

**Das Fusionskeramiklabor
in den Heißen Zellen der KfK**

G. Lehrmann, W. Nägele, V. Prech,
D. Schild, K. Schneider, H. Ziegler

Hauptabteilung Versuchstechnik - Heiße Zellen

Beitrag zur 31. Plenarsitzung der Euratom-
Arbeitsgruppe "Heiße Zellen und Fernbedienung"
am 24./25. Juni 1992 in Marcoule

Das Fusionskeramiklabor in den Heißen Zellen der KfK

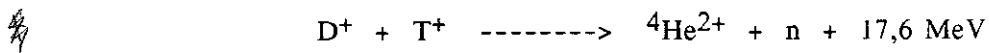
G. Lehrmann, W. Nägele, V. Prech, D. Schild, K. Schneider, H. Ziegler

*Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hauptabteilung Versuchstechnik - Heiße Zellen
Postfach 3640, D - 7500 Karlsruhe, Fed. Rep. Germany*

Einleitung

Die kontrollierte Kernfusion wird angesichts der ermutigenden wissenschaftlichen Erfolge der Plasmaphysik in den letzten Jahren heute als realistische Möglichkeit betrachtet, um Elektrizität unter ökologisch verantwortbaren und ökonomisch annehmbaren Umständen zu erzeugen. In demselben Umfang, in dem die physikalischen Fragestellungen nach und nach gelöst werden, gewinnen nun die technologischen und materialkundlichen Probleme zunehmend an Bedeutung.

Von den denkbaren Fusionsreaktionen scheint derzeit nur die Deuterium-Tritium-Fusion technisch realisierbar zu sein:



Während Deuterium aus Wasser gewonnen wird, ist Tritium auf der Erde praktisch nicht vorhanden und muß deshalb unter Mitwirkung der bei der Fusion freiwerdenden Neutronen aus Lithium "erbrütet" werden:

* Strukturkeramik
* Brutkeramik



Da Lithium in der Erdkruste in großen Mengen vorhanden ist, könnte die kontrollierte Kernfusion zu einer Energiequelle für einen sehr langen Zeitraum werden.

Technisch ist der Tritium-Brutprozeß realisierbar, indem das brennende Plasma mit einem lithiumhaltigen Brutmantel umgeben wird. Für dieses Blanket kommen nach heutiger Kenntnis nur Lithium-Keramiken (Brutkeramiken) oder ein Lithium-Blei-Eutektikum in Frage. Daneben kommen in einem Fusionsreaktor noch weitere keramische Werkstoffe zum Einsatz, etwa als Beschichtung der Ersten Wand oder als isolierende Hochfrequenzfenster usw. (Strukturkeramiken).

Sowohl Brut- als auch Strukturkeramiken werden im KfK auf ihre Verwendungsfähigkeit untersucht. Gegenstand der Untersuchungen ist u. a. das Bestrahlungsverhalten der Keramiken im Hinblick auf

- Wechselwirkung zwischen Keramik und Edelstahl bzw. Beryllium
- Neutronenschwellen
- Mikrostruktur
- Kinetik der Tritiumfreisetzung
- thermische Leitfähigkeit
- mechanische Eigenschaften.

Während die Strukturkeramiken keine besonderen Probleme bei der Handhabung aufwerfen, müssen für die Untersuchung der Brutkeramiken spezielle Handhabungsbedingungen geschaffen werden. Die Gründe liegen in den Eigenschaften sowohl des Tritiums als auch der Brutkeramik:

- Tritium hat eine hohe spezifische Aktivität ($3,6 \times 10^{14}$ Bq/g) und ist als Wasserstoffisotop sehr beweglich. Seine radiologischen Eigenschaften hängen wegen der unterschiedlichen Aufnahmefähigkeit des Körpers sehr stark von der chemischen Form ab, in der es vorliegt. In der oxidierten Form HTO ist seine Radiotoxizität zum Beispiel 10000 mal höher als in der nicht-oxidierten Form HT. Die Inkorporation von 9×10^9 Bq HTO bewirkt eine Folgedosis von 50 mSv.
- ✕- Wesentliche Eigenschaften von Brutkeramiken werden durch Normalatmosphäre verändert. Die Brutkeramikproben müssen deshalb in einer hochreinen Inertgasatmosphäre gehandhabt werden. Vor allem die Tritiumfreisetzung aus der Keramik wird durch geringe Spuren von Feuchte merklich beeinflusst.

Die Handhabung erfordert Boxen hoher Dichtheit mit einer hochreinen Inertgasatmosphäre sowie eine ständige Überwachung der Tritiumkonzentration und der Verunreinigungen dieser Atmosphäre (Sauerstoff und Feuchte). Für die Brut- und Strukturkeramikarbeiten wurde ein neues Labor eingerichtet, weil die vorhandenen Zellen aus den folgenden Gründen nicht dazu geeignet waren:

- Alle vorhandenen gasdichten Zellen sind Plutonium-kontaminiert. Der Probenaustausch mit anderen Labors ist dadurch sehr erschwert.
- Die Dichtheit der vorhandenen Zellen reicht nicht aus, um die notwendige Reinheit der Atmosphäre aufrecht zu erhalten. Außerdem würden große Volumina von nicht-radioaktiven Prozeßflüssigkeiten des vorhandenen Schutzgassystems mit Tritium kontaminiert werden.
- Die vorhandenen Zellen sind nicht auf Tritium überwacht und zuluftseitig nicht tritiumdicht abschließbar.
- Es gibt in den vorhandenen Zellen keine Rückhaltevorräte für Tritium.

Im folgenden wird über die Auslegung und den Aufbau der Anlage berichtet.

Auslegung und Aufbau

Für die Auslegung des Fusionskeramiklabors waren folgende Forderungen von Bedeutung:

- Handhabung von Bestrahlungseinsätzen mit maximal 1×10^{12} Bq Co^{60} Aktivitätsäquivalent in den abgeschirmten Boxen
- wahlweise Reinstgas- oder Lüftungsbetrieb; im Reinstgasbetrieb < 5 ppm O_2 und < 5 ppm H_2O
- unabhängige Einstellung der Betriebszustände in benachbarten Boxen
- keine Beeinträchtigung der Reinstgas-Atmosphäre durch Proben transfer zwischen den Boxen

Die Abbildung 1 zeigt den Grundriß des Labors. Die Anlage besteht aus einer Bleizelle (Abb. 2) und einer Handschuhboxenreihe (Abb. 3) mit jeweils vier Boxen. Die Abschirmwände der Bleizelle sind allseitig 20 cm dick. Die Deckenabschirmung besteht aus 20 cm Stahl. Gegen den darunterliegenden Maschinenraum ist die Zelle durch eine 30 cm starke Betondecke und zusätzlich durch 5 bzw. 10 cm Blei abgeschirmt. Jede abgeschirmte Box hat eine Arbeitsstation (Abb. 4) mit einem Strahlenschutzfenster und einem Paar Parallelmanipulatoren mit drei Gelenken (A202, Fa. Wälischmiller). Die Handschuhboxen sind von zwei Seiten bedienbar.

Alle Boxen sind lüftungstechnisch vollständig entkoppelt. Der Proben transfer erfolgt über vakuumdicht verschließbare, evakuierbare und mit Stickstoff spülbare Schleusrohre zwischen benachbarten Boxen. Zwischen den beiden Boxenreihen erfolgt der Proben transfer über eine mit Reinstgas im Unterdruck betriebene Rohrpostanlage. Diese wird beim Versand von Proben zur Handschuhboxenreihe automatisch blockiert, falls die Dosisleistung des Versandgutes einen vorgegebenen Grenzwert überschreitet.

Die Boxen können unabhängig voneinander wahlweise entweder mit Stickstoff, der über eine Gasreinigungsanlage im geschlossenen Kreislauf umgewälzt wird, oder mit vorgetrockneter Luft aus einer Trocknungsanlage (relative Feuchte $< 10\%$), die an das Gebäudeabluftsystem abgegeben wird, gespült werden. Es finden etwa 10 Gaswechsel bzw. 15 Luftwechsel je Stunde statt. Für die Festlegung der zulässigen Leckraten für die einzelnen Boxen waren die Anforderungen an die erreichbare Stickstoffreinheit maßgebend, so daß die erreichten Leckraten nur einen Bruchteil der nach den Sicherheitsnormen für Radionuklidboxen geforderten Werte betragen.

Die Gasreinigungsanlage (Abb. 5) wälzt mittels eines Gebläses den Stickstoff über ein Kupferbett als Sauerstofffilter und ein Molekularsieb als Feuchtefilter um. Die Reinigungsstrecke scheidet gleichzeitig auch Tritium aus dem Kreislauf als HTO im Molekularsieb ab. Es sind zwei unabhängige Reinigungsstrecken vorhanden, so daß die Regenerierung einer beladenen Reinigungsstrecke ohne Unterbrechung des Reinstgasbetriebes erfolgen kann. Dazu wird das im Kupferbett gebildete Kupferoxid mit Formiergas (8 % H_2) regeneriert und das Molekularsieb bei 180°C getrocknet und evakuiert.

Da die Gasreinigungsanlage nur bei Restsauerstoffgehalten von weniger als 1000 ppm betrieben werden darf, können die Boxen zum Übergang von Luft- auf Reinstgasbetrieb mit Stickstoff aus einem Gasflaschenvorrat gespült werden. Diese Spüleinrichtung dient gleichzeitig zur Brandbekämpfung innerhalb der Boxen. Die ständige Verfügbarkeit der Gasreinigungsanlage aus Sicherheitsgründen ist somit nicht mehr erforderlich.

Beim Spülen der Boxen mit Luft oder Stickstoff wird der Unterdruck über gewichtsbelastete, hilfsmittelnunabhängige Regelventile (Jahan-Ventile) konstant gehalten, während im Reinstgas-Umwälzbetrieb das Druckhaltesystem der Reinstgasanlage den Unterdruck im Regelbereich hält.

Bei Ausfall des Unterdrucks oder bei Nichtverfügbarkeit von Hilfsmedien oder Energie wird automatisch auf eine gesicherte "Rückzugsposition" umgeschaltet, die wir "Ruhender Betrieb" nennen. Dabei ist die Box zuluftseitig abgesperrt und abluftseitig an das Gebäudeabluftsystem angeschlossen. Diese Sicherheitsschaltung wird ebenfalls automatisch ausgeführt, wenn in den Zuluftsträngen jeder Box installierte Strömungswächter während des Luftbetriebes eine geringere Strömungsgeschwindigkeit als 0,5 m/s detektieren. Dadurch wird verhindert, daß Tritium gegen die Luftströmung diffundiert und dadurch das Zuluftsystem und die umliegenden Räume kontaminiert.

Die Abbildung 6 zeigt das Lüftungstechnische Anschluß- und Schaltschema einer Box. Zur Vermeidung von Druckstößen oder Schwankungen bei Betriebsarten-Umschaltungen sind die gemeinsam zu schaltenden Kugelhähne einer Box mechanisch miteinander gekoppelt und werden durch einen gemeinsamen Antrieb bewegt. Da auch alle Leitungsquerschnitte einer Schaltgruppe gleich bemessen sind, ist auch bei einem Versagen des Antriebes während einer Umschaltung sichergestellt, daß die zu- und abfließenden Gasströme jeweils gleiche Strömungswiderstände vorfinden und der Unterdruck nicht unzulässig beeinflusst wird.

Die Atmosphäre jeder Box wird hinsichtlich des Unterdrucks sowie des Sauerstoff-, Feuchte- und Tritiumgehaltes kontinuierlich überwacht (Abb. 7). An jeder Box befinden sich die Schaltelemente und Anzeigen für den Betrieb der Boxen (Abb. 4). Sie sind so übersichtlich angeordnet und gegeneinander verriegelt, daß auch Zellentechniker ohne Lüftungstechnische Spezialkenntnisse Umschaltungen vornehmen können. Darüber hinaus sind die Informations- und Schaltpunkte der Anlage auf die computergestützte Gebäudeleitanlage aufgeschaltet.

Versuchseinrichtungen

Die zu untersuchenden Brut- und Strukturkeramiken befinden sich während der Reaktorbestrahlung in Edelstahlkapseln. Die Kapseln sind entweder gasdicht verschweißt oder an eine Gasspülung angeschlossen. Die Edelstahlkapseln werden durch die Neutronenbestrahlung aktiviert und können deshalb nach der Bestrahlung nur in abgeschirmten Boxen gehandhabt werden. Bei den Keramiken tragen hauptsächlich aktivierbare Verunreinigungen zur Dosisleistung bei. Nach Entfernen der Edelstahlhülle können die Proben deshalb in der Regel ohne Abschirmung gehandhabt werden.

Die bestrahlten Kapseln werden über die Doppeldeckelschleuse der Box 2 in die Bleizelle eingeschleust. Box 2 dient als Schleus- und Lagerbox.

In der Box 1 befindet sich eine Perforiervorrichtung zur Entnahme von Gasproben oder zum Entfernen des Plenumgases aus der Bestrahlungskapsel. Sie besteht im wesentlichen aus einem evakuierbaren Rezipienten mit Vakuummeßröhren und Gasanschlüssen. Zum Perforieren wird eine Kapsel in den Rezipienten eingesetzt, dieser wird evakuiert und mittels eines Absperrventils von der Vakuumpumpe getrennt. Die Kapsel wird mit einem

gehärteten Dorn an der dafür vorgesehenen Stirnseite perforiert, wobei das Plenumgas aus der Kapsel in den evakuierten Rezipienten expandiert. Dabei kann ein angeschlossenes Gasometer befüllt werden. Anschließend wird der Rezipient mit Stickstoff gespült und das Spülgas über ein Molekularsieb in die Abluft eingeleitet. Eine Kontamination der Box mit dem im Plenumgas enthaltenen Tritium wird so weitgehend vermieden. Die perforierte Kapsel wird nach dem Spülvorgang aus dem Rezipienten entnommen und in einer weiteren Vorrichtung durch Abrollen geöffnet. Die Keramikproben werden entnommen, fotografiert und in neue, unbestrahlte Transportkapseln umgepackt. Die Transportkapseln werden entweder über Box 2 ausgeschleust oder mit einer Rohrpostanlage in die Handschuhbox 5 befördert.

In Box 5 befindet sich die Tritiumfreisetzungsanlage zur Bestimmung der Kinetik der Tritiumfreisetzung aus Brutkeramik. Eine Brutkeramikprobe wird in einem Ofen im Gasstrom ($\text{He} + 0,1 \% \text{H}_2$) erhitzt. Das in der Keramik gebundene Tritium wird dabei freigesetzt. Da die Brutkeramiken oxidische Lithiumverbindungen sind, geht das Tritium überwiegend in der oxidierten Form als HTO (oder T_2O) in die Gasphase über. Der Gasstrom wird zur Reduktion von HTO durch ein beheiztes Zinkbett geleitet. Zur Vermeidung der Adsorption von oxidiertem Tritium in der Verbindungsstrecke zwischen Probeofen und Zinkbett ist diese so kurz wie möglich gehalten und zusätzlich auf 300°C beheizt. Anschließend wird die Tritiumaktivität mit einer Durchflußionisationskammer in Abhängigkeit von der Temperatur der Brutkeramikprobe, des Gasflusses und der Zeit gemessen. Mit der Reduktion des oxidierten Tritiums im Zinkbett wird eine Kontamination der Rohrverbindungen und der Ionisationskammer, die sich bei Raumtemperatur befinden, mit HTO bzw. T_2O weitgehendst vermieden.

In Box 6 befinden sich Lagerbehälter, eine Vorrichtung zur Dimensionskontrolle, eine Waage sowie ein Heliumpyknometer. Mit dem Heliumpyknometer wird nach dem Archimedischen Prinzip das Volumen des Keramikkörpers samt der geschlossenen Poren trocken und zerstörungsfrei bestimmt. Die Dichte wird berechnet und mit der theoretischen Dichte verglichen.

In Box 7 sind ein Quecksilberporosimeter und ein Ultraschallmeßkopf untergebracht (Abb.8). Mit dem Quecksilberporosimeter werden die Verteilung der Durchmesser von offenen Poren und die Dichte bestimmt. In einem Hochdruckautoklaven wird Quecksilber in die Poren der Keramik gedrückt. Das in die Keramik eindringende Quecksilbervolumen wird dabei in Abhängigkeit vom Druck gemessen. Über die Oberflächenspannung des Quecksilbers besteht ein Zusammenhang zwischen dem anstehenden Druck und dem Radius der bei diesem Druck mit Quecksilber angefüllten Poren. Bei dem apparativ vorgegebenen Höchstdruck von 4000 bar sind Porendurchmesser bis minimal ca. 5 nm meßbar. Bei hochdichten Keramikproben ergibt sich aufgrund des hohen Anteils von Poren mit kleinem Durchmesser ein deutlicher Unterschied in den mit dem Quecksilberporosimeter und dem Heliumpyknometer gemessenen Dichten. Mit dem Ultraschallmeßkopf wird die Schallgeschwindigkeit in Keramiktabletten gemessen. Zusammen mit der Geometrie und der Dichte der Tabletten läßt sich der Elastizitätsmodul berechnen, welcher wegen der bestrahlungsinduzierten Kristalldefekte kleiner wird. Außerdem erfolgt in Box 7 die Präparation von Keramikpellets für mechanische Prüfungen in der Materialprüfanlage der Heißen Zellen.

Die Box 8 ist für weitere spezielle Untersuchungen an Brutkeramikugeln (Durchmesser ca. 0,5 mm) vorgesehen. Apparaturen für die Bestimmung der Thermoschockbeständigkeit sowie für die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Kugelschüttungen werden in dieser Box

aufgebaut. Mit einem weiterem Versuchsaufbau wird die Druckfestigkeit einzelner Kugeln bestimmt .

In **Box 4** befindet sich ein Versuchsaufbau zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Struktur- und Brutkeramiktabletten mittels der Laser-Flash-Methode. Die tablettenförmige Probe wird im Vakuum in einem Ofen (Abb. 9) auf eine vorgegebene Temperatur aufgeheizt. Der Puls eines YAG-Lasers wird auf einer der Stirnflächen der eingeschwärzten Keramiktablette absorbiert. Gleichzeitig wird auf der anderen Stirnseite mit einem Infrarotdetektor der Temperaturanstieg zeitaufgelöst beobachtet. Aus der so erhaltenen Temperatur-Zeit-Kurve läßt sich mit der Probengeometrie, der Probendichte und der Laserpulsleistung die Wärmeleitfähigkeit der Probe bei der eingestellten Temperatur berechnen.

Zur weiteren Charakterisierung der Mikrostruktur (Licht- und Rasterelektronenmikroskopie, Röntgenbeugung) und mechanischer Eigenschaften werden Proben zu anderen Zellen geschleust.

Betrieb des Labors

Voraussetzung für die Aufnahme des Laborbetriebes war eine Erweiterung der bestehenden atomrechtlichen Genehmigung für die Heißen Zellen, die es nun gestattet, mit 10^{14} Bq Tritium in der Laboranlage umzugehen. Pro Jahr erlaubt die Aufsichtsbehörde die Emission von 5×10^{12} Bq Tritium mit der Abluft. Zur Überwachung der Emission wird ein geregelter Teilstrom der Abluft kontinuierlich über zwei hintereinander angeordnete Molsiebe mit zwischengeschalteter katalytischer Oxidationsstufe geleitet, die wöchentlich ausgewertet und bilanziert werden. Dadurch erreichen wir eine getrennte Erfassung der unterschiedlich radiotoxisch wirkenden Formen HTO und HT. Bei der Festlegung des Emissionsgrenzwertes ging die Behörde jedoch konservativ davon aus, daß Tritium ausschließlich in der radiotoxisch wirksameren Form des HTO emittiert wird, da über die Kinetik der Umsetzung von HT zu HTO in der Abluftfahne bisher keine quantitativen Angaben gemacht werden können, die eine exakte Dosisberechnung am ungünstigsten Aufpunkt erlauben würden.

In der Laboranlage wurden für den Umgang mit Tritium weitere spezielle Vorkehrungen getroffen:

- Die Tritium-führenden Komponenten von Versuchseinrichtungen wurden als Primäreinschluß möglichst hochvakuumdicht ausgeführt. Die Box bildet somit in der Regel nur das zweite Containment. Weil Tritium nur beim Beschicken der Versuchsaapparaturen direkt in die Atmosphäre der Boxen freigesetzt wird, weist diese meistens Tritium-Kontaminationen von weniger als 10^7 Bq/m³ auf.
- Wo in Versuchseinrichtungen größere Mengen an Tritium freigesetzt werden, wird das Abgas über Molekularsiebe bzw. Reduktionsstrecken mit nachgeschaltetem Metallhydridspeicher geleitet, um das Tritium in der Anlage zurückzuhalten. Die beladenen Tritiumsammler werden teilweise an andere Institute des Kernforschungszentrums für weitere Versuche abgegeben.

- Tritium diffundiert leicht durch viele organische Materialien oder wird in diese durch Isotopenaustausch eingelagert. Beim radioaktiven Zerfall des Tritiums bilden sich Radikale und führen zu Veränderungen dieser Materialien. Deshalb muß immer geprüft werden, ob organische Materialien unbedingt erforderlich sind oder durch andere Werkstoffe ersetzt werden können. Dichtungen und Handschuhe bestehen aus Butylkautschuk oder Viton, welche relativ dicht gegenüber Tritium sind.

- Die Raumluft des Labors wird mit großvolumigen Durchfluß-Proportionalzählrohren überwacht. Mit einer speziellen Auswerteelektronik (Pulse Rise Time Discrimination) werden die niederenergetischen Beta-Teilchen des Tritiums (Energie < 18 keV) separat erfaßt.
- Tritium kann nicht nur durch Inkorporation und Ingestion, sondern auch durch Permeation durch die Haut in den menschlichen Körper gelangen. Beim Arbeiten an Handschuhboxen ist deshalb darauf zu achten, daß die Versuchstechniker Überhandschuhe tragen, die zudem mehrmals täglich gewechselt werden sollten. Für die Berechnung der Dosisbelastung aus Tritiumkontaminationen der Raumluft muß zusätzlich zur Atemrate von 1,2 m³/h die "Hautrate" von 0,6 m³/h berücksichtigt werden.
- Das größte Inkorporationsrisiko für das Betriebspersonal stellt nach den Erfahrungen anderer Betreiber der Ölwechsel an Vakuumpumpen dar. Aus diesem Grund setzen wir nur ölfrei laufende Pumpen ein: Zur Erzeugung von Hochvakuum setzen wir Turbomolekularpumpen zusammen mit Membranvorpumpen ein, und Grobvakuum zum Spülen von Leitungen und Schleusen sowie zum Rohrposttransport erzeugen wir mit einer Gasstrahlpumpe.

Unsere bisherigen Betriebserfahrungen beim Umgang mit Fusionskeramiken haben gezeigt, daß die angewendeten Arbeitsverfahren ausreichenden Strahlenschutz bieten. Weder traten bisher Raumluftkontaminationen auf noch wurden Inkorporationen festgestellt. Auch die Einhaltung der Abluftgrenzwerte bereitet derzeit keine Probleme.

Wir sind der Meinung, daß bei entsprechender Berücksichtigung der hohen Mobilität und Permeationsfähigkeit des Tritiums bei der Auswahl der Materialien und Verfahren der Umgang mit Tritium keine wesentliche Strahlenbelastung verursacht.

Abbildung 1

Grundriß-Skizze des Labors für Fusionskeramikuntersuchungen

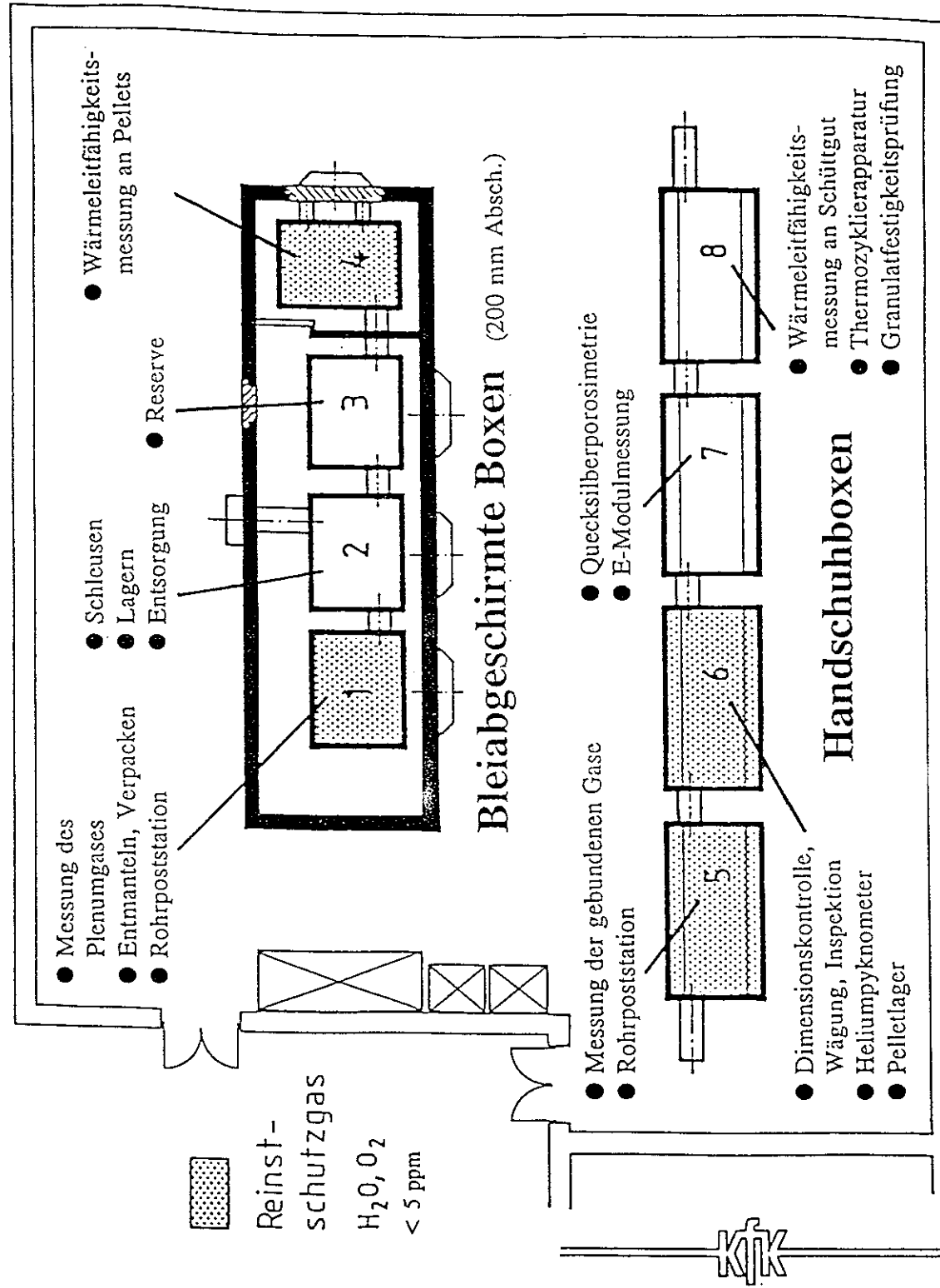


Abbildung 2

Bleizelle während der Aufbauphase

Die Bedienungsseiten der Boxen 1, 2 und 3 sind links. Um die Justierung von Laser-Strahlführungskomponenten innerhalb der Zelle zu vermeiden, wird Box 4 von vorne bedient, so daß der optische Strahlengang direkt durch die Box hindurch geführt werden kann. Schleus- und Interventionsöffnungen befinden sich auf der rechten Seite. Über der Bleizelle und dem Interventionsbereich ist ein Hallenkran installiert.

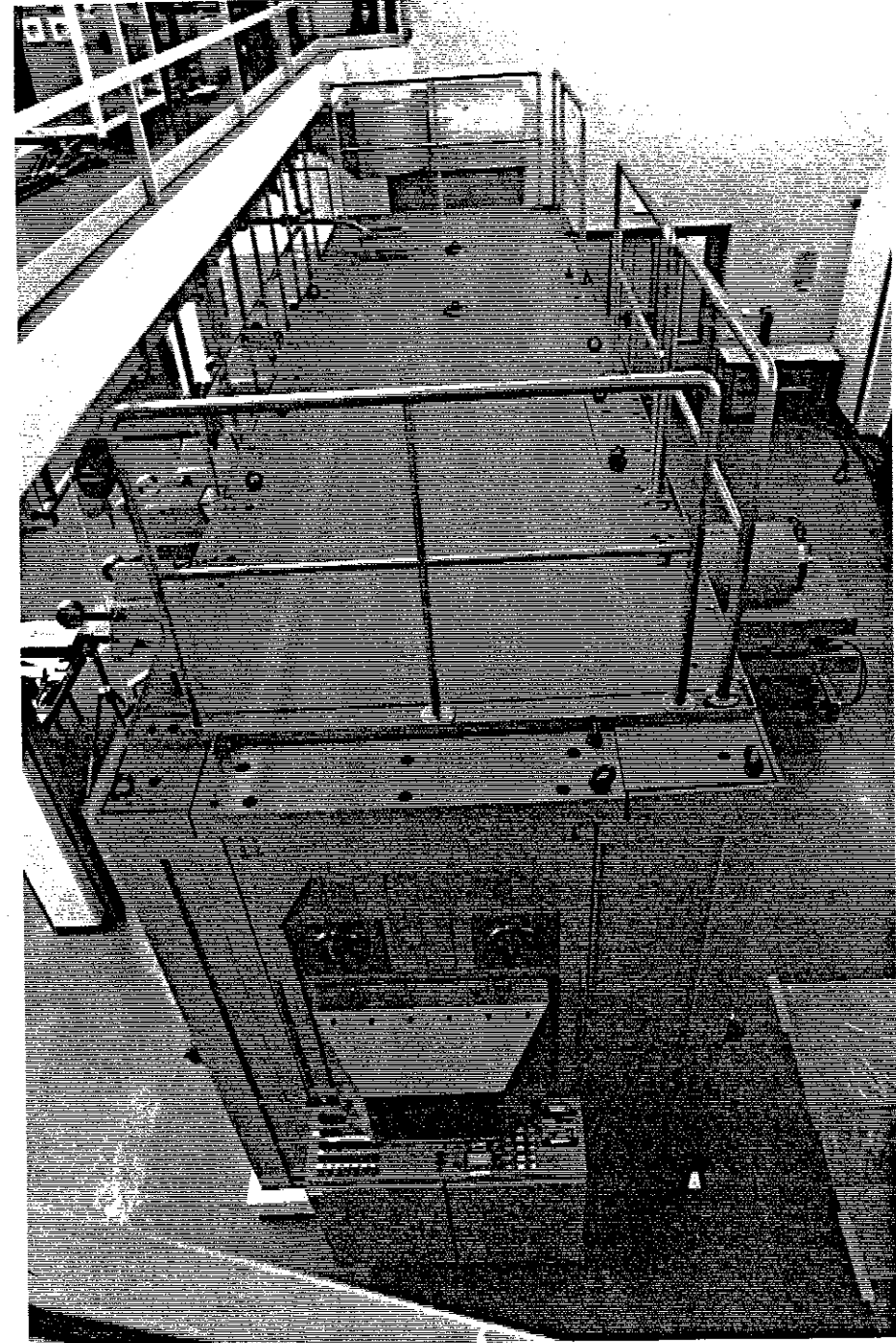


Abbildung 3

Handschuhboxenreihe während der Aufbauphase

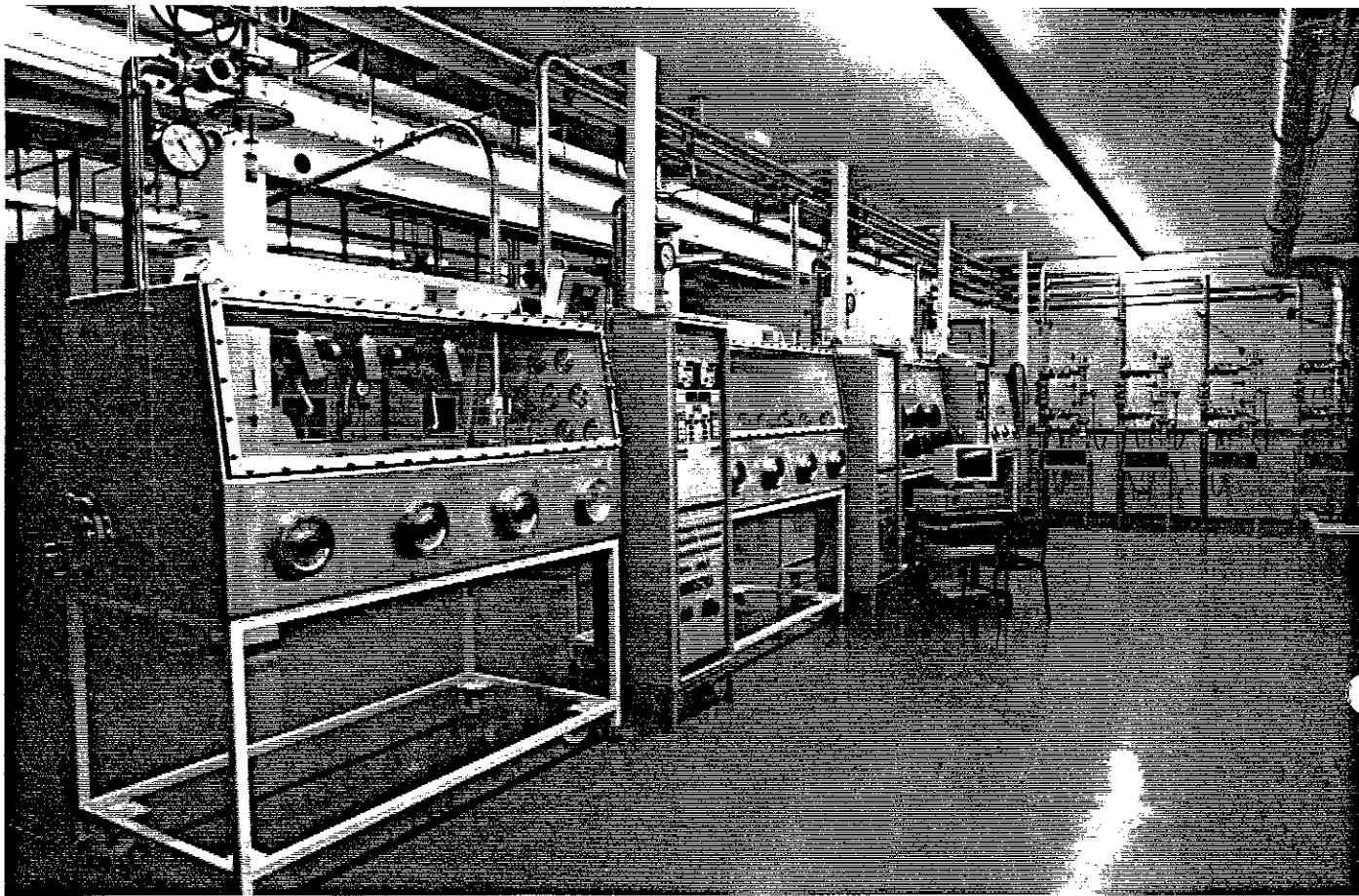


Abbildung 4

Arbeitsstation an der Box 1

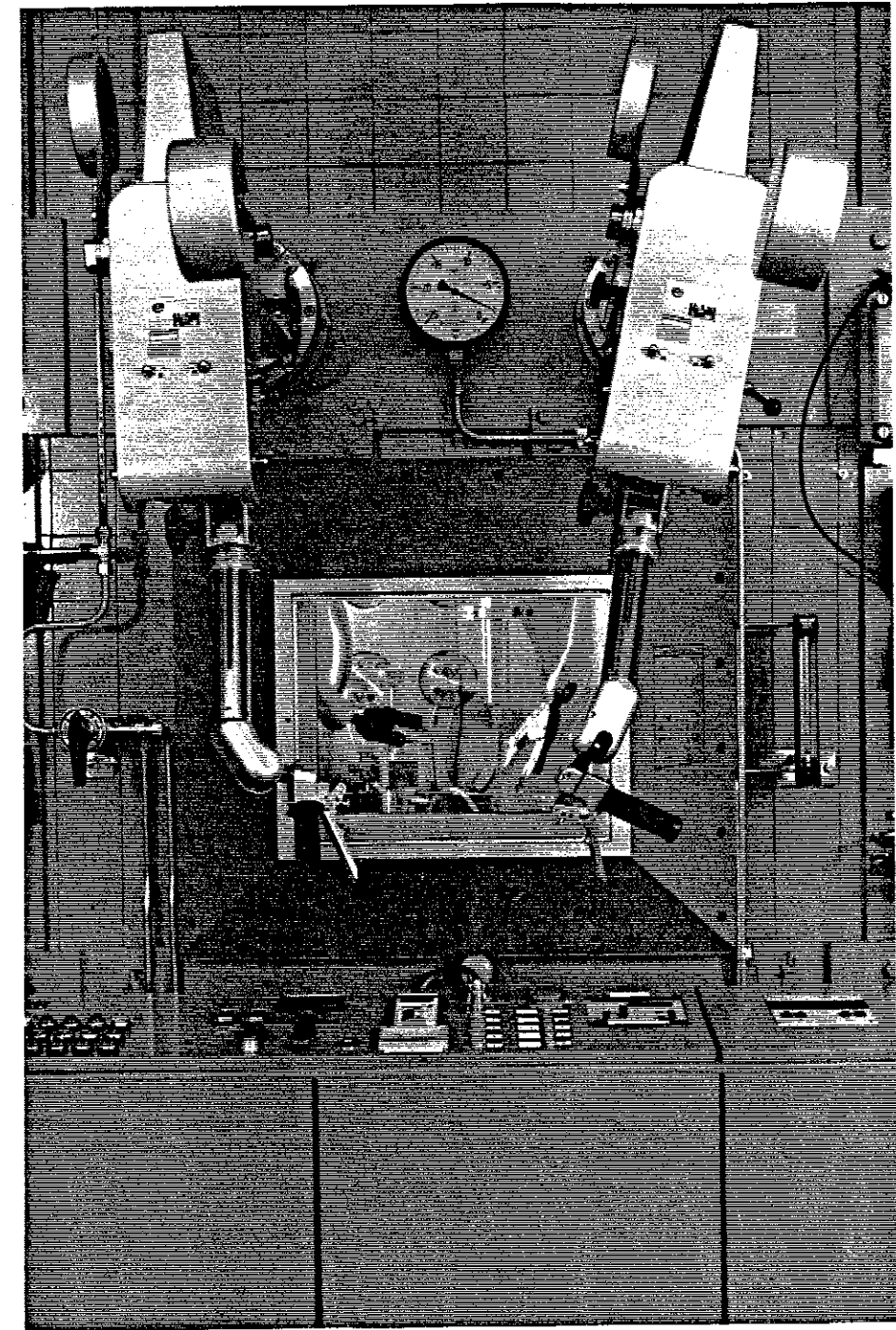


Abbildung 5

Maschinenraum unterhalb des Labors

Im Bildmittelpunkt ist die Gasreinigungsanlage zu sehen. Links an der Wand befinden sich die Lufttrocknungsanlage sowie die Schaltgruppen und Analysestrecken für die bleiabschirmten Boxen. Rechts im Bild ist ein Tritium-Raumluft-Monitor zu sehen.

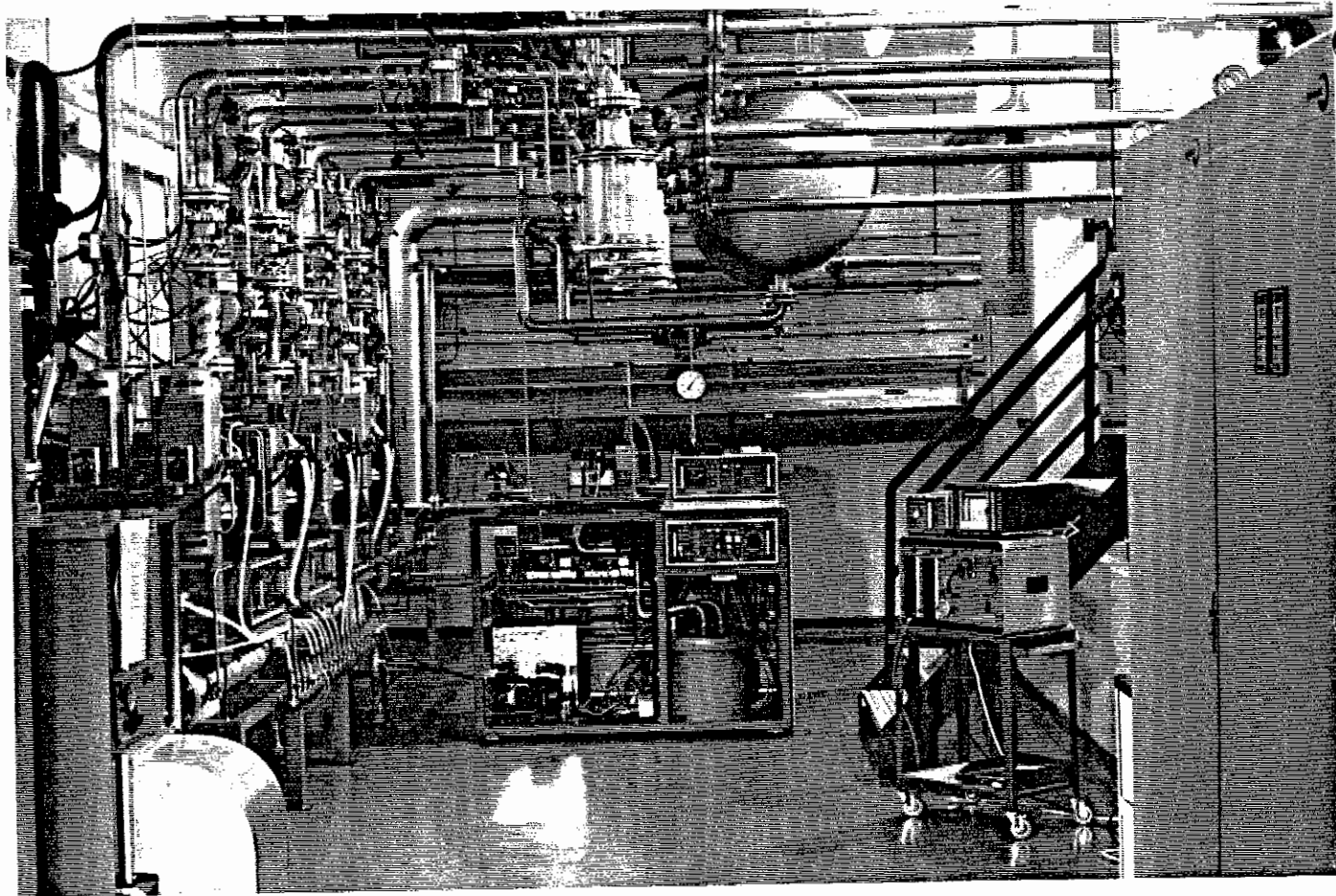


Abbildung 6

Lüftungstechnisches Anschluß- und Schaltschema einer Box

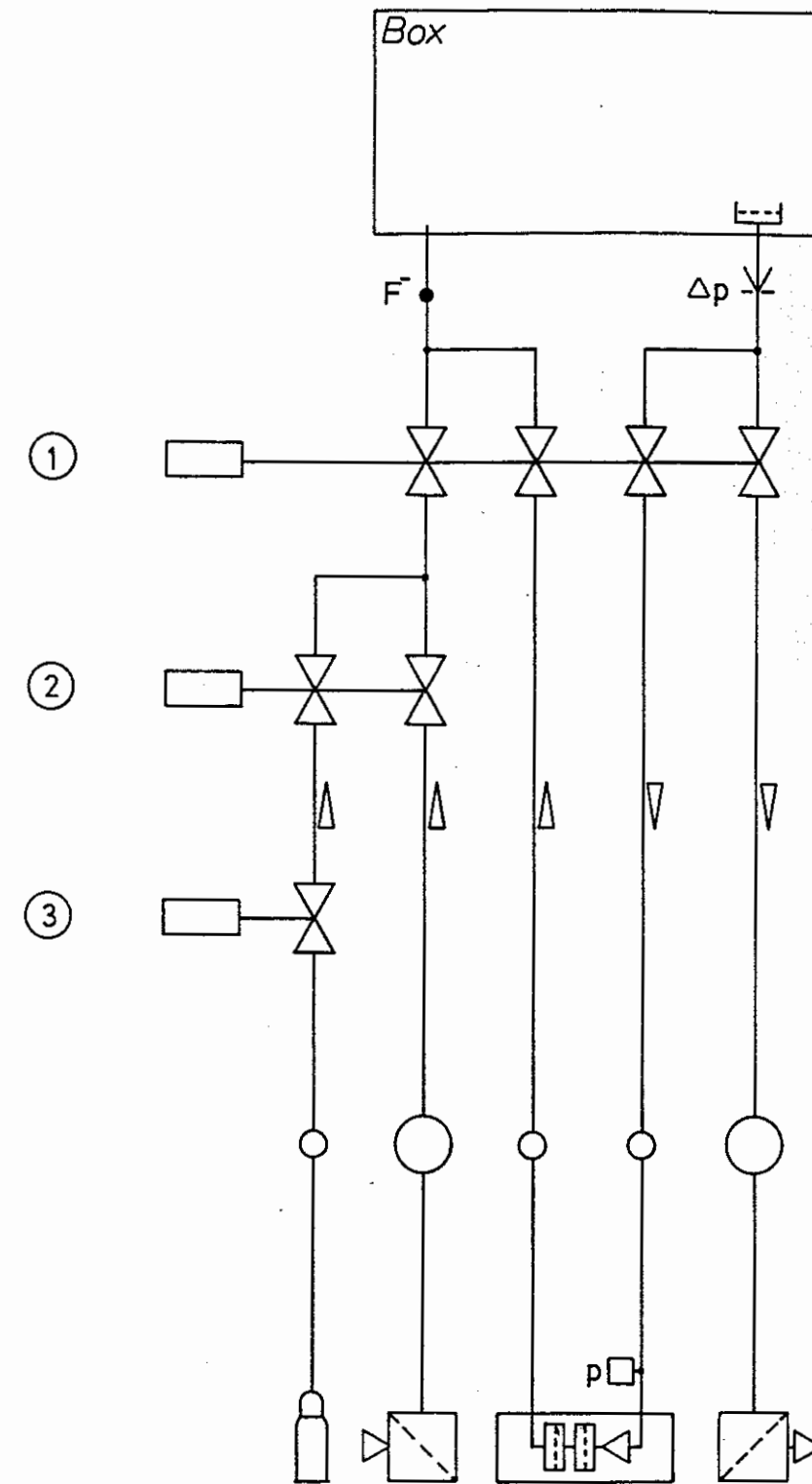


Abbildung 7

Analysestrecke für eine Box

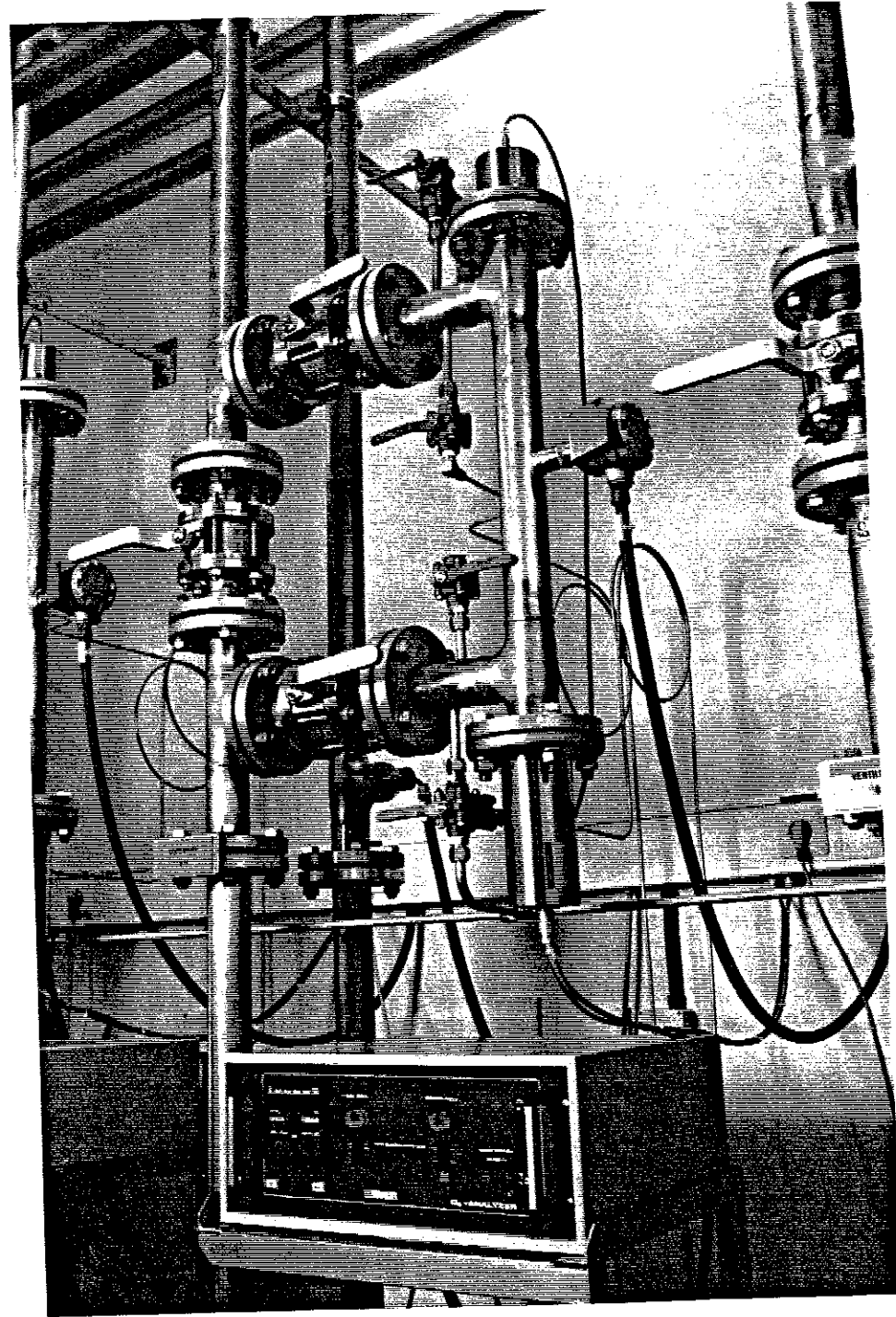


Abbildung 8

Box 7 mit Quecksilberporosimeter

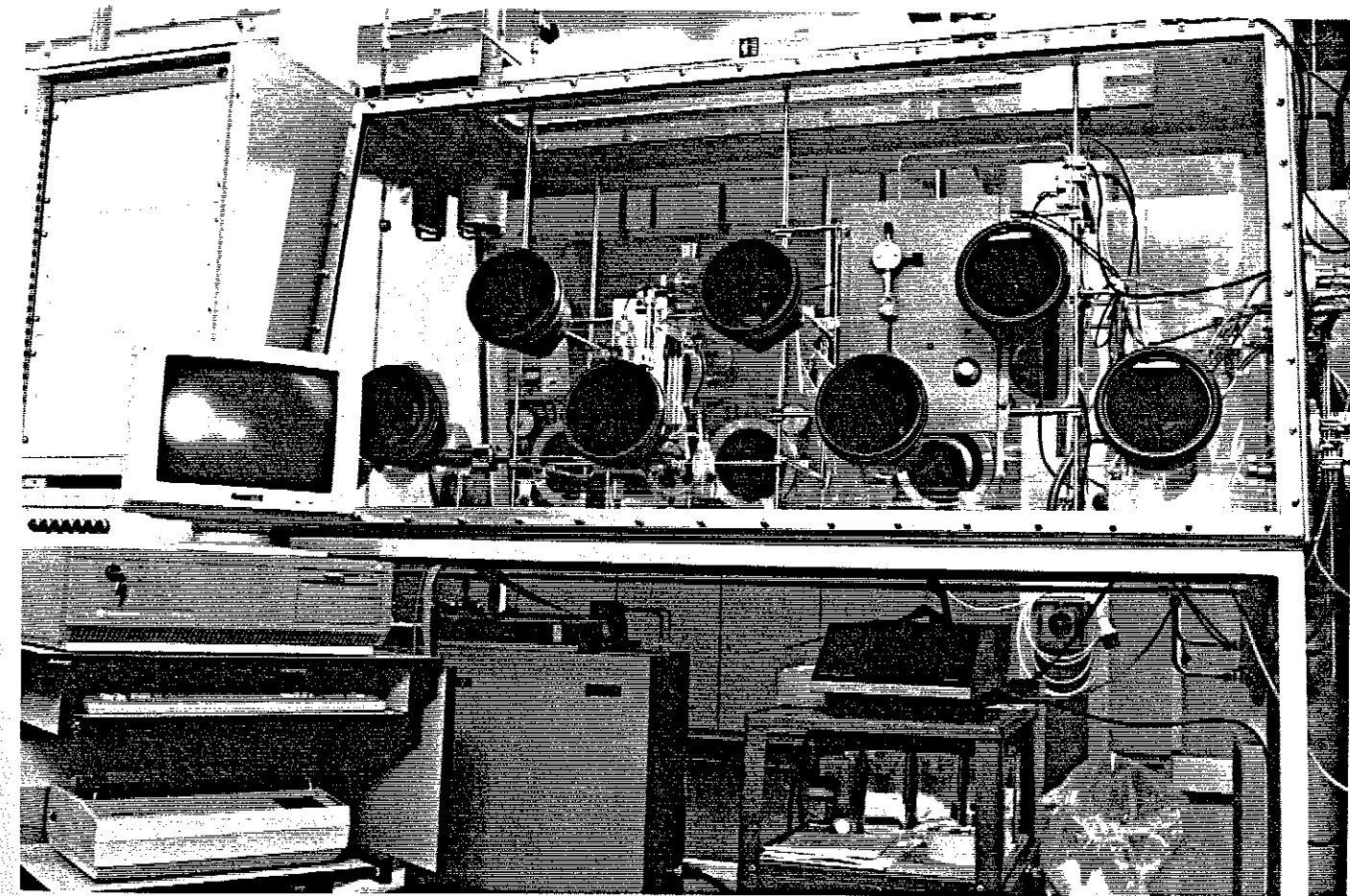
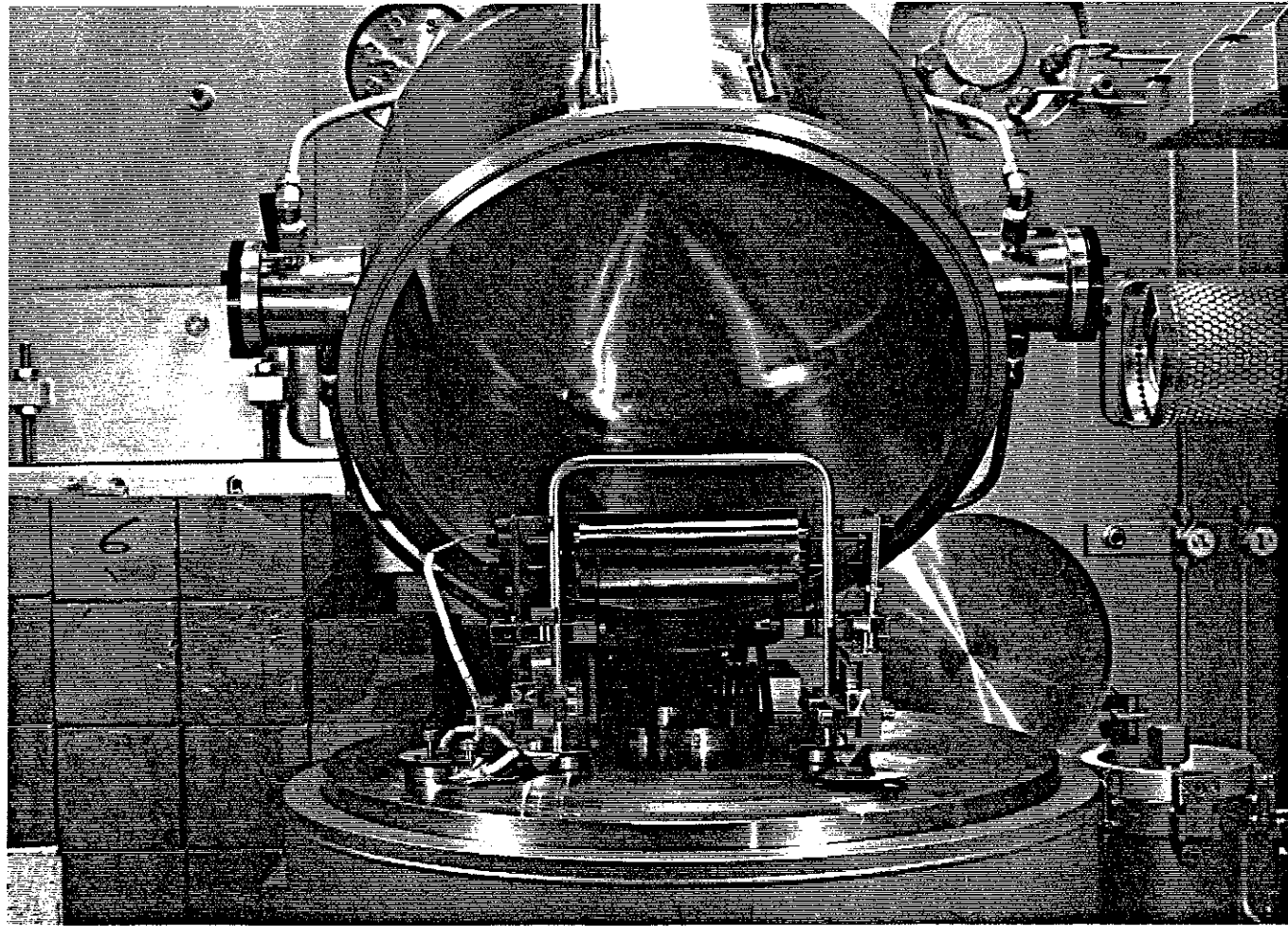


Abbildung 9

Hochtemperaturofen der Laser-Flash-Apparatur



* HTO *afzuml. metung*
* HT → HTO *afzuml. metung* } *tersamen*