbrannt. Dann wurde die Gasreinigung eingeschaltet. Dreissig Minuten später wurde das BHKW gestartet. Kurzfristige Betriebsunterbrüche wurden durch BHKW-Ausfälle aufgrund von Störungen des Vergaserbetriebes verursacht. Nach ca. 60 Stunden wurde der Test aufgrund von Problemen mit dem BHKW abgebrochen.

Die Funktionen der verschiedenen Anlageteile und die Messresultate können wie folgt zusammengefasst werden:

#### Reaktor

Der Reaktor arbeitete über weite Zeitintervalle zufriedenstellend. Es wurden konstante Gaszusammensetzungen gemessen.

In unregelmässigen Intervallen (im Durchschnitt alle ca. 6 Stunden) traten jedoch Störungen auf. Der Unterdruck am Reaktoraustritt brach fast vollständig zusammen. Offensichtlich trat durch Kaminbildung im Festbett ein "Gas-Kurzschluss" auf, d.h. das Gas durchströmte nicht mehr das ganze Bett sondern gelangte mit sehr kurzer Verweilzeit direkt zum Reaktoraustritt. Die kurzen Verweilzeiten und die schlechte Verteilung des Vergasungssauerstoffs führten dazu, dass ein grosser Teil der Pyrolysegase unvergast aus dem Reaktor austraten. In diesen Perioden wurden sehr hohe Methan-Werte gemessen. Leider liegen keine aussagekräftigen Rohgas-Teerwerte vor (messtechnisch sehr kompliziert und aufwändig). Es muss aber davon ausgegangen werden, dass die Teerkonzentrationen während den Störungen drastisch anstiegen.

#### Wärmetauscher / Russbläser

Frühere Betriebsversuche mussten jeweils wegen Verstopfung der Wärmetauscherrohre frühzeitig abgebrochen werden. Vor dem 150-Stunden-Dauertest wurden daher zwei Modifikationen realisiert:

- Einbau eines Russbläfers
- Provisorische Vorwärmung der Wärmetauscher-Kühlluft

Während der vorliegenden Betriebsphase funktionierte der Wärmetauscher einwandfrei. Der Druckverlust blieb konstant niedrig. Der Wärmeübergang verschlechterte sich zwar im Laufe der Betriebsphase. Es gab jedoch Anzeichen, dass sich allmählich ein stabiler Zustand einstellte.

Die Überprüfung des Wärmetauschers am Betriebsende zeigte allerdings, dass sich trotz Russbläser im Innern der Rohre Russ-Teer-Beläge gebildet hatten. Weitere Versuche sollen zeigen, ob der Wärmetauscher im Langzeit-Betrieb weiterhin einen Engpass bildet.

#### Gewebefilter

Der Schlauchfilter funktionierte während der Versuchsphase einwandfrei. Der Druckverlust konnte konstant auf den vorgewählten 10 mbar gehalten werden.

Es bleibt allerdings zu bedenken, dass die eingesetzte Filterhilfsmittelmenge mit 5 kg/h sehr hoch war. Der Sorbalit-Bedarf richtet sich nach der maximalen Teermenge. Wenn der Teerfluss stossweise auftritt (bei Reaktor-Störungen) führt dies zu unverhältnismässigem Sorbalit-Mehrverbrauch.

### Wäscher / Kühler

Der Wäscher funktionierte grundsätzlich störungsfrei. Die Reingastemperatur wurde von 150°C auf ca. 25°C abgesenkt. Allerdings konnten nicht alle Teerstoffe entfernt werden. Auch hier stellt sich die Frage nach dem stossweisen Auftreten von hohen Teerkonzentrationen während Reaktor-Störungen. Bei solchen Störungen steigt die Reingastemperatur nach dem Wäscher kurzzeitig um ca. 5°C an.

### Gasstrasse und BHKW

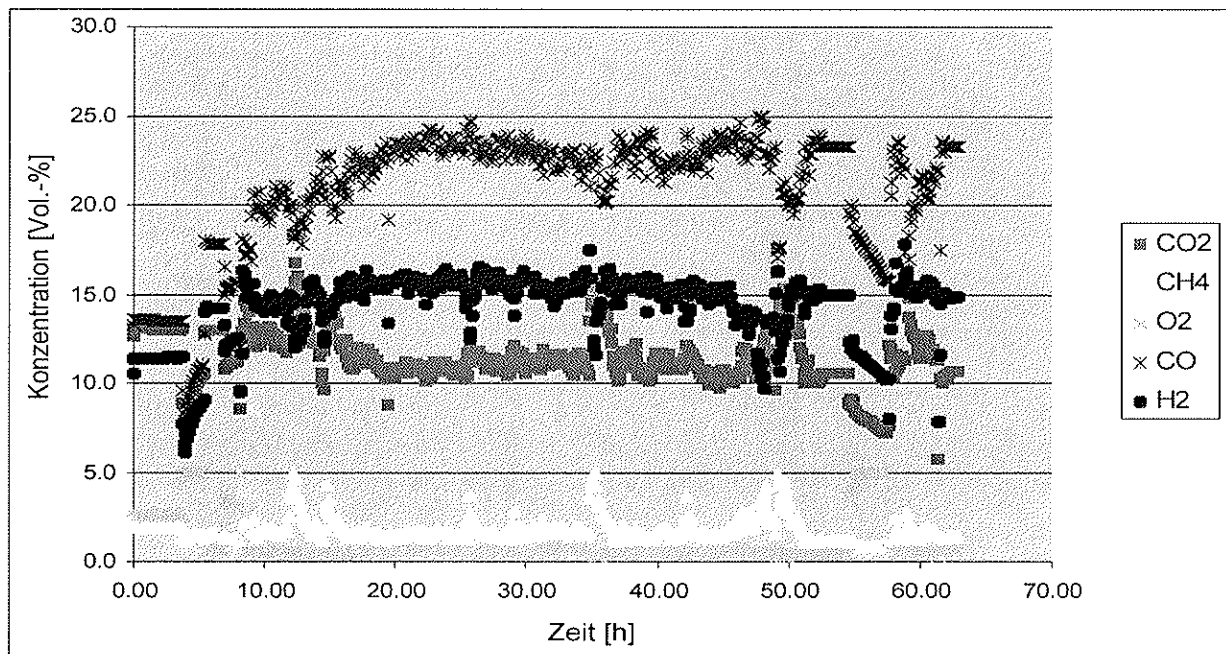
Die Ursachen der BHKW-Störungen sind nicht eindeutig geklärt:

- In gewissen Fällen fielen die BHKW-Störungen zusammen mit dem Anfall von grösseren Teermengen im Vorfilter (Polzeifilter)
- In 3 Fällen fielen die BHKW-Störungen zusammen mit Störungen am Vergasungsreaktor
- Vermutlich spielte die Quellung von ungeeignetem Membran-Material (in den Gasstrassereglern) eine Rolle

### Ergebnisse

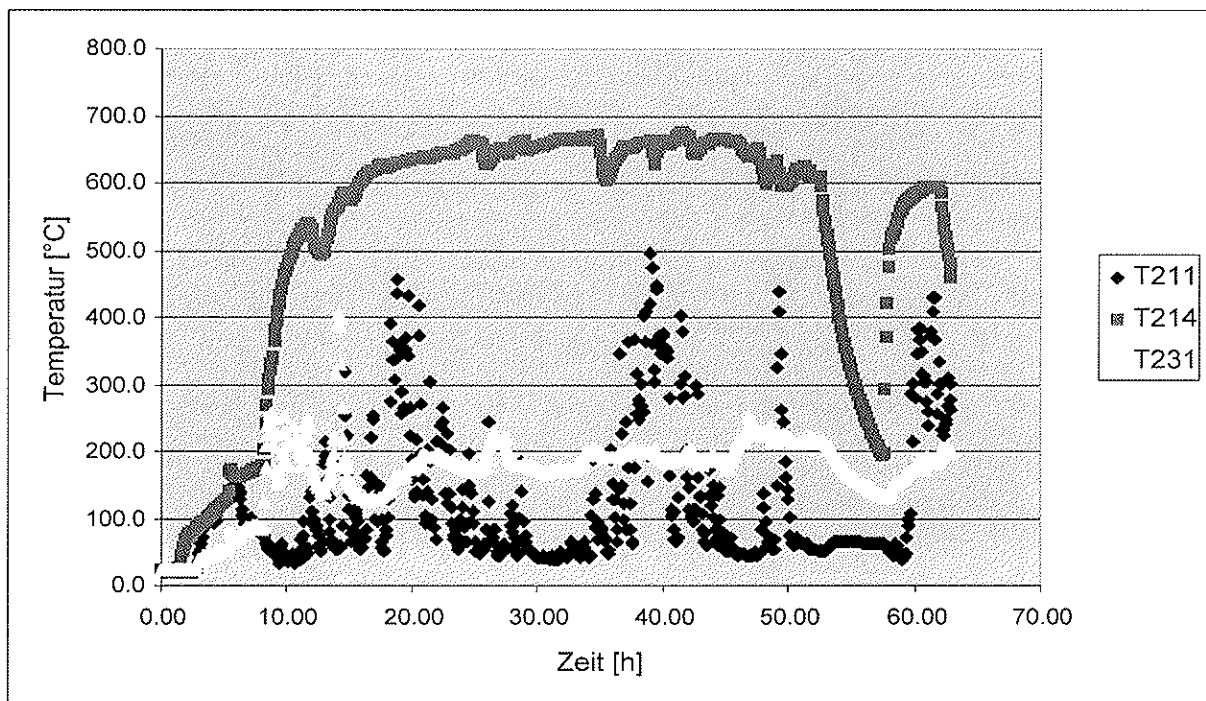
Die nachfolgende Figur 1 zeigt den Verlauf der Konzentrationen von Wasserstoff ( $H_2$ ), Methan ( $CH_4$ ), Kohlenmonoxid ( $CO$ ), Sauerstoff ( $O_2$ ) und Kohlendioxid ( $CO_2$ ) im Reingas. Jeder Datenpunkt ist der Mittelwert aus 150 Einzelwerten (5 Min à 30 Messungen/Min).

Der Reingaswirkungsgrad nach 30 Stunden berechnet sich daraus zu ca. 78%. Somit wäre ein Ziel des Projektes, nämlich dasjenige eines **Reingaswirkungsgrad von über 75% erreicht**.



Figur 1: Verlauf der Konzentrationen von Wasserstoff ( $H_2$ ), Methan ( $CH_4$ ), Kohlenmonoxid ( $CO$ ), Sauerstoff ( $O_2$ ) und Kohlendioxid ( $CO_2$ ) im Reingas

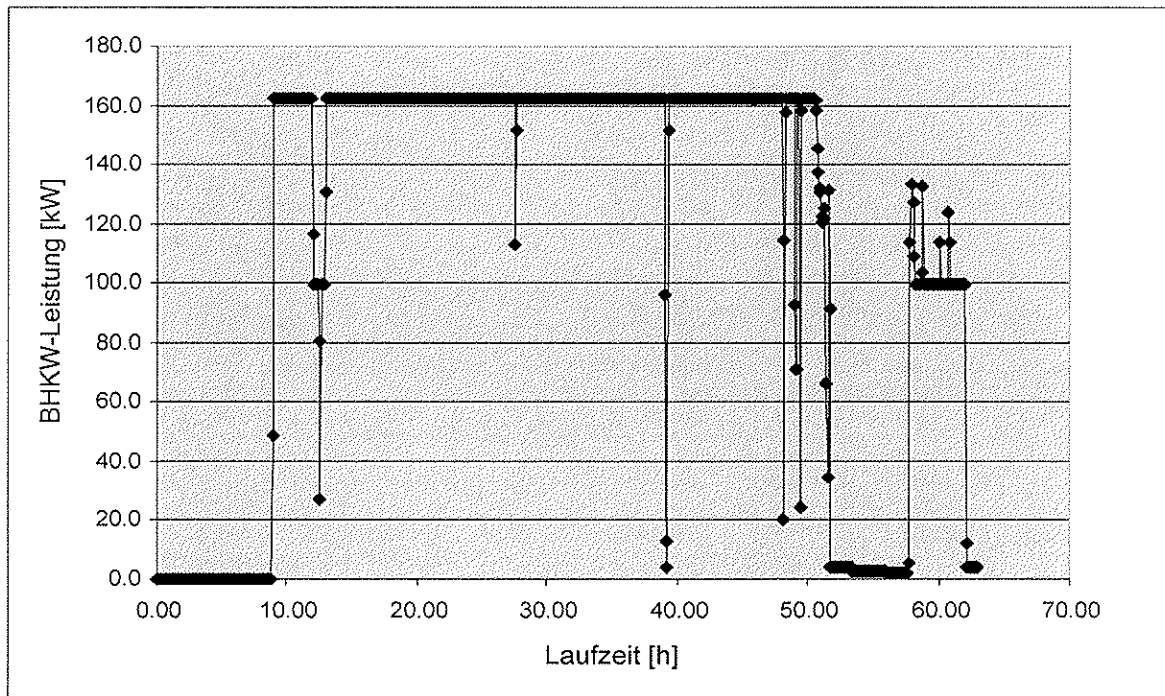
Die Figur 2 zeigt den Verlauf der Temperaturen des Vergaserkopfes (T211), des Rostes (T231) und des Rohgases (T214). Die Temperatur des Rohgases steigt nach der Inbetriebnahme des BHKW's kontinuierlich an und stabilisiert sich nach ca. 24 Stunden bei 670°C. Der Verlauf der Rohgastemperatur widerspiegelt sich sehr genau in demjenigen des Kohlendioxidgehaltes (CO<sub>2</sub>) des Reingases. Mit steigender Rohgastemperatur ist eigentlich aufgrund des relativ hohen Energieanteils, der den Vergaser in Form von Wärme verlässt, mit einem sinkenden Rohgaswirkungsgrad zu rechnen. Dies wird durch den steigenden Kohlendioxid-Gehalt bestätigt. Die Luftüberschusszahl hätte also reduziert werden können.



Figur 2: Verlauf der Temperaturen des Vergaserkopfes (T211), des Rostes (T231) und des Rohgases (T214)

Die Temperatur des Vergaserkopfes (T211) schwankt aufgrund der diskontinuierlichen Befüllung des Vergasers. Sie sinkt, wenn der Vergaserkopf mit Schnitzeln gefüllt ist.

Die Figur 3 zeigt den Verlauf, der während des Versuches durch das BHKW erzeugten elektrischen Energie. Die Betriebsunterbrüche sind erkennbar. Nach dem Unterbruch nach Stunde 52 wurde die Leistung reduziert.



Figur 3: In das öffentliche Stromnetz zurückgespeiste elektrische Energie

Zusätzlich zur Gasanalyse mit dem On-Line-Messgerät wurden Proben zur Bestimmung der Konzentrationen von Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Chlorwasserstoff im Roh- und im Reingas durchgeführt. Als Nebenwert wurde die Feuchtigkeit gemessen. Es wurden 3 Messungen jeweils im Roh- und im Reingas durchgeführt. Die Werte sind in Tabelle 2 aufgeführt:

Tabelle 2: Vergleichswerte im Roh- und Reingas

Messstelle	Zeit nach Zündung [h]	Sulfid als $\text{H}_2\text{S}$ [mg/m <sup>3</sup> ]	Chlorid als $\text{HCl}$ [mg/m <sup>3</sup> ]	Ammoniak als $\text{NH}_3$ [mg/m <sup>3</sup> ]
Rohgas	30	< 0.010	5.16	132.9
Reingas	30	< 0.008	1.62	165.6
Rohgas	33	< 0.011	0.23	70.0
Reingas	33	< 0.004	0.81	57.1
Rohgas	35	< 0.004	0.51	97.0
Reingas	35	< 0.004	0.41	33.2

Die Feuchtigkeit im Rohgas betrug nach ca. 33 Stunden 8.1 Vol.-% und im Reingas 4.3 Vol.-%. Die Feuchtigkeit des Rohgases entspricht dem erwarteten Wert bei einer Holzfeuchte von 25% atro und einem guten Vergasungswirkungsgrad. Der Wasserdampfanteil des Reingases resultiert aus einer Abkühlung auf ca. 30°C.

Die Ammoniakkonzentration bewegt sich bei ca. 50% des Wertes, der aus einem 100%-igen Transfer des Holzstickstoffes in das Rohgas resultieren würde. Ammoniak wird, wie aus der Literatur bekannt ist, ausschliesslich aus dem Stickstoff des Holzes gebildet. Der Wäscher ist nicht für die Abscheidung von Ammoniak ausgelegt. Daher ist die Ammoniakabscheidung auch nicht sehr ergiebig. Es ist Gegenstand weiterer Untersuchungen, ob die Ammoniakkonzentration für einen schonenden BHKW-Betrieb deutlich reduziert werden muss (ca. Faktor 5 -10). Dies würde vor allem zur Schonung des Motorenöls beitragen.

Die Gasreinigung scheidet Chlorverbindungen gut ab und zwar umso besser, je höher die Eingangskonzentration ist. Die Eingangskonzentration nimmt mit der Zeit deutlich ab.

#### Schlussfolgerungen Ausblick und Verbesserungen

Der Vergaser arbeitet im Allgemeinen sehr effizient. Es wird ein Kaltgaswirkungsgrad von über 75% erreicht. Die hohe Rohgastemperatur von ca. 650°C ist auf die effiziente Isolation des Reaktors zurückzuführen. Die hohe Konstanz der gefahrenen Motorenleistung beweist, dass die Gesamtanlage sehr gut funktioniert. Es werden nun Massnahmen ergriffen um die kurzfristigen, deutlichen Einbrüche der Rohgasqualität, welche eine grosse Auswirkung auf die nachfolgenden Verfahrensstufen hat, zu verhindern. Aufgrund der Erfahrungen aus zahlreichen Versuchen wurde beschlossen, dass der Vergaser nach einem längeren Stillstand sorgfältiger wiederangefahren werden muss, damit sich ein gleichmässiges Glutbett bildet. Beginnende Störungen des Bettauflbaus kündigen sich durch einen Anstieg der Luftüberschusszahl an. Zusätzlich zu den bis heute getroffenen Massnahmen, Modifikationen am Wärmetauscher, am Gewebefilter und am Vorfilter der Gasstrasse, müssen weitere Verbesserungen realisiert werden.

- Mögliche Installation einer Einrichtung zur Messung der Rand- und Kernluftströme
- Weitere Massnahmen wie Rüttler am Reaktorkopf und Anpassung der Fahrweise
- Verbesserung des Russbläfers am Wärmetauscher
- Vorwärmung der Kühlluft für den Wärmetauscher und Verbesserung der Temperaturregelung
- Evaluation und Einbau eines Feinfilters in das Reingas nach dem Wäscher
- Einbau von teerbeständigen Dichtungen und Membranen in die Gasstrasse vor dem BHKW

#### **3.1.3 Betriebsphase November und Dezember 2001**

Nach viermonatigem Betriebsunterbruch wurde die Versuchsanlage Spiez wieder in Betrieb genommen. Vor erneutem Betriebsbeginn wurden anhand der bereits gemachten Betriebserfahrungen nachfolgende Anlagemodifikationen durchgeführt:

- Einbau eines Rüttlers (Vibrators) am Reaktor
- Verbesserung des Wärmetauscher-Russbläfers (42 Blasrohre statt 18 wie bisher)
- Vorwärmung der Wärmetauscher-Kühlluft durch Heissluftrezirkulation
- Einbau eines Coalescers vor dem Verdichter (zur Abscheidung von Teernebeln)
- Ersatz von ungeeignetem Membran- und Dichtungsmaterial in der Gasstrasse

Die Zeit von Ende Oktober bis Ende Dezember 2001 kann in zwei individuelle Betriebsphasen gegliedert werden:

- Phase 1            Ende Oktober bis Ende November 2001
- Phase 2            Ende November bis Ende Dezember 2001

## Phase 1

Die Phase 1 wurde mit einem sauberen Wärmetauscher begonnen. Die Wärmetauscher-Performance war jedoch schon zu Beginn der Phase 1 äusserst schlecht. Sowohl der Wärmetauscher-Druckverlust als auch der Kühlluftbedarf stiegen während der ganzen Phase progressiv an. Nach 28'000 Nm<sup>3</sup>-Reingasdurchsatz (ca. 70 h bei 160 kW<sub>el</sub>) musste der Betrieb wegen mangelnder Kühlkapazität abgebrochen werden. Zu bemerken ist, dass die Phase 1 unter sehr ungünstigen Bedingungen gefahren wurde. Einerseits wurde die Anlage am Anfang nur im Tagesbetrieb gefahren und über Nacht abgekühlt, da nach der langen Stillstandszeit zuerst diverse Anfahrprobleme gelöst werden mussten, und andererseits führten schlechte Holzkohle zu einem unsymmetrischen Abbrand im Glutbett des Reaktors. Aus dieser ersten Betriebsphase konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Der Reaktor muss kontinuierlich und unter günstigen Bedingungen gefahren werden.
- Am Coalescer wurde ein wässriges Kondensat mit Ölanteilen abgeschieden.  
Im Verlauf des Versuchs stieg der Coalescer-Druckabfall auf >50 mbar an. Damit war die Leistungsgrenze des Drehkolbengebläse-Motors erreicht und der Versuch musste abgebrochen werden.  
Der Coalescer soll in Zukunft auf der Druckseite des Verdichters eingebaut werden. Dort ist das Gas um ca. 20°C wärmer. Es entsteht somit nur noch öliges Teerkondensat (keine Wasserphase).
- Am Wärmetauscher konnte bisher keine signifikante Verschmutzung nachgewiesen werden. Für eine aussagekräftige Beurteilung war die Versuchsdauer zu kurz. Der Betrieb soll ohne Wärmetauscherreinigung fortgesetzt werden.

## Phase 2

Die Phase 2 wurde mit dem ungereinigten Wärmetauscher begonnen. In dieser Betriebsphase wurde die Anlage im kontinuierlichen 24-h-Betrieb gefahren und nur 3 x über Nacht abgekühlt. Nach einer gewissen Zeit traten nachfolgende Probleme auf:

- Der Druckverlust war anfänglich bescheiden und konstant.  
Dann erfolgte ein markanter Druckverlust-Anstieg (bei ca. 18'000 Nm<sup>3</sup> Reingas-Durchsatz). Genau zu diesem Zeitpunkt stieg auch der Teergehalt um ca. Faktor 1'000 an. Der negative Einfluss von hohen Teerkonzentrationen ist unverkennbar.  
Nach dieser Teerwelle "erholte" sich der Wärmetauscher wieder teilweise. Während ca. 22'000 Nm<sup>3</sup> Reingasdurchsatz (entspricht ca. 55 h bei 160 kW) wurde der Druckverlust geringer. Offensichtlich werden die Beläge auf dem Wärmetauscher partiell wieder abgebaut. Vermutlich fliesst der Teer nach unten und tropft ab.  
Nach ca. 44'000 Nm<sup>3</sup> Reingasdurchsatz stieg der Druckverlust wieder sprunghaft an. Auch in diesem Fall ist als Ursache eindeutig ein hoher Teergehalt auszumachen. Nach diesem Teerstoss wurde der Betrieb wegen ungenügender Kühlluftmenge abgebrochen.
- Der Kühlluftbedarf war schon bei Versuchsbeginn relativ hoch (FU ca. 30 Hz). Die erhöhte Kühllufttemperatur (neu vorgeheizt auf 85°C) liess die "Kühlreserve" zusammenschmelzen.  
Der Kühlluftbedarf stieg jedoch für längere Zeit nicht stark an! Bis zu einem Reingasdurchsatz von 40'000 Nm<sup>3</sup> (100 h bei 160 kW) konnte der Kühlluftventilator mit Frequenzen <40 Hz betrieben werden.  
Selbst der Teereinbruch (bei ca. 18'000 Nm<sup>3</sup> Reingasdurchsatz) führte nur zu einem geringen Kühlluft-Mehrbedarf.  
Ab ca. 35'000 Nm<sup>3</sup> Reingasdurchsatz stieg der Kühlluftbedarf stetig an. Es wird vermutet, dass ab diesem Zeitpunkt der Wärmetauscher undicht war. Höhere Rohgastemperaturen führten zu ungenügender Kühlung.
- Der erneut angesetzte 150-Stunden-Dauertest musste aufgrund eines Anlagendefekts am 14. Dezember 2001 nach nur sehr kurzer Zeit abgebrochen werden. Eine Analyse der Anlage ergab, dass der Flansch des Rohgaszyklons bei den vorangegangenen Inspektionsarbeiten nicht dicht verschlos-



sen wurde. Der somit erfolgte erhöhte Sauerstoffeintritt in das System führte zu einem enormen Temperaturanstieg  $>750\text{ }^{\circ}\text{C}$  welcher die Anlage bis und mit Wärmetauscher beschädigten.

### Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Holzschnitzel-Vergasungsanlage nur im Dauerbetrieb sinnvoll getestet werden kann. Kurze Testperioden führen zu verfälschten Resultaten.

Die bisherigen Resultate sind sehr ermutigend. Trotz einem grossen Teer-Peak (mit 1'000-fach erhöhter Konzentration) war für ca. 100 Stunden (bei 160 kW) kein eindeutiger Trend zu stark reduziertem Wärmeaustausch erkennbar. Dann folgte ein stetiger Anstieg des Kühlluftbedarfs. Die Wärmetauscher-Druckverlustmessungen zeigten zwar, dass hohe Teerkonzentrationen zu Rohrbelägen und erhöhtem Druckverlust führen. Allerdings "erholt" sich der Wärmetauscher wieder partiell und der Druckverlust sinkt. Vermutlich führt das Abfliessen des Teers zu einem Selbstreinigungseffekt.

Trotz des beachtlichen Schadens der Anlage ist eine baldige Wieder-Inbetriebnahme geplant. Die erzielten Betriebserfahrungen sind für die Holzvergasung von grosser Bedeutung und müssen nun genutzt werden um die folgende Zeit durch einen geregelten Dauerbetrieb zu ermöglichen.

### **3.1.4 Phase von Januar bis Mai 2002**

In den ersten 5 Monaten des Jahres 2002, wurde eine eingehende Zustandsanalyse der Anlage sowie die Auswertungen von Messdaten und Betriebserfahrungen durchgeführt. Die schadhaften Teile der Anlage wurden entsprechend neu designed, bestellt und eingebaut. Die qualitative Anlagebeurteilung kann wie folgt beschrieben werden:

- **Die Brennstofflagerung sowie der Transport** bereitet bis auf zeitweises verklemmen von Holzschnitzeln keine Probleme.
- **Der Trockner** wird noch nicht benützt, er dient momentan als Zwischenbunker. Mit Waldholz sollen erst Versuche gestartet werden, wenn die Gasreinigung zu 100% funktioniert (Gefahr, dass zu nasses Holz in den Vergaser gelangt ist derzeitig noch zu gross).
- **Der Vergaser** hat mit der Niveauüberwachung noch einen Schwachpunkt. Es ist eine Sonde mit einer erhöhten Temperaturbeständigkeit von  $500^{\circ}\text{C}$  einzubauen. Beim Rost hat die PYROFORCE bereits eine Verbesserung in Auftrag gegeben. Man hat einen Spezialeinbau gewählt, um eine Volumenveränderung zu erzielen. Gleichzeitig soll damit ein gleichmässiger Abbrand im Reaktorbett erzielt werden. Die Automatisierung des Rostmechanismus soll nach weiteren Betriebserfahrungen realisiert werden. Die Luftzuführung ist mit pneumatischen Absperrventilen auszurüsten, um einen unbewachten Betrieb zu ermöglichen.
- **Der Zyklon** muss neu gefertigt werden, um den höheren Temperaturverhältnissen gerecht zu werden. Der Austrag der Zyklonasche wird besser gegen Lufteintritt abgedichtet. Ansonsten kann es zu Reaktionen mit der Luft und dem Pyrolysegas kommen, welche wiederum die Dichtungen wegen steigender Temperaturen noch mehr beanspruchen und die Gefahr eines weiteren Schadens besteht.
- **Der Wärmetauscher** hat Standzeiten, welche  $<100$  Stunden betragen. Das Projektteam muss intensive Abklärungen mit verschiedenen Herstellern, betreffend Ergänzung oder deren Ersatz durchführen. Weitere Ideen sind während der zukünftigen Betriebsphase zu überprüfen. Möglichkeiten, die Teerspitzen zu brechen sind während der Betriebsphase zu prüfen. Der beschädigte Wärmetauscher wird lediglich repariert um weitere Erfahrungen zu sammeln.

- **Der Filter** arbeitet problemlos, trotz der sehr ungünstigen Betriebsfahrweise. Das Abreinigen der Filtersäcke funktioniert bestens. Ein Punkt, der verfahrenstechnisch Vorteile brächte, wäre eine Berstscheibe mit höherer Temperaturlimite. Die momentan eingesetzte Berstscheibe ist auf 150°C limitiert, die Filtersäcke hingegen können Temperaturen bis 220°C ertragen.
- **Der Wäscher** arbeitet sehr gut, wobei die Abschlammung für den Betrieb ohne Beaufsichtigung einer Automatisierung bedarf. Die abzusondernde Kondensatmenge kann aufgrund der Austrittstemperatur in einer gewissen Bandbreite geregelt werden. Die Entsorgungskosten können dadurch tiefer gehalten werden. Eine entsprechende Automatisierung ist vorzusehen.
- **Der Coalescer** erfüllt seine Funktion gut, eine automatische Abschlammung muss jedoch auch hier noch installiert werden.
- **Das BHKW** arbeitet sehr gutmütig. Bei der Gasstrasse müssen noch Druck und Apparate optimiert werden. Um die Stillstandszeiten (Service und Zündspannungsmessungen) möglichst kurz zu halten, müssen die wichtigsten Ersatzteile (Kerzen, Filter, Motorenöl, Zündspulen etc.) vor Ort an Lager sein.
- **Für die Entsorgung** der Filter-, Zyklon- und Rostasche muss ein besseres Konzept erarbeitet werden. Die Lagerung, der Transport und die Entsorgung müssen so gelöst sein, dass es nur zu einer sehr geringen Schmutzentwicklung kommen kann.
- **Die Sicherheitstechnik** und **die energetischen** Optimierungen müssen permanente Aufgaben sein.
- **Die Steuerung und Visualisierung** muss laufend den neusten Um- und Einbauten angepasst werden. Die Automatisierung wird laufend optimiert und verbessert. Das Ziel soll eine voll automatisierte Holzvergasungsanlage sein. Davon ausgenommen sind natürlich das wechseln von Containern, die Wartungen, die Beobachtungen und nicht erfassten Datenaufzeichnungen (Betriebsmittel).

### 3.1.5 Betriebsphase von Ende Mai bis Mitte Juli 2002

Der Betrieb der Anlage wurde am 24. Mai 2002 mit einer Motoren-Betriebsstundenzahl von 432 wieder aufgenommen. Es war vorgesehen, während des folgenden Betriebs einen möglichst problemlosen Brennstoff zu wählen. Bereits erlangte Betriebserfahrungen haben gezeigt, dass sich die Industrieschnitzel der Firma Tschopp AG, Buttisholz, dazu am besten eignen.

Die Leistung wurde auf 100 kW<sub>el</sub> begrenzt. Der Motor soll über eine längere Zeit mit immer gleichbleibender Leistung gefahren werden. Dies ermöglicht Resultate zu erzielen, welche leicht vergleichbar sind. Die Anlage soll im Dauerbetrieb unter Beobachtung, 24 Stunden, fünf Tage die Woche, gefahren werden. Der Betrieb wird mit Meilensteinen im Ablauf, zeitlich und leistungsmässig, durch eine Erfolgskontrolle geführt. Alle Daten zu Betriebs- und Verbrauchsmaterialien, sowie Personal- und Produktionskosten sollen detailliert erfasst werden. Verbesserungen, Optimierungen und Reparaturen an der Anlage sowie an Hard- und Software, sollen während gezielten oder unvorhergesehenen Betriebsunterbrüchen realisiert werden.

Nach nun über 570 weiteren Betriebsstunden hat die Anlage im Zusammenspiel zwischen Vergaser, Gasreinigung und BHKW die „1'000-Stunden-Marke“ überschritten. Die Funktion der verschiedenen Anlagenteile können wie folgt zusammengefasst werden:

#### Brennstofflagerung sowie der Transport

Die Brennstofflagerung macht keine Probleme. Der Transport von Holzschnitzel mittels Rollenkettenförderer via Trockner bereitet zwischendurch Kopfzerbrechen. An einem neuralgischen Punkt verkleben sich ab und zu Holzschnitzel. Die Schnitzelförderung ist dann nicht mehr gewährleistet und führt zu einem geregelten Herunterfahren der Anlage mit entsprechender Störungsmeldung. Diese Störungen benötigen jeweils 2 Personen zur Behebung. Ihre Häufigkeit hat sich in letzter Zeit von alle 2 Wochen auf 1 Woche erhöht. Entsprechende Umbauarbeiten sind geplant.

#### Reaktor

Der Reaktor arbeitete über die ganze Zeit zufriedenstellend. Es wurden konstante Gaszusammensetzungen gemessen. Es scheint sich zu bestätigen, dass bei längerem Dauerbetrieb ohne stetiges An- und Abfahren der Anlage ein gleichmässiges Glutbett entsteht. Brückenbildungen und Röhrenbrände wurden keine bemerkt. Dies bestätigen auch die Messungen der On-Line-Rohgaszusammensetzungen, welche laufend erfasst werden.

#### Zyklon

Die Abscheidewirkung des Zyklons an sich funktioniert einwandfrei. Jedoch gab es mit der Niveauüberwachung Probleme. Es macht den Eindruck, dass auf dem Europäischen Markt keine temperaturbeständigen Niveausonden in einem vertretbaren Preisrahmen erhältlich sind. Dank unserer reichen Erfahrung, konnten wir vor einer niveaubabhängigen Entleerung des Zyklons Abstand nehmen und auf einen zeitlich gesteuerten Intervall umstellen.

#### Wärmetauscher / Russbläser

Während der vorliegenden Betriebsphase funktionierte der Wärmetauscher einwandfrei. Der Druckverlust blieb konstant niedrig. Der Wärmeübergang verschlechterte sich nicht. Es stellte sich ein stabiler Betriebszustand ein. Anlässlich der Überprüfung des Wärmetauschers bei Motoren-Betriebsstunde 660, das heisst nach rund 230 Wärmetauscher-Betriebsstunden, konnten absolut keine Verschmutzungen festgestellt werden.

#### Gewebefilter

Der Schlauchfilter funktionierte einwandfrei über diesen Zeitabschnitt. Der Druckverlust konnte konstant auf den vorgewählten 10 mbar gehalten werden. Durchschnittlich wurden 8 Abreinigungen in der Stunde beobachtet. Die eingesetzte Filterhilfsmittelmenge wurde von 5 kg/h auf 2 kg/h reduziert. Interne Messungen haben gezeigt, dass der Filterstaub nicht voll belegt ist, und die Möglichkeit besteht, den abgeschiedenen Filterstaub nochmals zu verwenden. Der Sorbalit-Bedarf hat sich durch den zweimaligen Gebrauch nochmals auf 1 kg/h reduziert.

#### Wäscher / Kühler

Der Wäscher funktioniert störungsfrei. Eine Entleerung des Kondensats wird alle 2 – 3 Stunden manuell vorgenommen. Aufgrund der angepassten Fahrensweise (höhere Temperatur auf BHKW), und bestimmt auch durch Einfluss des Teillastbetriebs, konnte die Kondensatmenge von durchschnittlich 45 l/h auf 11 l/h gesenkt werden. Nicht nur beim Wäscher und Kühler sondern auch im Wärmetauscher, dem Coalescer und der Gasstrasse, hat die Betriebstemperatur wie auch die Aussentemperatur einen erheblichen Einfluss auf das ganze System.

#### Coalescer

Der Coalescer muss bei der jetzigen Betriebsfahrweise lediglich eine wässrige Phase abscheiden.

#### BHKW

Beim BHKW mussten zwischenzeitlich die Kerzenelektroden neu justiert werden. Nebst dem Kerzenwechsel, musste eine Zündspule ausgewechselt werden. Die 1'000-Stunden-Inspektion steht an.

#### Schlussfolgerung

Diese Betriebsphase hat gezeigt, dass sich die Holzvergasungsanlage in Spiez im Dauerbetrieb bewährt. Störungen und Betriebsunterbrüche wurden nur durch technische und mechanische Defekte von peripheren Anlageteilen oder Fehlmanipulationen durch das Betriebspersonals ausgelöst. Verfahrenstechnische Störungen blieben bei der Teillast zu 100% aus.

### **4. Nationale Zusammenarbeit**

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde in Kooperation der Firmen PYROFORCE Energietechnologie AG, CT Umwelttechnik AG, Elektrowatt Engineering AG sowie der Jenbacher AG durchgeführt. Während des Jahres 2001 stiessen durch Ihre tiefe Involvierung in das Projekt die beiden Firmen IWK AG und ATEL AG dazu. Das Projekt hat deshalb einen stark kooperativen Charakter. Unterstützt und begleitet wird das Projekt ausserdem durch Herr Dr. Benedikt Meyer und Herr Ruedi Bühler als beauftragter wissenschaftlicher Berater für das BFE. Die Beteiligung und Zusammenarbeit weiterer Institutionen war nicht geplant, wäre aber für die Zukunft wichtig und auch wünschenswert. Es sollte auch ein Netzwerk unter den Mitbewerbern für Erfahrungsaustausch bezüglich neuesten Erkenntnissen aufgebaut werden.

Bei der Realisierung der Vergasungsanlage im AC-Zentrum Spiez konnte eine sehr professionelle Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Armeematerial und Bauten, den Standortdiensten des AC-Zentrums sowie dem beratenden HLK-Ingenieur, Hans Peter Abbühl, aufgebaut werden.

### **5. Internationale Zusammenarbeit**

Im Rahmen des durchgeführten F+E-Projektes fand keine internationale Zusammenarbeit statt. Jedoch pflegen wir persönliche Kontakte und den Erfahrungsaustausch zu Universitäten, Hochschulen und weiteren Institutionen, welche für zukünftige Projekte von Nutzen sein könnten.

Die „Vergasergemeinde“ ist sehr gross und sehr international, gute Kontakte müssen ausgebaut und neue in Zukunft angestrebt werden. Die Mitarbeit des BFE und die Arbeit ihrer Vertreter in internationalen Gremien und Verbänden wird begrüsst.

### **6. Bewertung und Ausblick 2002 / 2003**

Die Arbeiten am beschriebenen F+E-Projekt in Spiez haben sich deutlich verzögert. Die technischen Probleme die noch zu lösen waren sind nur ein Grund dafür. Die heute vorliegenden Ergebnisse und der Erfolg der inzwischen eingeführten Verbesserungen, die Anstrengungen und Investitionen, die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, lassen erwarten, dass die Anlage in Spiez sicher die gesteckten Ziele erreichen wird. Der Weg dorthin benötigt jedoch aus unserer Sicht noch ein bis zwei Jahre. Das breite Interesse, die Motivation, Innovation, der Teamgeist und das Vertrauen in die Sache, spornt uns

an, die Technologie weiterhin zu verbessern. Es ist geplant, die Anlage in Spiez über einen Zeitraum von 24 Monaten durch die PYROFORCE Energietechnologie AG zu betreiben und zu begleiten. Die Anlage soll dabei über möglichst lange Zeitabschnitte und unter abnehmender Beaufsichtigung gefahren werden. Über den Betrieb soll zeitlich und leistungsmässig Erfolgskontrolle geführt werden. Sämtliche Daten, die für eine wirtschaftliche Analyse der Gesamtanlage erforderlich sind, werden dabei erfasst bzw. protokolliert und ausgewertet, so

- der Personalaufwand
- der Verbrauch an Hilfsmitteln (Motorenöl, Adsorbtionsmittel, Brennstoff, Hilfsgase etc.)
- der Einsatz von Ersatzteilen (Zündkerzen, Dichtungen etc.)
- der Brennstoffverbrauch
- der Entsorgungsaufwand (Rostasche, Filtrerrückstände, Kondensat etc.)
- den Ertrag bezüglich elektrischer und thermischer Energie
- u.a.m.

Verbesserungen, Optimierungen und Reparaturen an der Anlage sowie an der MSR-Hard- und Software, werden fortlaufend realisiert. Schritt für Schritt soll sodann die Anlagenleistung um jeweils 10 kW<sub>el</sub> gesteigert werden.

Schlussbericht 2002

PYROFORCE Energietechnologie AG  
CH-6020 Emmenbrücke

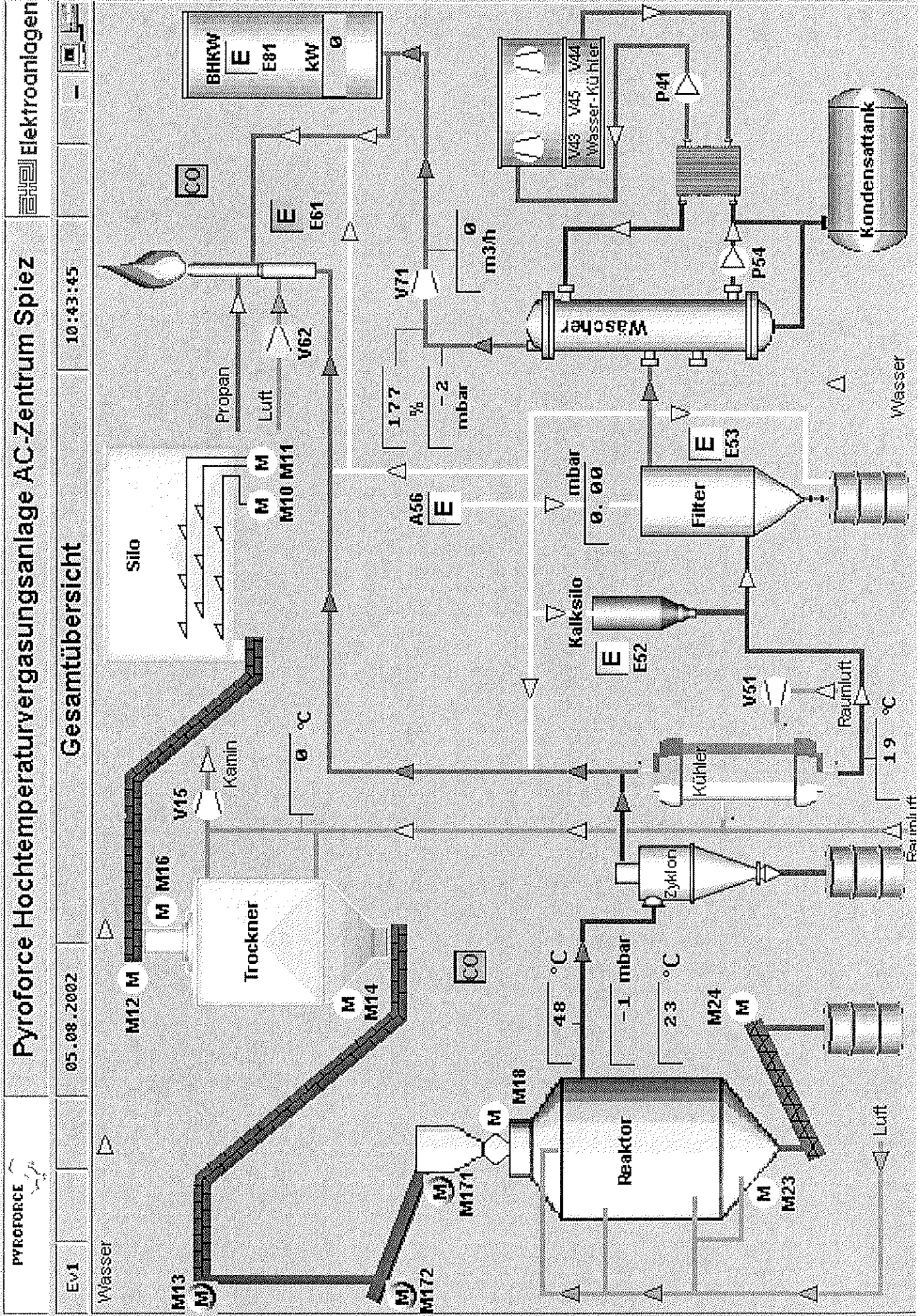
Herbert Gemperle

Anhang: Visualisierungsbild und Fotos der Anlage

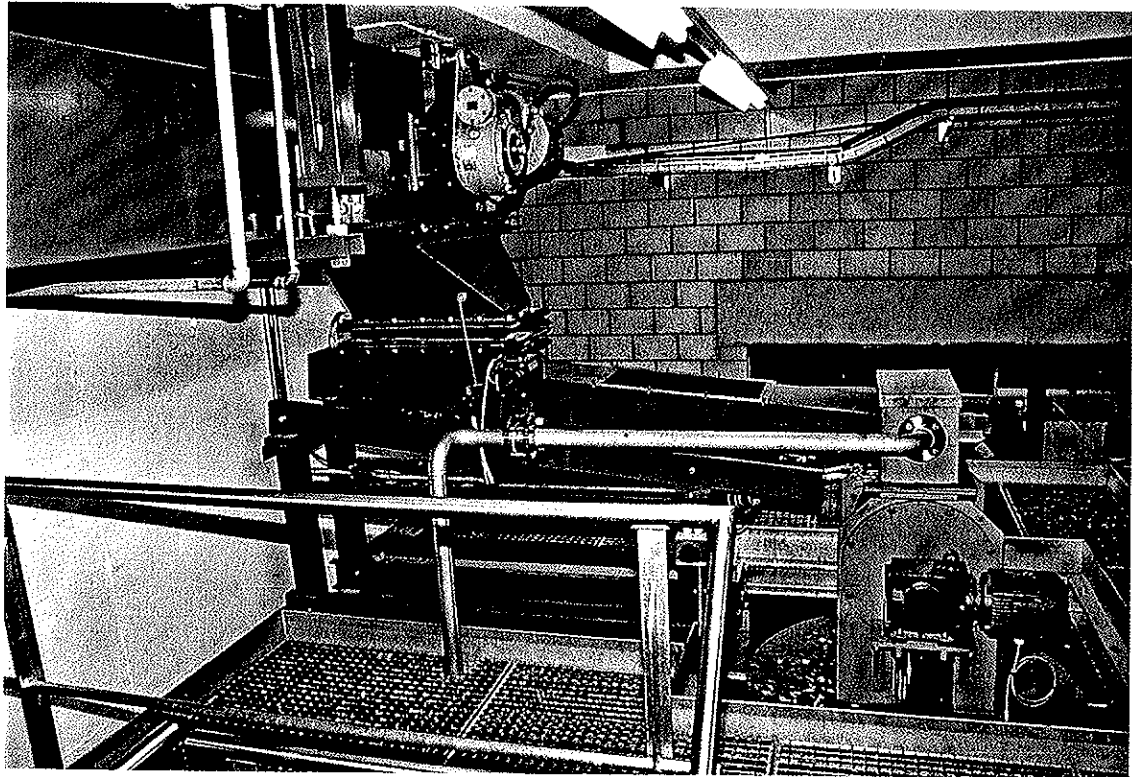
# **ANHANG**

**Visualisierungsbild**

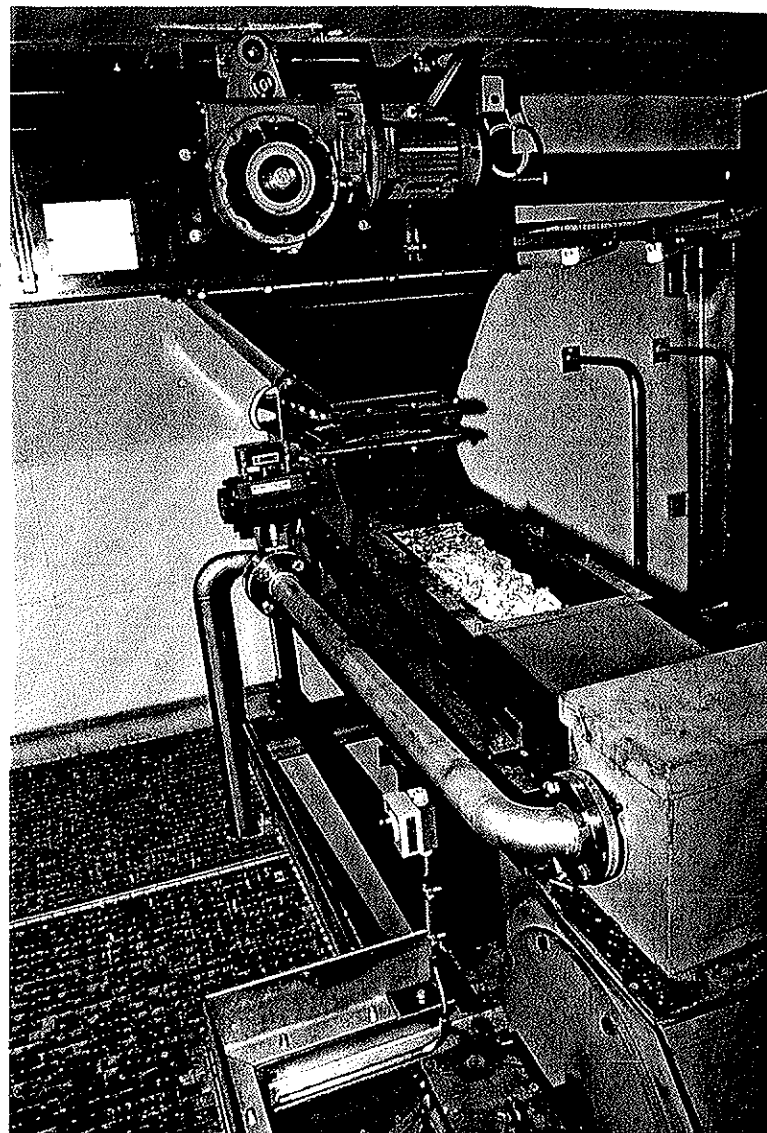
**Fotos der Anlage**





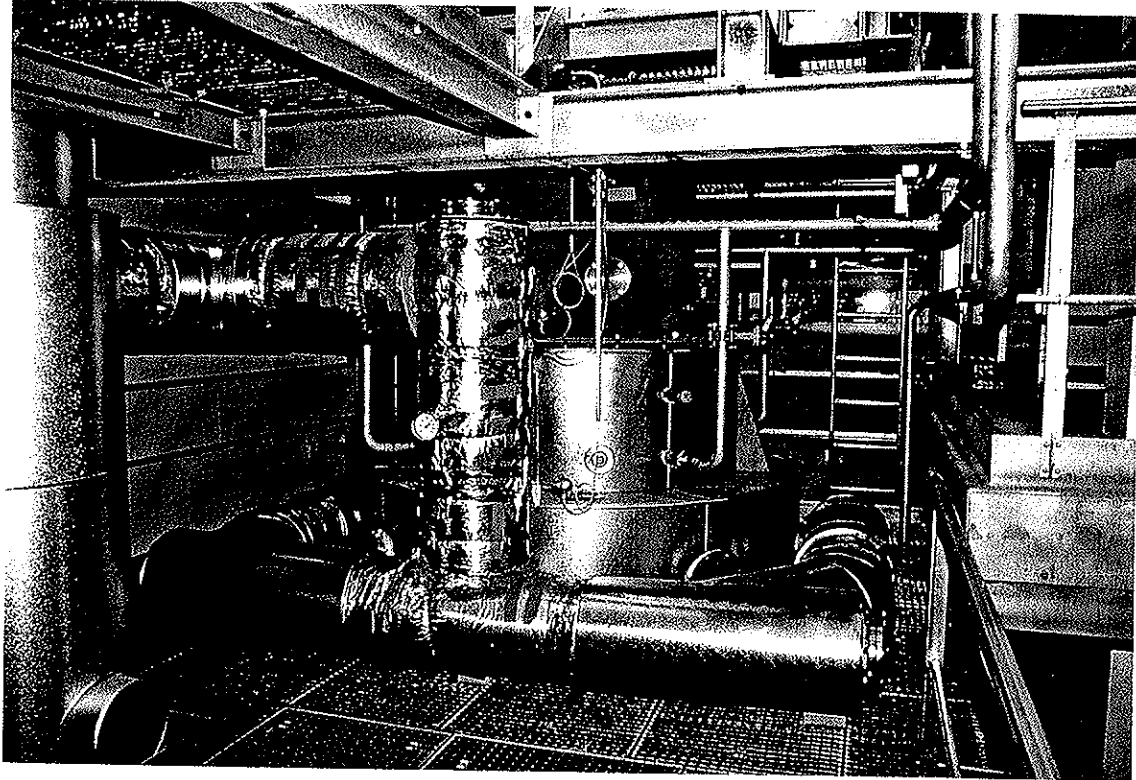


Ver. 108.26A

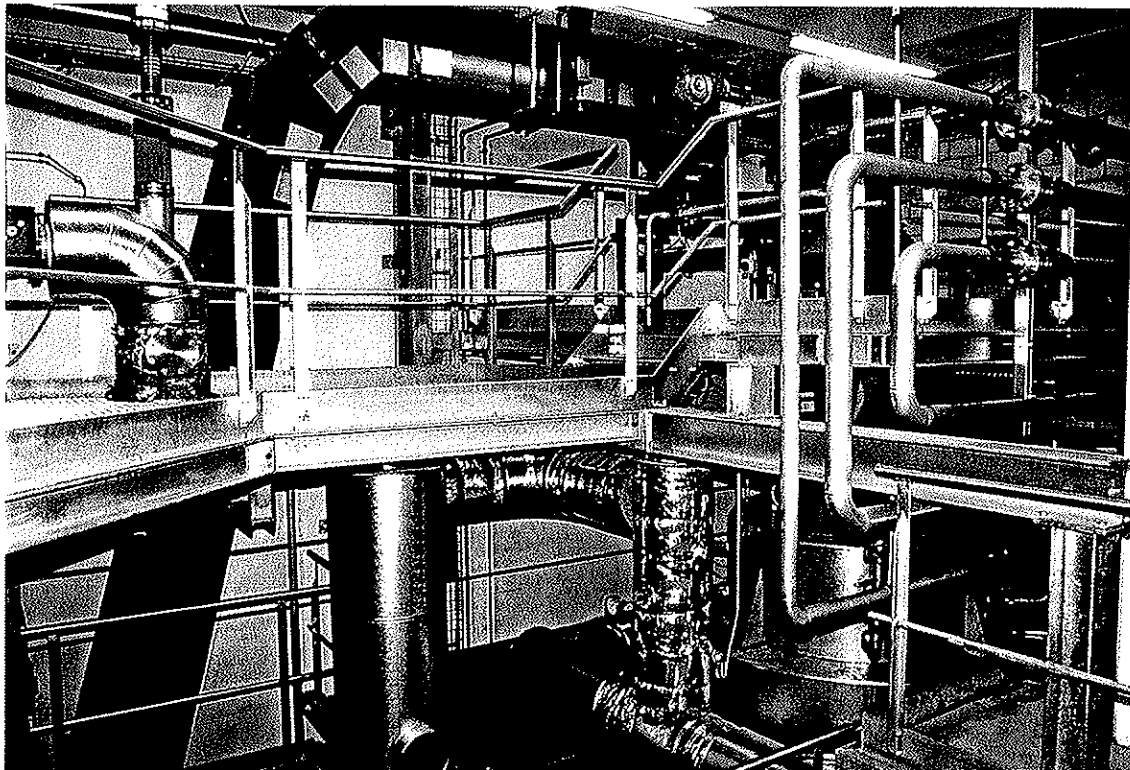


Ver. 108.26A

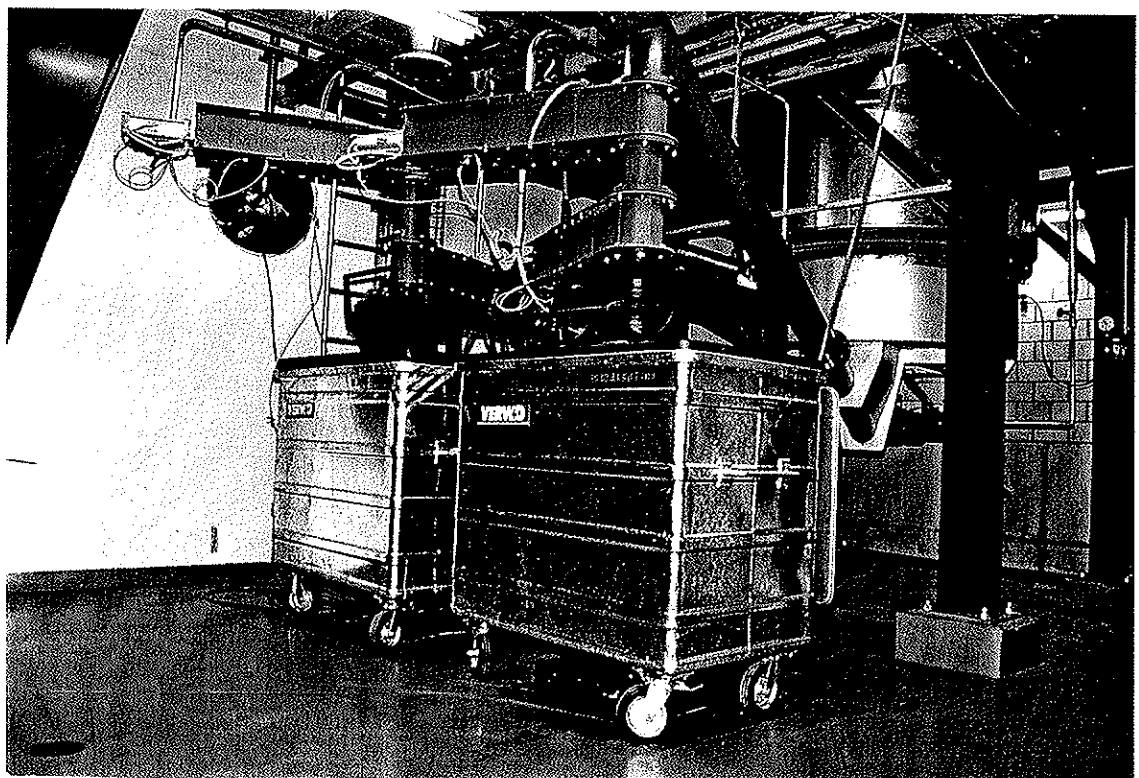
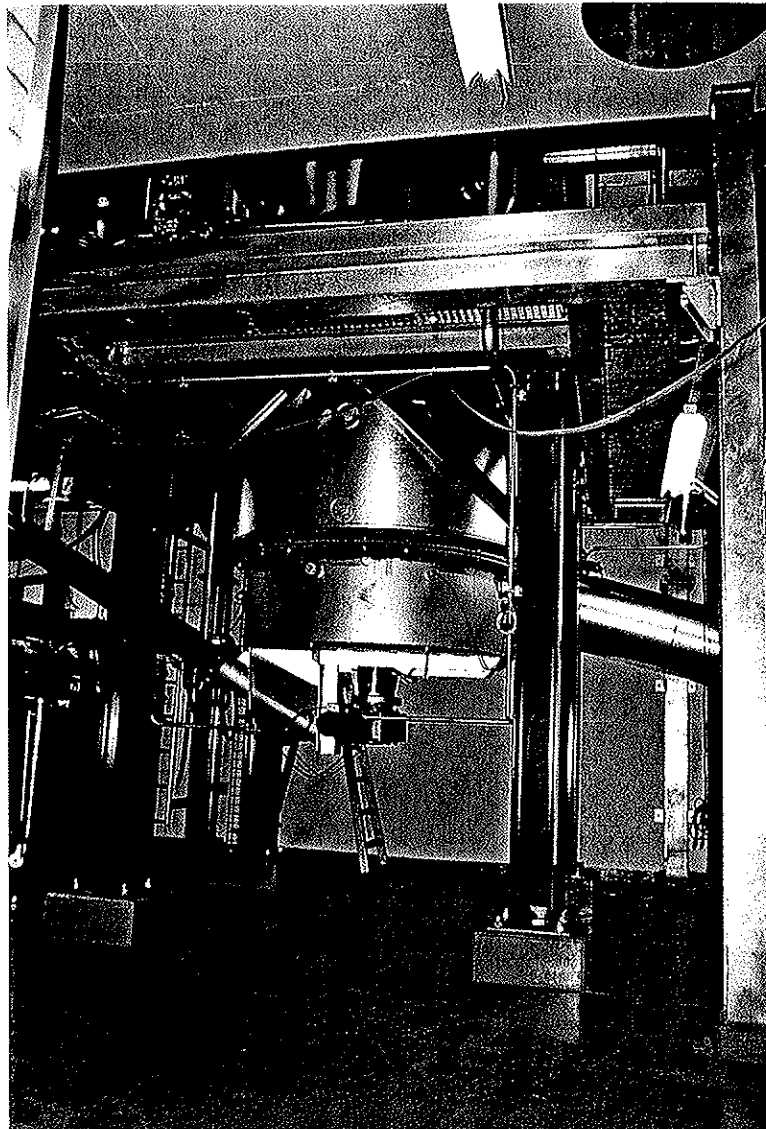


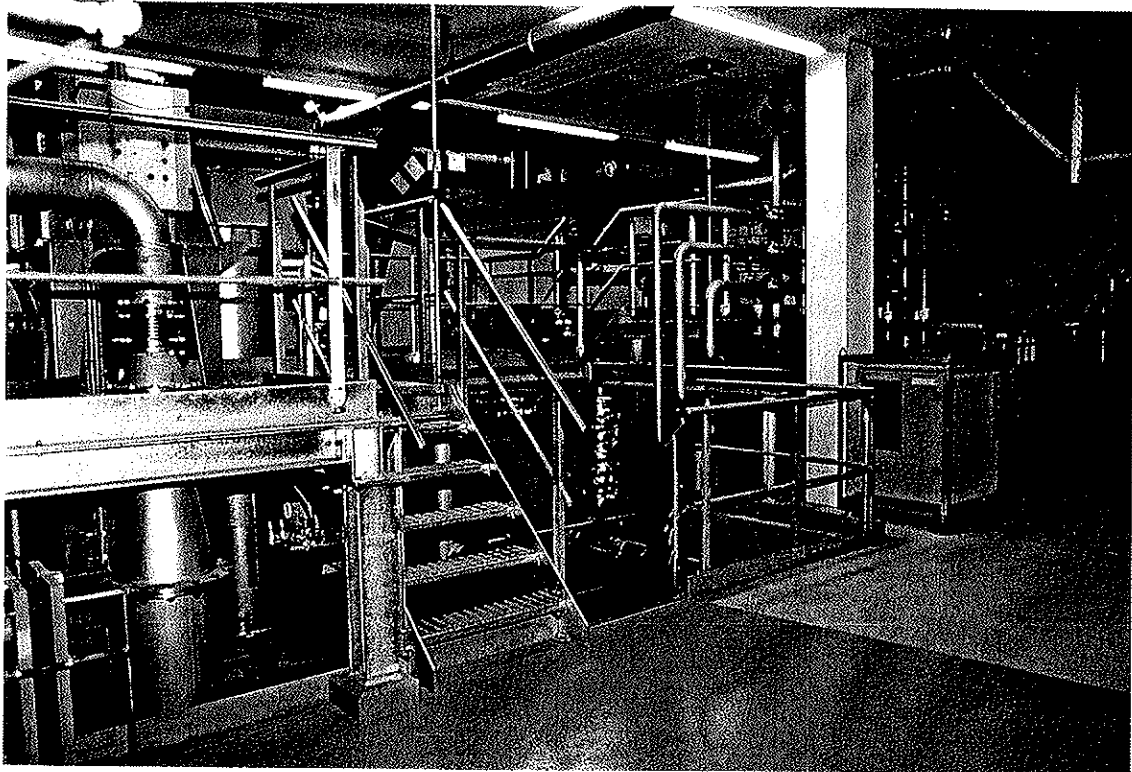


400.107.4A

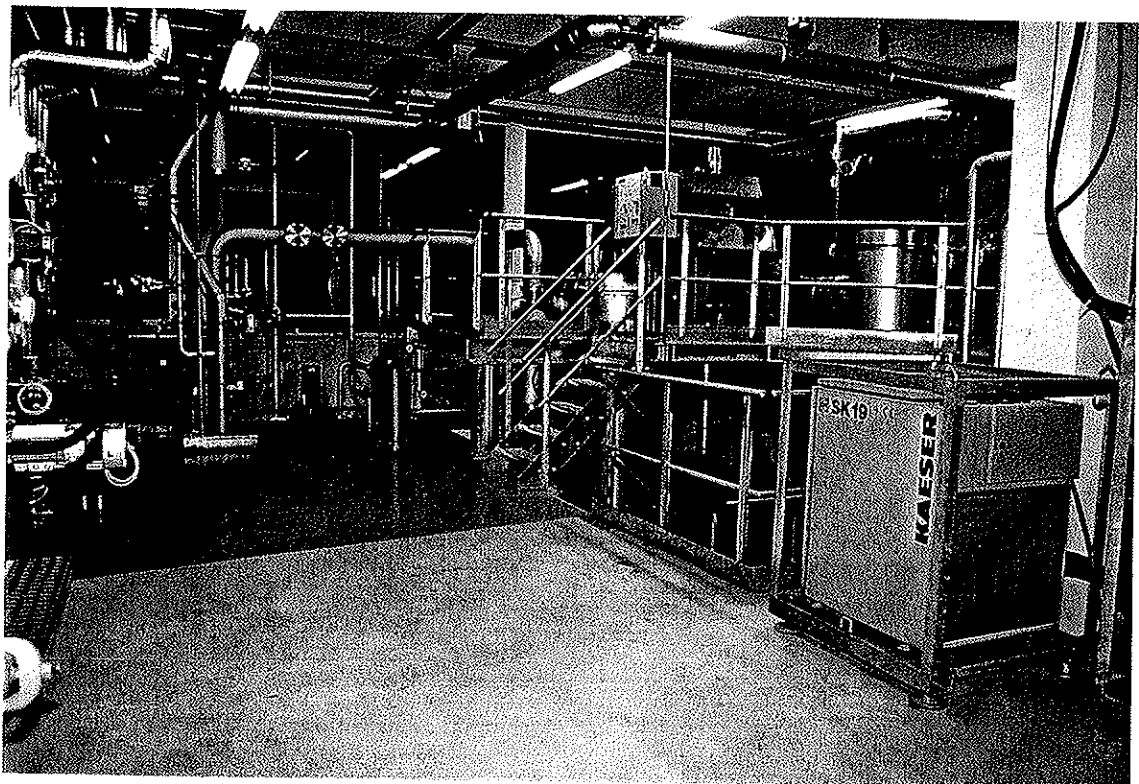


400.109.1A





idea 16.1.02

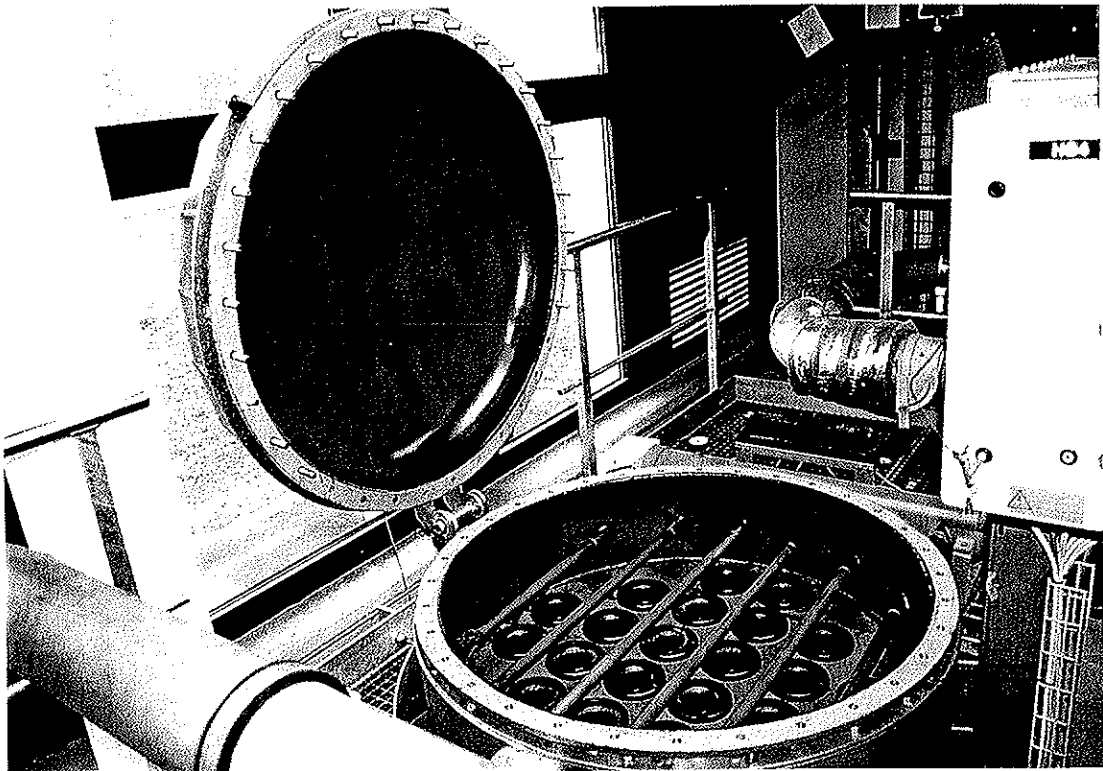


idea 16.1.02

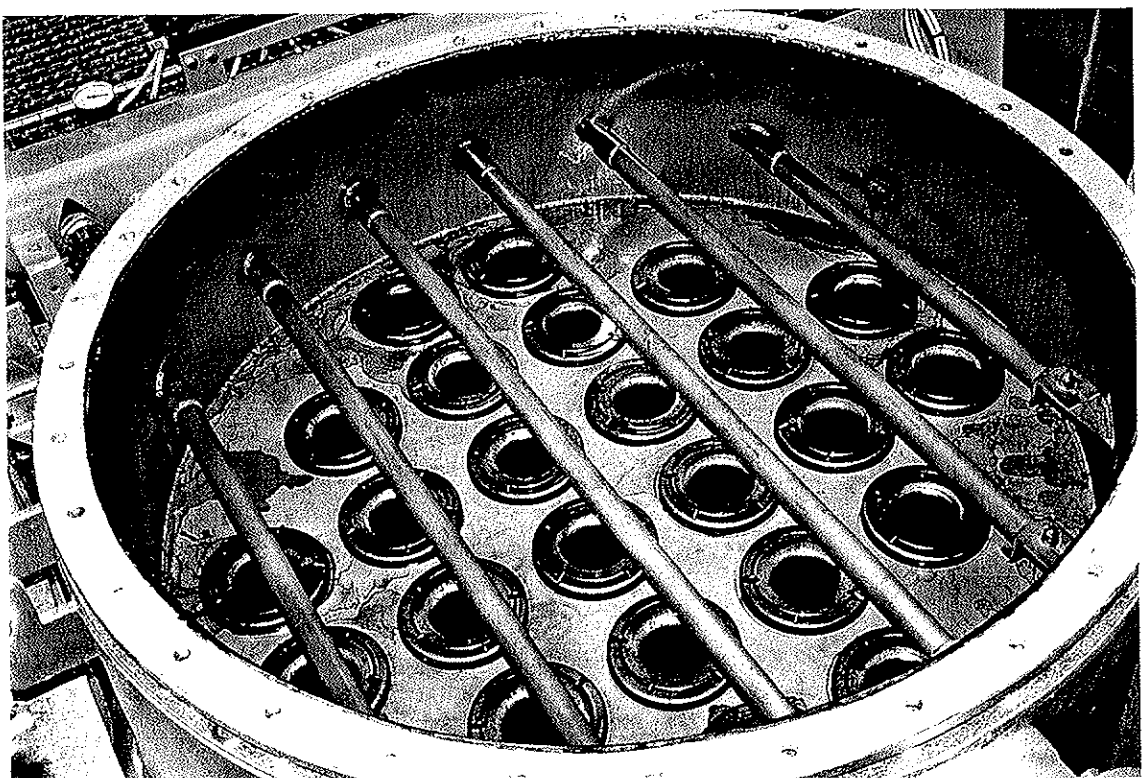
Geöffneter Filter vor dem Ausbau der Filterschläuche

⇒ **Inspektion des Filters:**

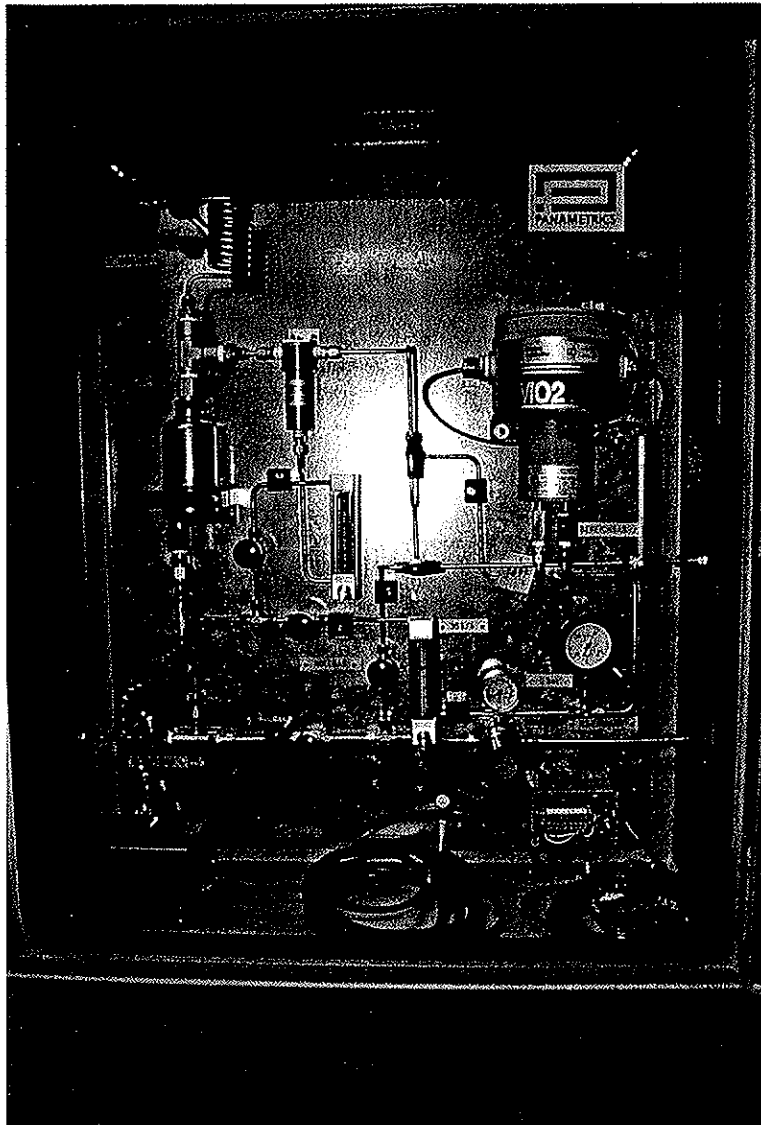
Die ganze Reingasseite ist mit einer dünnen Schicht von goldfarbenem bis braunem Teer bedeckt. In kaltem Zustand ist der Teer weitgehend erstarrt, früher (im heissen Filter) war er offensichtlich flüssig.



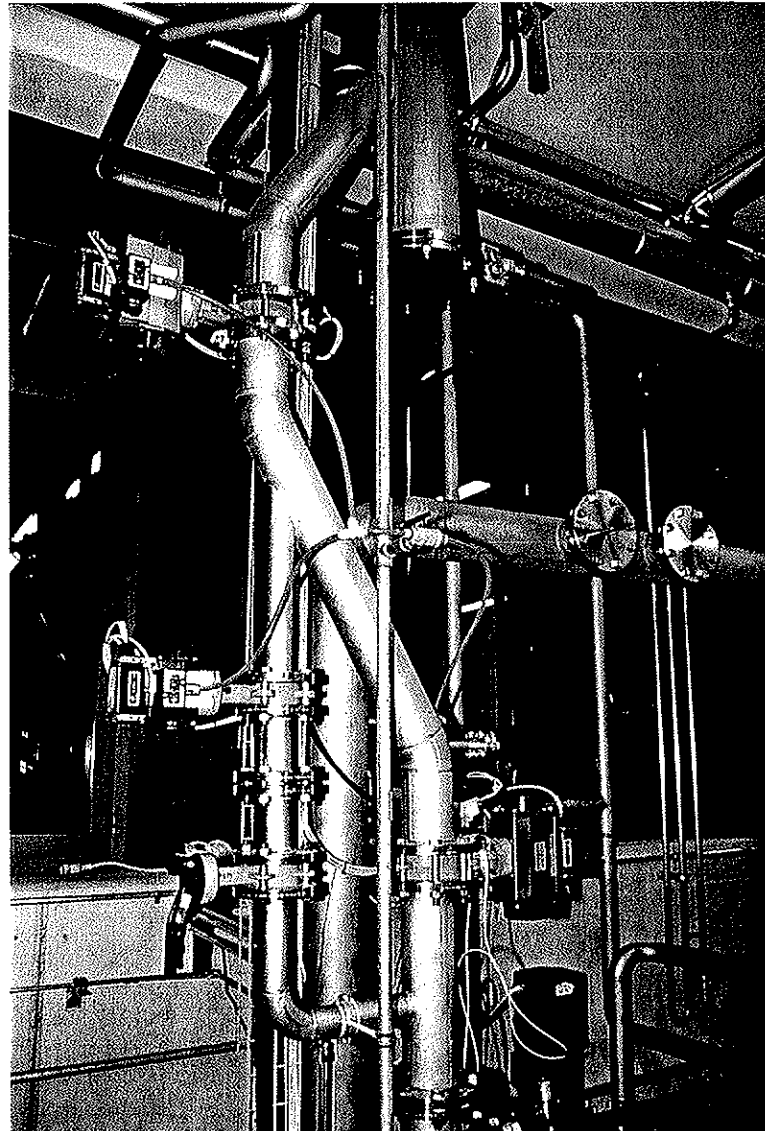
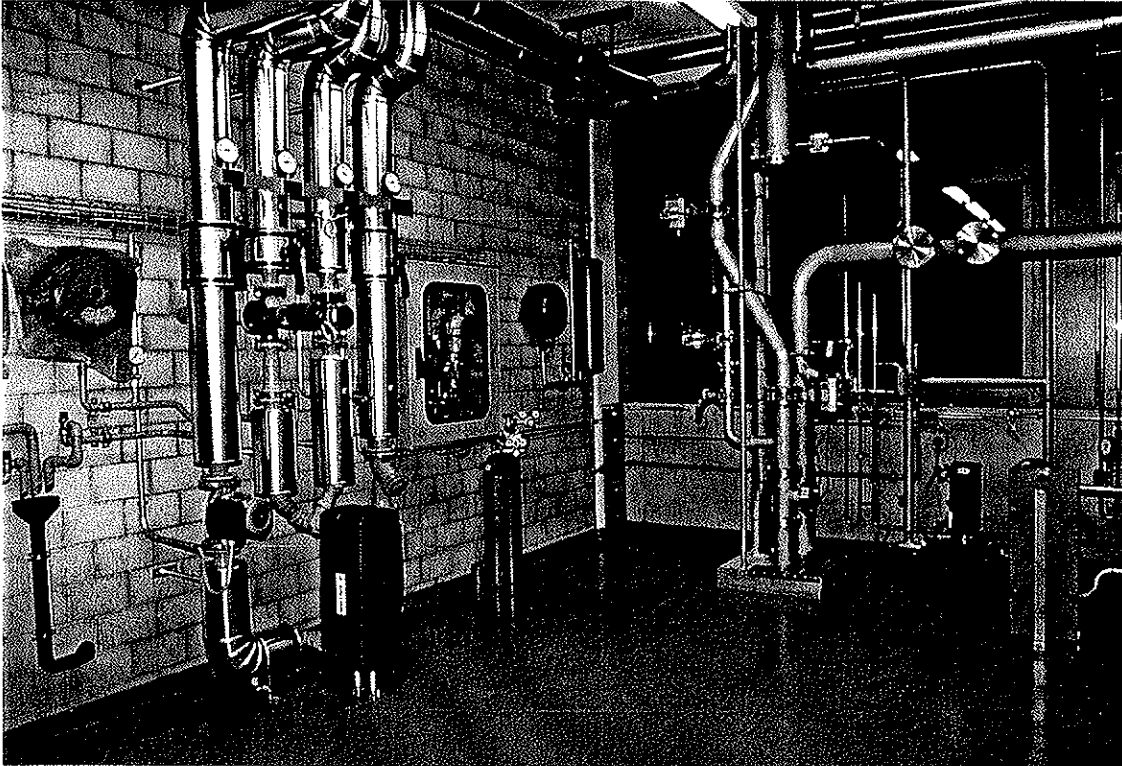
Doc. No. 32



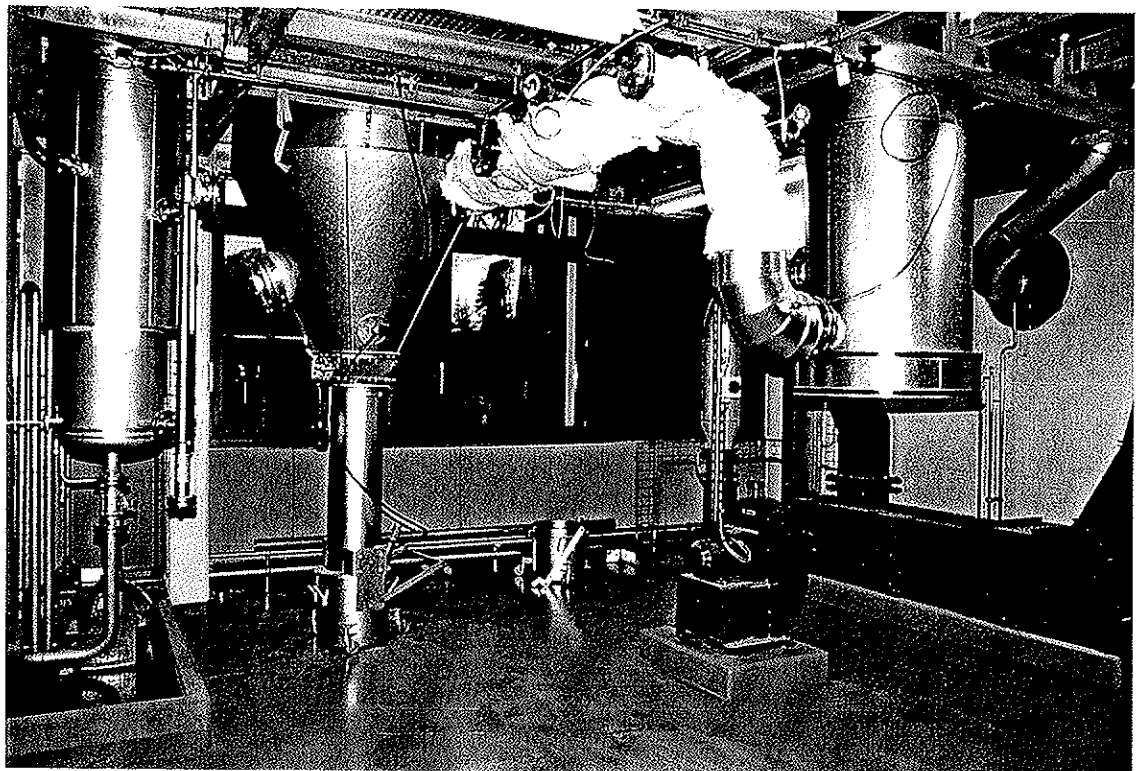
Doc. No. 33



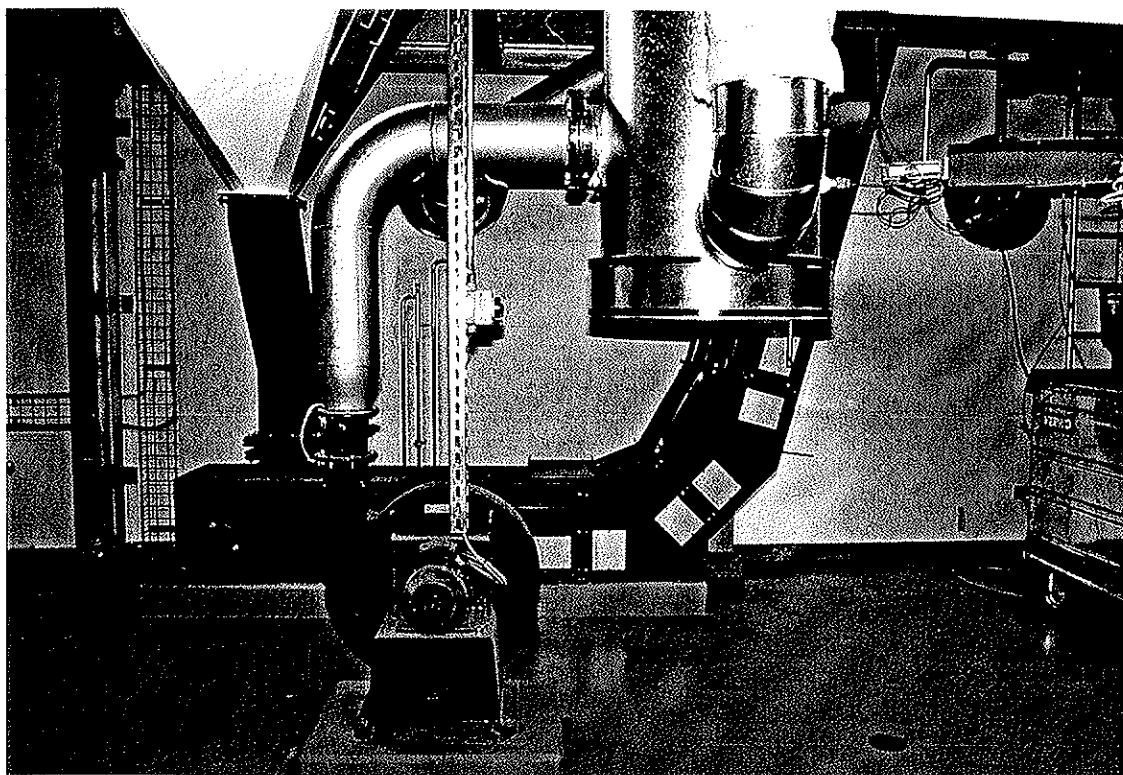
acc. 105.13A



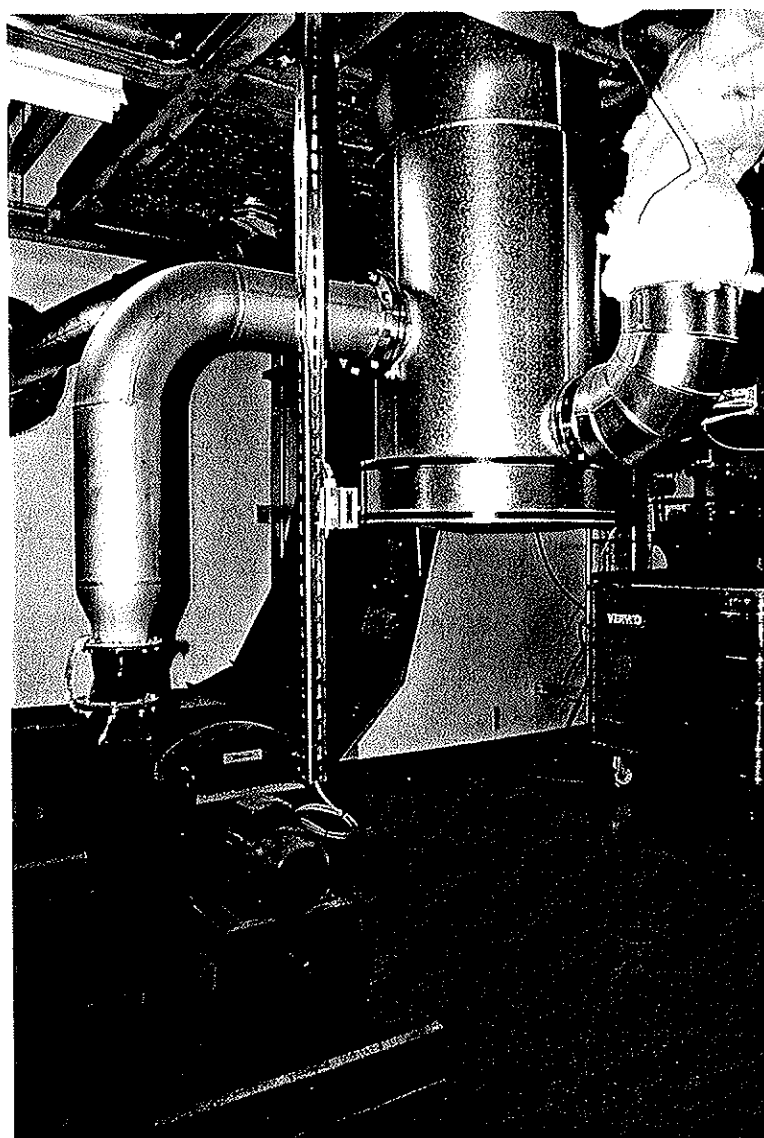




100.109 109

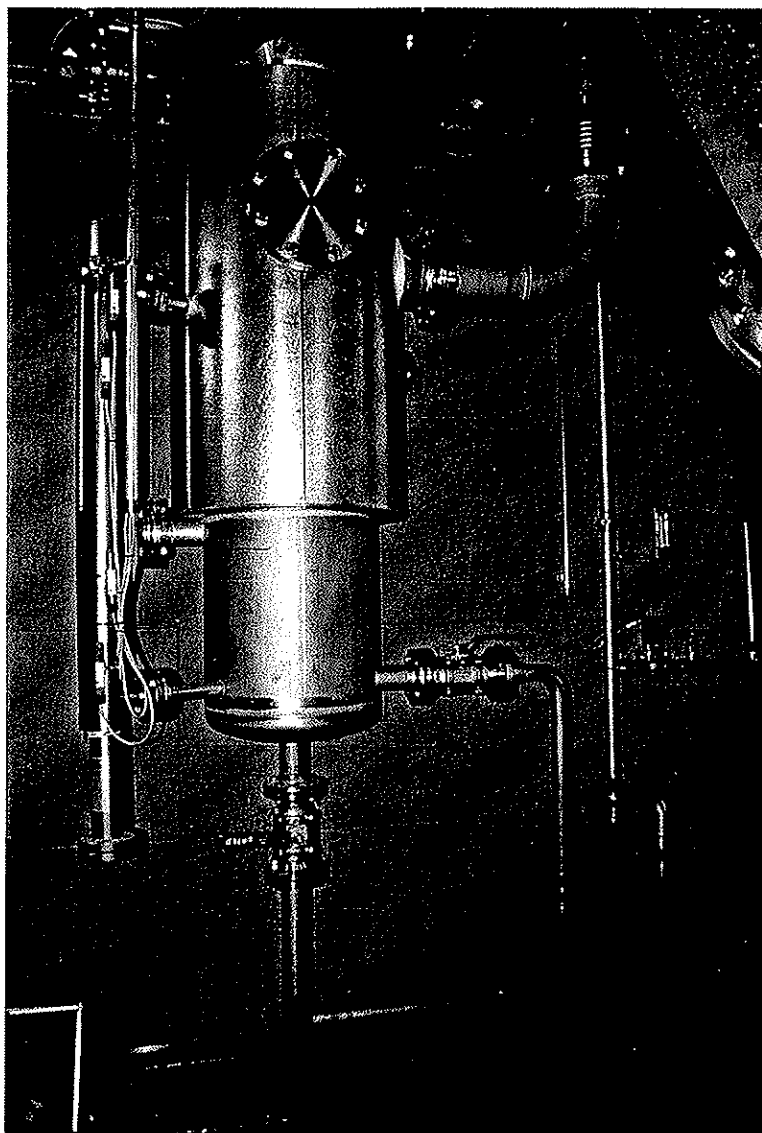


UCC. 109. 17A

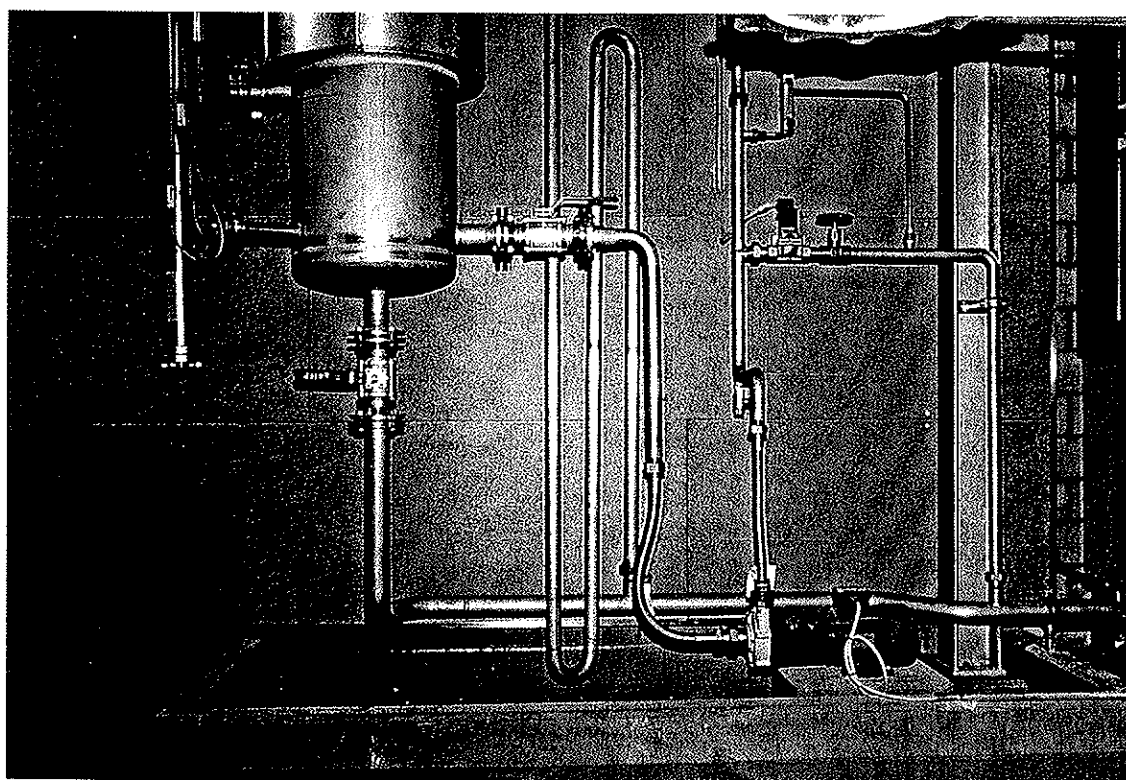


UCC. 109. 17A

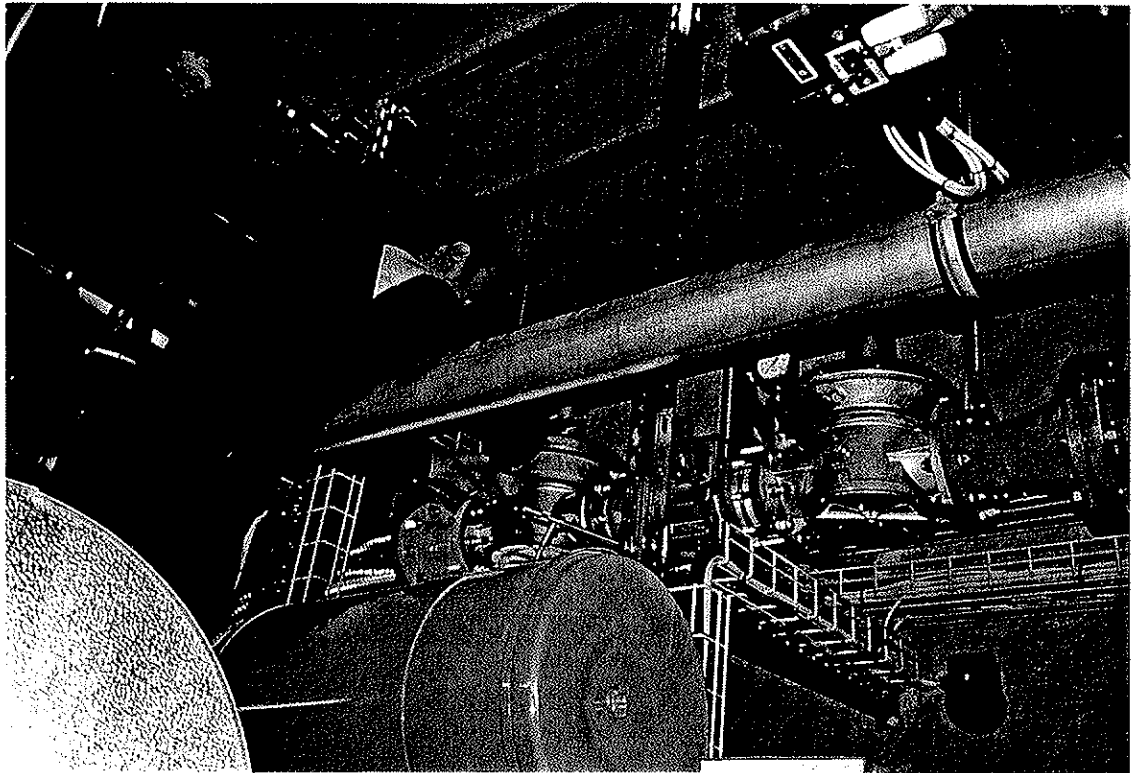




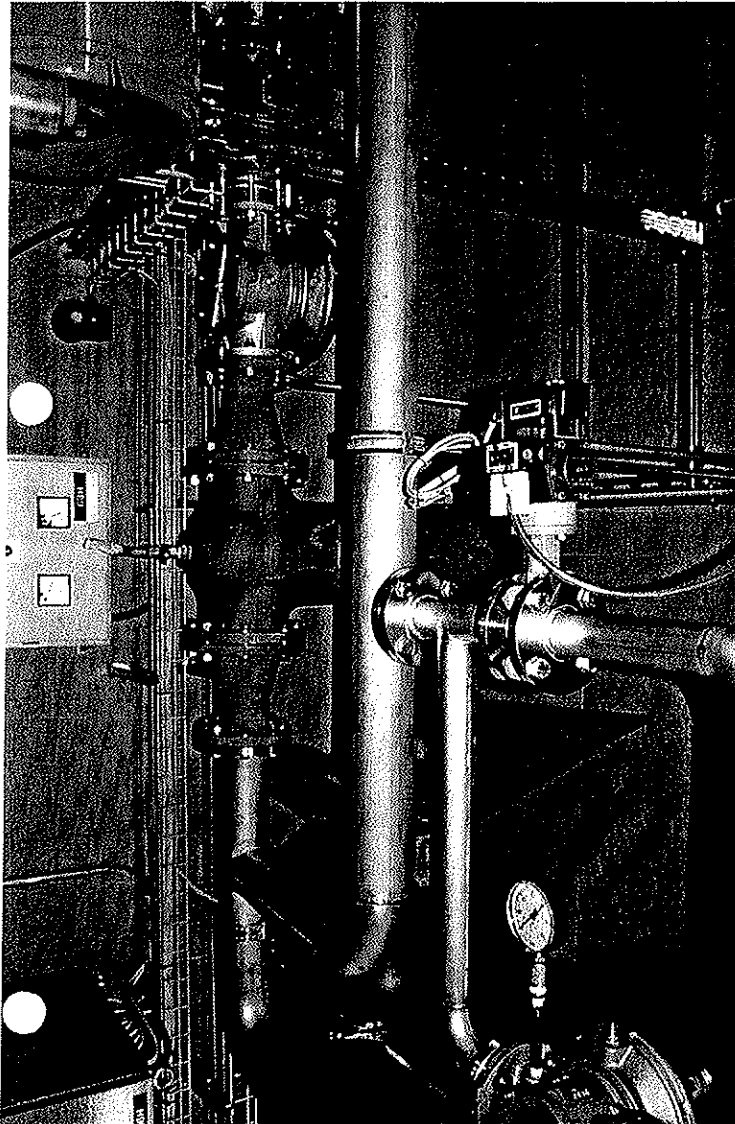
400.107.7



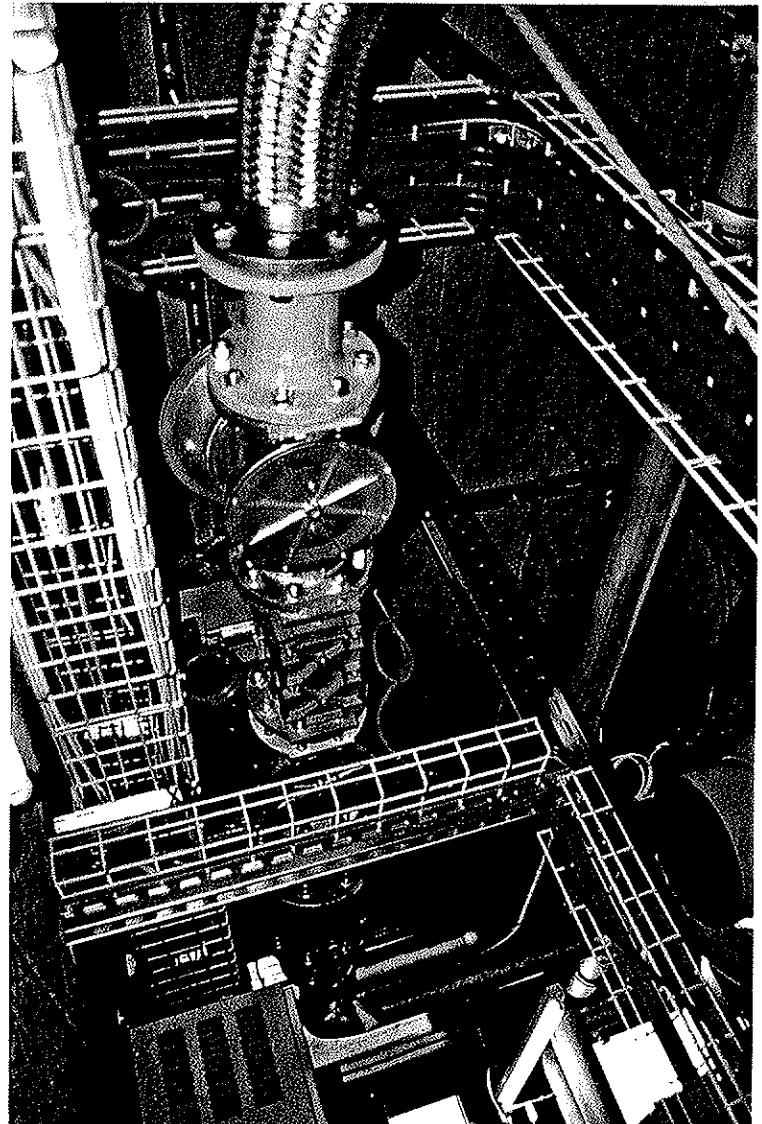
400.109.8A



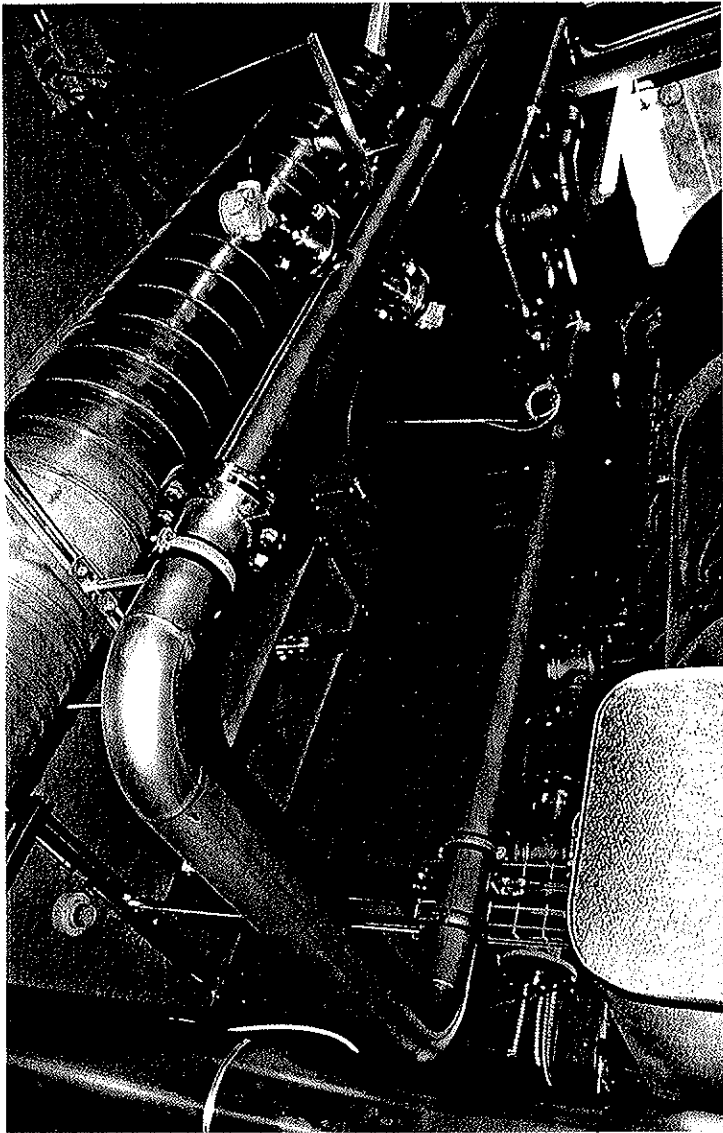
U01.7.19A



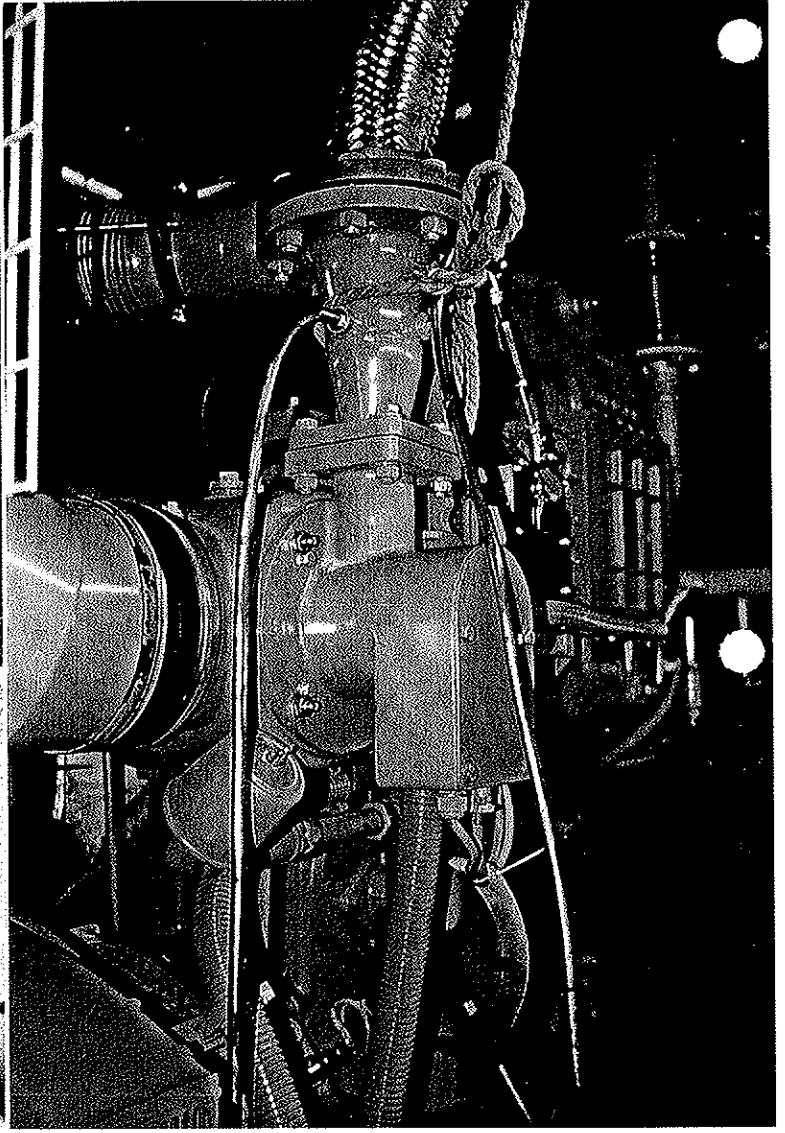
U01.7.27A



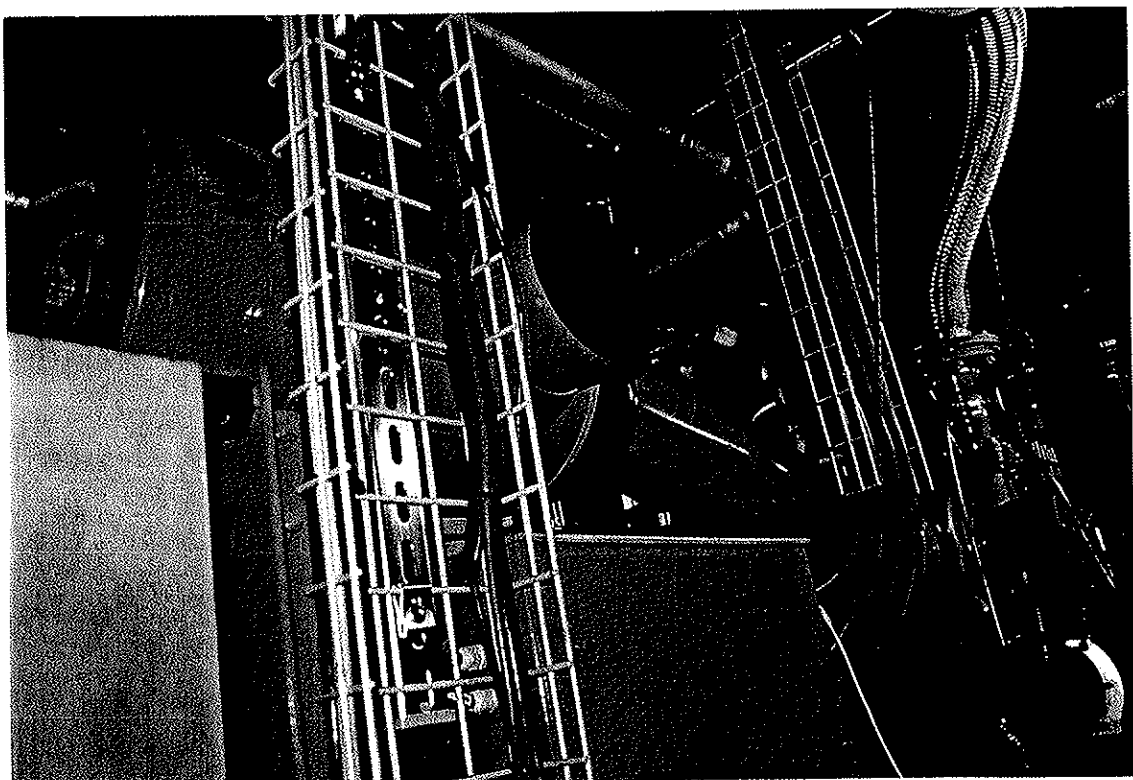
U01.7.36A



U01.7.25A



U01.7.30A



U01.7.29A