

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

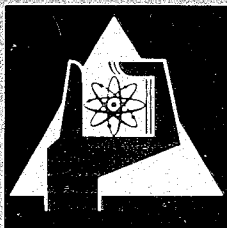
Juli 1968

KFK 789

Abteilung Reaktorbetrieb

Versuche über die Reaktion von flüssigem Wasserstoff  
mit flüssiger Luft in einem Druckrohr

E. H. Karb



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Juli 1968

KFK 789

Abteilung Reaktorbetrieb

Versuche über die Reaktion von flüssigem Wasserstoff  
mit flüssiger Luft in einem Druckrohr

von

Erich H. Karb

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe



Vorbemerkung

Alle in diesem Bericht beschriebenen Versuche wurden auf dem Gelände des Instituts für Chemie der Treibstoffe der Fraunhofer Gesellschaft e.V. in Berghausen bei Karlsruhe durchgeführt.

Für die uns in jeder Hinsicht bereitwillig gewährte Unterstützung bedanken wir uns bei dem Leiter des Instituts, Herrn Direktor Dr. Meyer, bei den Herren Dr. Diepold und Dr. Schubert sowie bei allen Beteiligten.

Die in Abschnitt 6.1 erwähnten Vorversuche im Trauzlblock wurden ganz, die Eichversuche mit Knallgas (6.2) und die Vorversuche mit flüssigem bzw. festem Sauerstoff (6.3) wurden zum Teil unter der Leitung von Herrn Dipl.-Ing. H. Lichti durchgeführt.

Von Herrn R. Altmann wurden alle in diesem Bericht beschriebenen Versuchseinrichtungen aufgebaut, zu deren Ausführung er wertvolle Anregungen beisteuerte. Bei der Versuchsdurchführung übernahm Herr Altmann wesentliche Aufgaben.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	1
1. Einleitung	2
2. Grundsätzliches	3
2.1 Gasförmige Gemische H <sub>2</sub> -Luft	3
2.2 Reaktion von Flüssig-H <sub>2</sub> mit flüssiger oder fester Luft	5
2.3 Denkbare Zündmechanismen bei der Kalten Neutronenquelle	6
3. Versuchseinrichtung und -ablauf	7
3.1 Das Reaktionsgefäß	7
3.2 Die Meß- und Registriereinrichtung	8
3.3 Räumliche Anordnung	8
3.4 Füllvorgänge und Zündung	9
4. Auswertung der Versuche	10
4.1 Allgemeines	10
4.2 Diskussion einiger typischer Meßaufzeichnungen	11
4.3 Zusammenstellung der Versuche	12
4.4 Auswertung der Druckmessungen	12
4.5 Art der Reaktion	15
4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse	15
5. Fehlerbetrachtung	16
5.1 Fehlermöglichkeiten bei der Druckmessung und -auswertung	16

	Seite
5.2 Diskussion der Versuchsanordnung	17
5.3 Zusammenfassung der Fehlerbetrachtung	18
6. Vorversuche	18
6.1 Versuche im Trauzblock	18
6.2 Eichversuche mit Knallgas	18
6.3 Versuche mit flüssigem bzw. festem Sauerstoff	20
7. Literaturangaben	22
Tabellen	26
Abbildungen	

### Zusammenfassung

Ein Druckrohr soll den Reaktor FR2 vor den Folgen einer Wasserstoff-Luft-Reaktion schützen, die beim Versagen mehrerer Sicherheitseinrichtungen der geplanten Kalten Neutronenquelle, Projekt FR2/16, denkbar ist. Zur Auslegung des Druckrohres müssen Größe und zeitlicher Verlauf der zu erwartenden Drücke bekannt sein; hierzu wurden Versuche durchgeführt, die im vorliegenden Bericht beschrieben werden.

Ergebnis: Bei der gegebenen Versuchsgeometrie und dem gewählten Zündmechanismus, der mit dem stärksten im Reaktor denkbaren Zündvorgang vergleichbar ist, läuft die zu untersuchende Reaktion mit großer Wahrscheinlichkeit als Verbrennung ab. Der Verbrennung sind möglicherweise kleinere, lokal begrenzte Teildetonationen überlagert.

Die Größe der entstehenden Drücke wird maßgeblich von den Mengen der Reaktionspartner, Flüssig-H<sub>2</sub>/Flüssig-Luft, und deren Verhältnis zueinander bestimmt. Bei dem bei der Kalten Neutronenquelle eingesetzten Flüssig-H<sub>2</sub>-Volumen von 250 cm<sup>3</sup> und einem Flüssig-Luft-Anteil von 30 - 40 % der stöchiometrischen Menge - damit muß bei einem Lufteinbruch in das evakuierte Druckrohr im Extremfall gerechnet werden - sind folgende Drücke zu erwarten:

Lokale Druckspitzen von maximal 360 - 470 at, die sich in einer Zeit von längstens 0,1 msec auf- und wieder abbauen.

Gesamtinnendrucke von maximal 240 - 310 at, die in kürzestensfalls 0,5 msec aufgebaut werden und eine oder mehrere msec anhalten. Im Vergleich zu den kurzzeitigen lokalen Druckspitzen sind sie als statisch wirkend anzusehen.



1. Einleitung

Bei der Kalten Neutronenquelle am Reaktor FR2 in Karlsruhe (Beschreibung: Haffner et al. Lit /1/ und Haffner /2/) soll in einem bis zum Reaktorcore reichenden, horizontalen Experimentierkanal eine Menge von etwa  $250 \text{ cm}^3$  Flüssig- $\text{H}_2$  als Moderatorsubstanz dienen. Der  $\text{H}_2$  wird im Reaktoreinsatz (Abb.1) in der sogenannten Moderatorkammer durch Kondensation an Hegekühlten Flächen verflüssigt.

Die Anwesenheit von Wasserstoff stellt wegen der Möglichkeit einer  $\text{H}_2$ -Luft-Reaktion, die explosionsartig ablaufen kann, eine Gefahr für die Experimentieranlage und den Reaktor dar. Mit erheblichem technischen Aufwand (Haffner et al. /1/, Spath /3/ und /4/) wird daher versucht, die Bildung eines  $\text{H}_2$ -Luft-Gemisches bzw. dessen Zündung zu vermeiden: Der gesamte Reaktoreinsatz ist evakuiert; der Vakuusraum ist gegen die Atmosphäre mit Doppeldichtungen abgeschlossen, deren Zwischenraum inertes Sperrgas unter überwachtem Überdruck enthält; alle Elektroinstallationen im Reaktoreinsatz sind explosionsicher; bei Druckanstieg im Vakuum werden alle elektrischen Geräte automatisch abgeschaltet; die aus den Vakuurräumen abgepumpten Gase werden kontinuierlich auf  $\text{H}_2$ -Gehalt untersucht; in Störfällen wird der  $\text{H}_2$  automatisch ins Freie abgeblasen.

Sollte trotz dieser Maßnahmen der äußerst unwahrscheinliche Fall eintreten, daß eine Luft-Wasserstoff-Anordnung im Einsatz entsteht und gezündet wird, so soll das im corenahen Teil als Druckrohr ausgebildete Vakuumrohr den Reaktor vor Beschädigung schützen. Zur Auslegung des Druckrohres müssen Höhe und zeitlicher Verlauf der bei einer  $\text{H}_2$ -Luft-Reaktion auftretenden Drücke bekannt sein. Im Schrifttum finden sich zwar sehr viele

Angaben über die Reaktion gasförmiger Gemische von  $H_2-O_2$  bzw.  $H_2$ -Luft, so bei Cassut /5/, Freytag /6/, Gmelin /7/, Taschenbuch Hütte /8/, Jost /9/, Lewis und Von Elbe /10/, Van Dolah et al. /36/ und anderen.

Über den Reaktionsablauf bei zunächst in flüssiger oder fester Form (Luft) in einem Rohr vorliegenden Reaktionspartnern sind jedoch bisher nur die im englischen Forschungszentrum Harwell durchgeführten Versuche (Ward et al. /12/ und /13/; Pearce et al. /14/) bekannt geworden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen in Harwell sind aufgrund unterschiedlicher Geometrie und größerer Flüssig- $H_2$ -Mengen nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse am FR2 übertragbar, daher wurden eigene Versuche durchgeführt.

Gegenstand dieses Berichtes ist es, diese Versuche und ihre Ergebnisse darzustellen. Die Diskussion der Versuchsergebnisse im Zusammenhang mit der Festigkeit des Druckrohres bleibt einem späteren Bericht vorbehalten.

## 2. Grundsätzliches

### 2.1 Reaktion gasförmiger Gemische $H_2$ -Luft

#### 2.1.1 Das Gemisch $H_2$ -Luft ist in weiten Grenzen zündfähig.

Die Zündgrenze liegt bei 4 bzw. 75 Vol-%  $H_2$  in Luft (Nach Freytag /6/, Gmelin /7/, Lewis und Von Elbe /10/, Scott et al. /15/, Schwarz /16/).

Abhängig von einer großen Zahl von Parametern kann die Reaktion als Verbrennung, Explosion oder Detonation ablaufen. Die wichtigsten Parameter sind: Zusammensetzung und Menge des Gemisches; Güte der Mischung; räumliche Anordnung mit den Extremen "freie Ausdehnungsmöglichkeit" bzw. "voller räumlicher Einschluß"; geometrische Abmessungen; Art und Stärke der Zündung. Die Detonationsgrenzen werden von Freytag /6/, Gmelin /7/, Lewis und Von Elbe /10/, Scott et al. /15/ und anderen angegeben mit 18 bzw. 59 Vol.-%  $H_2$  in Luft.

die erforderliche Zündtemperatur ist nach Gmelin /7/ außer von der Gemischzusammensetzung auch vom Druck abhängig. Die niedrigste Zündtemperatur für  $H_2/O_2$ -Gemische wird mit  $\approx 400^\circ C$  bei einem Druck von etwa 5 Torr erreicht. Die erforderliche Zündenergie beträgt u.U. nur einige Millijoule, wie Freytag /6/, Litchfield et al. /26/ und Cassut et al. /35/ angeben; zur Einleitung einer Detonation sind aber je nach Begleitumständen sehr viel größere Energiemengen erforderlich. So benötigte z.B. Cassut /25/ mindestens 2 p Sprengstoff (Pentolit), um die volle Detonation eines räumlich freien  $H_2$ -Luft-Gemisches einzuleiten.

2.1.2 Der Unterschied zwischen Verbrennung, Explosion und Detonation und die Frage, unter welchen Umständen die eine oder die andere Reaktionsform auftritt, wird im Schrifttum eingehend behandelt. Ausführliche Erklärungen geben beispielsweise Freytag /6/, Jost /9/, Lewis und von Elbe /10/, Zeldowich et al. /11/, Adkins et al. /17/. Auf die Einzelheiten dieser sehr komplexen Vorgänge kann hier nicht eingegangen werden; erwähnt sei, daß die stärksten Wirkungen bei einer Detonation auftreten. Charakteristisch für das Auftreten einer Detonation ist die Ausbreitung einer Druckwelle mit Überschallgeschwindigkeit (bezogen auf die Ausgangstemperatur), wobei der Druck vom Ausgangswert im ungestörten Gasgemisch in äußerst kurzer Zeit - in einigen Mikrosekunden - auf den Maximalwert steigt.

Die Höhe des Maximaldrucks hängt wesentlich von den in 2.1.1 erwähnten Parametern ab. So geben Freytag /6/, Jost /9/, Lewis und von Elbe /10/, Belles et al. /18/ und Pigford /19/ für das Verhältnis von Maximaldruck  $P_1$  zum Ausgangsdruck  $P_0$  im ungestörten Medium Zahlenwerte zwischen 6 und 19 an.

Bei Reflexion an einer festen Wand kann der Druck um ein Vielfaches gesteigert werden. Nach Freytag /6/ und Freiwald /21/ kann der Druck in der "reflektierten" Welle bis zum 5-fachen des Drucks in der "ankommenden" Welle betragen. Nach Schardin et al. /22/ können schwache Druckstöße auf das 2-fache, starke Druckstöße im idealen Gas auf das 8-fache, in Luft auf noch höhere Werte gesteigert werden. In Extremfällen kann daher der Maximaldruck  $P_1$  den 100-fachen Wert des Ausgangsdruckes  $P_0$  erreichen (Freytag /6/). Greenfield /20/ nahm für Berstversuche an Rohren ein Verhältnis  $P_1 : P_0 \approx 40$  an; dieser Wert ergab sich auch bei unseren Eichversuchen mit Knallgas (s. 6.2).

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Detonationsdruckwelle eines stöchiometrischen  $H_2$ -Luft-Gemisches von Raumtemperatur wird allgemein zu  $D \approx 2000$  m/sec angegeben, so etwa von Freytag /6/ oder Lewis und Von Elbe /10/.

## 2.2 Reaktion von Flüssig- $H_2$ mit flüssiger oder fester Luft

Für den hier zu untersuchenden Fall der Kalten Neutronenquelle, bei der beide Reaktionspartner im flüssigen, die Luft zunächst sogar im festen Aggregatzustand vorliegen, gibt es recht wenige Aussagen in der Literatur. Nach Weintraub /24/ kann Flüssig- $H_2$ , der kleine Mengen festen Sauerstoffs enthält, explodieren; bei fester Luft im Flüssig- $H_2$  sei noch keine Explosion bemerkt worden, jedoch nicht ausschließbar.

Die von Ward et al. /12/, /13/ und Pierce et al /14/ beschriebenen Versuche in Harwell gleichen im Ziel und im Prinzip der Ausführung unseren Untersuchungen. Sie werden in diesem Bericht mehrfach zum Vergleich herangezogen werden.

## 2.3 Denkbare Zündmechanismen bei der Kalten Neutronenquelle

2.3.1 Die im Schrifttum (z.B. bei Cassut /25/) vielfach erwähnten Zündquellen wie Sprengkapseln oder kleinere Sprengladungen scheiden hier als unreal aus. Es erscheinen nur folgende Zündmöglichkeiten bei gleichzeitigem Versagen mehrerer Sicherheitseinrichtungen denkbar:

### 2.3.2 "Explosion ausgefrorener Luft"

Es sind verschiedene Unfälle an Kryostaten in Strahlenfeldern bekannt geworden, bei denen beim Aufwärmen eine Explosion Teile der Anlage beschädigte oder zerstörte; Einzelheiten sind zu lesen bei Cottrell /27/, Coltmann et al. /28/, Lacaze /30/, Webb /31/ und Marfaing /32/. Die Ursachen sind noch nicht geklärt, es werden verschiedene Möglichkeiten genannt:

Unter Bestrahlung bei tiefen Temperaturen bilden sich in sauerstoffhaltigem Stickstoff bzw. in Luft Ozon und Stickoxyde, die zum Teil bei höheren Temperaturen instabil sind. Beim Aufwärmen können sowohl der Zerfall des Ozons zu  $O_2$  als auch seine Reaktion mit Stickstoff oder dessen Oxyden explosionsartig verlaufen. Dabei können Spuren nicht bekannter Stoffe als Katalysatoren (Metalle) oder auch als Reaktionspartner (organische Substanzen) eine Rolle spielen.

In unserem Falle ist es denkbar, daß Luft in den Vakuumraum eintritt, dort an den kalten Rohrleitungen und an der Moderator-kammer ausfriert und beim Aufwärmen zu einer solchen Reaktion führt. Dadurch könnte die dünnwandige Moderator-kammer zerstört werden und die Reaktion des ausfließenden Flüssig- $H_2$  mit der ausgefrorenen Luft eingeleitet werden.

### 2.3.3 Knallgasreaktion

Strömt durch ein Leck an der Moderator-kammer  $H_2$  in den Vakuumraum, so kann ein Knallgasgemisch entstehen, wenn

ausgefrorene Luft durch die gute Wärmeleitfähigkeit des  $H_2$  verdampft oder wenn plötzlich durch ein größeres Leck Luft eindringt. Das Knallgas könnte durch die in 2.3.2 beschriebene Reaktion oder durch Versagen eines elektrischen Gerätes gezündet werden. Zerstörung der Moderator-kammer und Reaktion der gesamten Flüssig- $H_2$ -Menge mit der restlichen Luft könnten die Folge sein.

- 2.3.4 Ein Vergleich der genannten Zündmechanismen bezüglich ihrer Wirkung, nämlich der Zerstörung der Moderatorkammer und der Auslösung einer Reaktion Flüssig- $H_2$  mit ausgefrorener Luft, ist sehr schwer.

Mit den Annahmen, daß einerseits 200 Nl Luft ausfrieren und 50 % des darin enthaltenen  $O_2$  in  $O_3$  verwandelt werden, daß andererseits das ganze Druckrohr mit Knallgas atmosphärischen Drucks gefüllt ist, wurden die beim Ozonzerfall bzw. bei der Knallgasreaktion freigesetzten Energien abgeschätzt: Sie sind von gleicher Größenordnung. Der Wert dieser vergleichenden Aussage ist allerdings beschränkt, da zwischen Reaktionsenergie und Zerstörungs- oder Zündwirkung nur ein sehr bedingter Zusammenhang besteht.

Über die anderen, unter 2.3.2 genannten Reaktionen ist zu wenig bekannt, um eine Energieabschätzung durchzuführen; nach den im Schrifttum beschriebenen Beschädigungen sind die Zerstörungswirkungen jedoch denen beim Ozonzerfall vergleichbar.

- 2.3.5 Über die Wahrscheinlichkeit der oben beschriebenen Zündmechanismen soll hier nicht diskutiert werden; es müssen in jedem Fall mehrere Sicherheitseinrichtungen versagen, damit die entsprechenden Vorgänge ablaufen können. Da sie immerhin denkbar sind, wurde als Initialzündung für die durchzuführenden Versuche eine Knallgasreaktion gewählt.

### 3. Versuchseinrichtung und -ablauf

#### 3.1 Das Reaktionsgefäß

Abb.2 zeigt den schematischen Aufbau des Reaktionsgefäßes nach Abschluß aller Füllvorgänge, vor Einleitung der Zündung: Ein mit einer Berstmembran (2) verschlossenes Rohr, das Zündrohr (1) enthält stöchiometrisches  $H_2/O_2$ -Gasgemisch (Knallgas), das mittels einer Glühkerze (7) gezündet wird. Das Zündrohr ist über ein angeflanshtes

Zwischenstück (1a) durch einen Schnellverschluß (4) mit dem eigentlichen Druckrohr (3) verbunden. Im Druckrohr stehen auf einer dreibeinigen Stütze (6) zwei Glasdewargefäße (5), jeweils gefüllt mit einer der Flüssiggaskomponenten. Im Druckrohr und im Zündrohr ist zur Druckmessung je ein piezoelektrischer Miniaturdruckgeber, (8) und (9), Fabrikat Vibrometer, Typ KIC 6-01 angebracht.

### 3.2 Die Meß- und Registriereinrichtung

Die Signale der Miniaturdruckgeber werden über je einen ladungsempfindlichen Elektrometerverstärker auf einen zweistrahligem Kathodenstrahloszillographen gegeben, das Signal von Geber 1 (im Druckrohr) außerdem noch auf einen zweiten Oszillographen (Schaltschema siehe Abb.3). Die Schaltung ist so gewählt, daß alle drei Strahlen gleichzeitig ausgelöst werden, wenn das Signal von Geber 2 (Knallgaszündung im Druckrohr!) einen bestimmten, vorgeählten Wert überschreitet. Die gemeinsame Auslösung erlaubt es, die drei Anzeigen zeitlich aufeinander zu beziehen. Durch die doppelte Aufzeichnung der Signale von Geber 1 können zwei verschiedene Ordinaten- (Druck-) und Abszissen- (Zeit-) Maßstäbe eingestellt werden. Es erfolgt jeweils nur ein Strahldurchlauf, der mit Polaroidkamas aufgenommen wird.

Die gesamte Meßanordnung wurde wiederholt statisch geeicht durch Belastung der Geber mittels Eichkolbenpresse.

### 3.3 Räumliche Anordnung

Das Reaktionsgefäß ist in einer einseitig offenen Betonbox auf einem stabilen Fundament montiert (Abb.4). Eine splittersichere Bohlenwand an der offenen Boxseite dient zum Schutz der Personen und der Flüssiggas-Vorratsdewars beim Einfüllvorgang. Vorratsdewars und vakuumisolierte Heberleitungen sind auf einem Wagen befestigt,

der nach dem Füllen der Glasdewargefäße im Druckrohr mit Flüssig-H<sub>2</sub> bzw. Flüssig-Luft in die Nachbarbox gefahren wird. Meß- und Zündleitungen führen durch einen Kabelkanal zum Meßraum, in dem die ganze Registriereinrichtung untergebracht ist.

### 3.4 Füllvorgänge und Zündung

Zunächst wird das mit einer Berstmembran, einer Aluminiumfolie von 0,1 mm Dicke, verschlossene Zündrohr aus Druckgasflaschen mit den gewünschten Gaskomponenten gefüllt, deren Mengen über den Partialdruck bestimmt werden. Im allgemeinen (Tabelle 2) wurde mit einer Füllung von 1 ata H<sub>2</sub> + 0,5 ata O<sub>2</sub> gearbeitet.

Die Flüssiggase werden aus den Vorratsdewars mittels Druckgas durch vakuumisolierte Leitungen in die Glasdewargefäße im Druckrohr übergehebert, wobei die Füllmengen einen Zuschlag für Abdampfung bis zum Zündzeitpunkt enthalten. Nach dem Füllvorgang wird der Wagen mit den Vorratsdewars und den Heberleitungen in die Nachbarbox gefahren, anschließend wird das Zündrohr auf das Druckrohr aufgesetzt und mit diesem über den fernbedienbaren Schnellverschluß druckfest verbunden.

Zur Vermeidung eines vorzeitigen Druckaufbaus im Druckrohr durch die Abdampfung der Flüssiggase ist im Zwischenstück (1a, Abb.2) eine Entlastungsbohrung angebracht.

Nach Öffnen der Kameraverschlüsse wird der Zündstromkreis geschlossen; nach 12 bis 15 sec hat die Glühkerze (Nr.7, Abb.2) die erforderliche Temperatur erreicht, das Knallgasgemisch im Zündrohr reagiert, durchschlägt die Berstmembran, zerstört die Glasdewargefäße und leitet die zu untersuchende Reaktion der Flüssiggase ein.



#### 4. Auswertung der Versuche

##### 4.1 Allgemeines

Der gemessene Druckverlauf glich bei der Mehrzahl der durchgeführten Versuche etwa dem der in den Abbildungen 5 und 6 eingezeichneten Beispiele. Anhand von Abb.5 wird nachstehend der typische Druckverlauf diskutiert und die in den folgenden Abschnitten benutzte Bezeichnungsweise erläutert.

Die Abb. zeigt im unteren Teil den Druckverlauf am Meßort 2, also die Aufzeichnungen der Signale des im Zündrohr angebrachten Druckgebers. Abb.5 oben stellt die Signale des im Druckrohr (Meßort 1) montierten Gebers dar, wobei bereits die Aufzeichnungen von zwei Oszillographen mit verschiedenen Druck- und Zeitmaßstäben zusammengefaßt sind.

Druckverlauf: Zuerst im Zündrohr (Meßort 2), nach 0,9 msec auch im Druckrohr (Meßort 1), wird die Knallgasreaktion registriert. Bei  $t = 1,8 \text{ msec}$  beginnt an beiden Druckgebern ein allgemeiner Anstieg des Drucks bis zu einem Höchstwert  $P_2$  bei  $t = 19 \text{ msec}$ . Aus dem Vergleich mit Eichversuchen, bei denen keine Flüssiggase im Druckrohr waren (s. 6.2), geht hervor, daß dieser Druckanstieg auf die Reaktion der Flüssiggase zurückzuführen ist. Dem Druckanstieg sind anfänglich starke Schwingungen überlagert mit zum Teil ausgeprägten kurzzeitigen Druckspitzen, die vorwiegend von Geber 1 aufgenommen wurden. Die höchste dieser Spitzen stellt zugleich den höchsten überhaupt registrierten Druck  $P_1$  dar. Im Vergleich zu der kurzen Wirkungsdauer der Druckspitzen erfolgt der Aufbau von  $P_2$  recht langsam; es wurde daher bei der Auswertung unterschieden zwischen dem höchsten überhaupt gemessenen Druck, Höchst- $P_1$  und dem höchsten "quasistatischen" Druck  $P_2$ .

#### 4.2 Diskussion einiger typischer Meßaufzeichnungen

In den Abbildungen 5 bis 10 sind die Druck-Zeit-Diagramme einiger Versuche dargestellt; nachstehend wird auf die einzelnen Aufzeichnungen näher eingegangen:

Abb.5 wurde bereits im letzten Abschnitt besprochen. Einen ähnlichen Druckverlauf zeigt Abb.6; hier ist der Druckanstieg im Zündrohr (Meßort 2) gleichmäßiger und das Verhältnis vom höchsten gemessenen, also vom Höchstdruck  $P_1$  zum höchsten "quasistatischen" Druck  $P_2$  größer.

Bei dem in Abb.7 aufgezeichneten Druckverlauf erfolgt der Anstieg des "quasistatischen" Drucks auf den größten Wert  $P_2$  in relativ kurzer Zeit. Außer bei der Knallgasreaktion wurden am Meßort 2 gar keine und am Meßort 1 nur wenig ausgeprägte Druckspitzen registriert. Der Höchstdruck  $P_1$  übersteigt den höchsten "quasistatischen" Druck  $P_2$  kaum. Auf die Schwingungen, die hier besonders am Meßort 2 dem allgemeinen Druckverlauf überlagert sind, wird in Abschnitt 5. noch näher eingegangen.

Einen völlig anderen Druckverlauf als die bisher beschriebenen zeigt Abb.8: Im Druckrohr (Meßort 1) werden so gut wie keine Schwingungen und Druckspitzen, auch nicht die der einleitenden Knallgasreaktion, registriert. Eine naheliegende Erklärung hierfür ist die, daß der im Boden des Druckrohrs montierte Geber durch Bruchstücke der zerstörten Glasdewargefäße oder gar durch ein Polster aus Flüssig-Gasen verdämmt wurde (s. 6.2). Der höchste "quasistatische" Druck  $P_2$  ist bei diesem Beispiel zugleich auch der höchste gemessene Druck, Höchstdruck  $P_1$ .

In Abb.9 sind die Ergebnisse von zwei Versuchen eingetragen: Beide zeigen einen ziemlich raschen Anstieg des "quasistatischen" Drucks auf den Größtwert  $P_2$ , Anstiegsrate 480 bzw. 330 at/msec. Bei dem im oberen Bildteil dargestellten Versuch Nr. L 14 ist das Versuchs-Druckrohr

an den Endstellen gerissen, dadurch fiel der "quasistatische" Druck sofort wieder auf den Wert Null ab. Daß dem allgemeinen Druckverlauf im Vergleich zu den vorher beschriebenen Versuchen scheinbar nur sehr kleine Schwingungen überlagert sind, liegt an dem hier gedrängteren Druck- (Ordinaten-) Maßstab.

Abb.10 zeigt die Originalfotografien der Oszillogramme eines Versuchs: Im oberen Teilbild sind die Signale von Druckgeber 1 im Druckrohr (Null-Linie oben, Druck positiv nach unten) und von Druckgeber 2 im Zündrohr dargestellt. Das untere Teilbild zeigt die Signale von Geber 1 in einem gedrängteren Zeitmaßstab, aufgenommen mit einem zweiten Oszillografen (s. 3.2 und Abb.3). Die helle, senkrechte Linie links im Bild markiert den zeitlichen Anfang der Aufzeichnung.

#### 4.3 Zusammenstellung der Versuche

Einschließlich der in Abschnitt 6. beschriebenen Vorversuche wurden in einem Zeitraum von 17 Monaten 206 Einzelversuche durchgeführt. Davon entfällt etwa ein Viertel auf die in Tabelle 1 zusammengestellte Versuchsreihe "Reaktion von Flüssig-H<sub>2</sub> mit Flüssig-Luft". Mit kleinen Mengen Flüssig-H<sub>2</sub> beginnend wurden bis zu 250 cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> (Auslegungsmenge der Kalten Neutronenquelle) eingesetzt, wobei die Flüssig-Luft-Anteile zwischen 10 und 100 % der stöchiometrischen Menge variierten. Aus Sicherheitsgründen wurde bei Flüssig-H<sub>2</sub>-Volumina über 150 cm<sup>3</sup> nur mit unterstöchiometrischen Anordnungen gearbeitet.

#### 4.4 Auswertung der Druckmessungen

- 4.4.1 Die Meßergebnisse streuen außerordentlich stark (s.Tabelle 1). Da die Untersuchung die Grundlagen für eine Sicherheitsbetrachtung liefern soll, werden keine Mittelwerte gebildet, sondern nur die einzelnen Größtwerte zur Auswertung herangezogen.

#### 4.4.2 Es wird zunächst der "q u a s i s t a t i s c h e "

D r u c k  $P_2$  betrachtet. Seine Größe kann mit einigen Vereinfachungen (vollkommene Reaktion  $H_2-O_2$ , keine Energieabgabe an die Rohrwand, keine Dissoziation der Reaktionsprodukte) rechnerisch abgeschätzt werden. In die Berechnung gehen die reagierende Flüssig- $H_2$ -Menge etwa linear und das Gefäßvolumen  $V_G$  exakt linear ( $P_2 \sim 1/V_G$ ) ein.

In Anlehnung an die Darstellungsweise von Pearce et al./14/ wurden daher die gemessenen  $P_2$ -Werte auf den Quotienten  $V_H : V_G$  bezogen ( $V_H$  = Volumen der eingesetzten Flüssig- $H_2$ -Menge) und als spezifischer "quasistatischer" Druck in Abb.11 über dem Luftanteil aufgetragen.

Die Mehrzahl aller Meßpunkte liegt im Bereich bis etwa 4 at pro  $cm^3$  Fl.- $H_2$  je Liter Gefäßvolumen, nur einige Größtwerte ragen heraus. Unter Verwendung dieser Größtwerte wurde eine Einhüllende (Kurve a) aller Meßpunkte gezeichnet. Zum Vergleich wurden die entsprechende Einhüllende (Kurve b) der Harwell-Versuche und die berechneten Werte (Kurve c) eingetragen.

Beide Hüllkurven weichen mit zunehmendem Luftanteil stärker von den berechneten Werten ab, wobei die Harwell-Kurve mit der theoretischen (c) besser übereinstimmt und um den Faktor 1,5 über der Einhüllenden unserer Versuchsergebnisse liegt.

Die Abweichung beider Hüllkurven vom theoretischen Wert bei höherem Luftanteil läßt sich damit erklären, daß hier die Reaktion weniger vollständig abläuft, als bei den Versuchen mit geringerem Luftanteil, bei denen ein beträchtlicher Wasserstoff-Überschuß herrscht. Die um den Faktor 1,5 höher liegende Harwell-Kurve und deren bessere Übereinstimmung mit den berechneten Werten deuten darauf hin, daß die Reaktion bei den Versuchen von Pearce et al. vollständiger als bei unseren Versuchen abgelaufen ist.

Durch die Zündung einer Sprengkapsel in unmittelbarer Nähe der konzentrisch angeordneten Reaktionspartner in Harwell wird wahrscheinlich eine bessere Durchmischung erreicht und mehr Zündenergie eingebracht als bei unserer Anordnung mit axial versetzten Reaktionspartnern und Knallgaszündung. Auch die unterschiedlichen Gesamtvolumen der Reaktionsgefäße (Harwell 105 l, Karlsruhe 6 l) dürften von Einfluß sein; Versuche in Harwell mit verschiedenen Gefäßgrößen ergaben nämlich bei sonst gleichen Parametern eine geringere Druckausbeute bei kleinerem Gefäßvolumen.

4.4.3 Der gemessene H ö c h s t d r u c k  $P_1$  wurde zunächst über der Flüssig- $H_2$ -Menge aufgetragen (Abb.12). Auch hier ragen nur einzelne Größtwerte über das allgemeine Niveau (ca. 150 at) hinaus. Unter Verwendung dieser Größtwerte wurden Linien konstanten Luftanteils eingezeichnet, die jeweils alle zugehörigen Meßpunkte einhüllen. Wegen der geringen Anzahl der erwähnten Größtwerte ist der Verlauf dieser Linien einigermaßen willkürlich, er wurde so gewählt, daß sich bei Extrapolation auf  $250 \text{ cm}^3$  Flüssig- $H_2$  relativ hohe Druckwerte ergaben. Mit diesen Extrapolationswerten wurden in Abb.13 nochmals die Höchstdrücke  $P_1$  aufgetragen, diesmal über dem Luftanteil; Parameter für die eingezeichneten Hüllkurven ist die Flüssig- $H_2$ -Menge  $V_H$ .

Wie bei der Darstellung des "quasistatischen" Drucks  $P_2$  wurde auch der Höchstdruck  $P_1$  auf den Quotienten  $V_H:V_G$  normiert und mit den Ergebnissen von Harwell verglichen (Abb.14). Die Vergleichskurve von Harwell liegt hier noch mehr als beim spezifischen "quasistatischen" Druck (Faktor 1,5) nämlich um den Faktor 2,5 höher. Die in 4.4.2 angeführten Gründe für diesen Unterschied treffen bestimmt auch hier zu. Darüberhinaus ist aber nach unserer Meinung nicht sicher, daß auch der Höchstdruck  $P_1$  l i n e a r vom Gefäßvolumen abhängt, wie dies

beim "quasistatischen" Druck  $P_2$  aufgrund der rechnerischen Abschätzung angenommen werden konnte. Bei der gewählten Darstellungsweise ( $P_1 \sim 1:V_G$ ) wird daher der Einfluß des Gefäßvolumens möglicherweise überschätzt.

#### 4.5 Art der Reaktion

Der relativ langsame Anstieg des "quasistatischen" Drucks auf den Höchstwert  $P_2$  (Anstiegsdauer minimal 500  $\mu\text{sec}$ , meistens mehrere msec) deutet darauf hin, daß die untersuchte Reaktion als Verbrennung abläuft.

Bei den mehrfach erwähnten Druckspitzen wird der Höchst- druck in wenigen  $\mu\text{sec}$  erreicht, wie es (nach Freytag /6/) bei einer Detonation der Fall ist. Diese Druckspitzen scheinen demnach Teildetonationen der Flüssiggase zu beschreiben, soweit sie auf deren Reaktion und nicht auf die Knallgasreaktion im Zündrohr zurückzuführen sind. Diese Frage wird in 6.2 diskutiert.

#### 4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die zu untersuchende Reaktion erfolgt unter den gegebenen Bedingungen (Geometrie, Zündmechanismus, Flüssig- $\text{H}_2$ -Menge) mit großer Wahrscheinlichkeit als Verbrennung, der lokal begrenzte Teildetonationen überlagert sind. Im Vergleich zu den kurzzeitigen Druckspitzen der Teildetonationen (Dauer maximal 0,1 msec) sind die Verbrennungshöchstdrücke (Dauer 1 bis mehrere msec) als statisch wirkend anzusehen.

Bei konstanter Flüssig- $\text{H}_2$ -Menge hängt die Höhe der Drücke vor allem vom  $\text{H}_2$ -Luft-Verhältnis ab. In Abb.15 sind die beim Einsatz von 250  $\text{cm}^3$  Flüssig- $\text{H}_2$  zu erwartenden Drücke über dem Luftanteil aufgetragen. Dabei wurde unterschieden zwischen dem Höchstdruck  $P_1$  (Teildetonationen) und dem "quasistatischen" Druck  $P_2$ . Nach dem eingezeichneten Beispiel ist bei einem Luftanteil von 30 %

der stöchiometrischen Menge mit einem Höchstdruck von etwa 360 at und einem "quasistatischen" Druck von rund 240 at zu rechnen.

## 5. Fehlerbetrachtung

### 5.1 Fehlermöglichkeiten bei der Druckmessung und -auswertung

5.1.1 Die Druckgeber folgen plötzlichen Druckänderungen zwar nicht trägheitslos, ihre Eigenschwingungszeit, vom Hersteller mit 6,6 bis 8  $\mu\text{sec}$  angegeben, ist jedoch um den Faktor 2,5 bis 6 kleiner als die der schnellsten gemessenen Schwingungen. Es ist daher auszuschließen, daß die Geber den wirklichen Druckverlauf merklich verzögert, gedämpft oder durch Überschwingungen überhöht weitergegeben hätten.

5.1.2 Die in den Druck-Zeitdiagrammen registrierten hochfrequenten Schwingungen (s. Abb.5 - 10) stellen nicht mit Sicherheit den Druckverlauf im Reaktionsgefäß dar. Durch die Reaktionen des Zünd-Knallgases und der Flüssiggase wird das Druckgefäß mit den daran befestigten Druckgebern zu mechanischen Schwingungen angeregt, die von den Gebern als scheinbare Druckimpulse weitergegeben werden können. So berechnet man beispielsweise die Eigenschwingungsdauer des Zündrohrs nach Gracie /33/ zu  $T \sim 40 \mu\text{sec}$  (Radialschwingung); die nach Zündung des Knallgasgemisches im Zündrohr von Geber 2 registrierten Schwingungen haben Schwingzeiten von kleinstenfalls 20 - 40  $\mu\text{sec}$ , können demnach durchaus von Bewegungen der Gefäßwand herrühren. Die gemessenen Druckspitzen entsprechen nach den Überlegungen in 6.2 dem wirklichen Druckverlauf.

5.1.3 Die Ablesegenauigkeit der Druckwerte liegt je nach gewähltem Maßstab zwischen  $\pm 5$  at, die der Zeitwerte in der Größenordnung von 10  $\mu\text{sec}$ . Der Proportionalbereich der Druckgeber wurde bei keiner Messung über-

schritten. Die Übertragungsgenauigkeit des elektrischen Verstärkungssystems ist nach den Ergebnissen der statischen Eichungen besser als  $\pm 5\%$ .

## 5.2 Diskussion der Versuchsanordnung

Im Vergleich mit den Verhältnissen im Druckrohr der Kalten Neutronenquelle weist die Versuchsanordnung einige Unterschiede auf, deren Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse im folgenden abgeschätzt werden:

- 5.2.1 Im Versuchsrohr befindet sich Luft atmosphärischen Druckes, im Druckrohr des Reaktoreinsatzes wird Vakuum herrschen:

Die Luftmenge im Rohr ist im Verhältnis zu der Menge Flüssig - Luft, die zu einer  $H_2$ -Luft-Reaktion notwendig ist, vernachlässigbar klein, ebenso der Druck von etwa 1 Atm im Vergleich zu den Reaktionsdrücken. Ein Einfluß auf die Meßergebnisse ist daher nicht wahrscheinlich.

- 5.2.2 Das Volumen des Versuchsrohrs ist etwas kleiner als das des Druckrohrs:

Nach den Überlegungen in 4.4 führt der genannte Unterschied höchstens zu einer gewissen Überschätzung der im Falle einer Reaktion zu erwartenden Drücke.

- 5.2.3 Im Reaktoreinsatz wird die bei einem Leck eingedrungene Luft ausgefroren, d.h. im festen Zustand vorliegen, während unsere Versuche mit flüssiger Luft durchgeführt wurden:

Es ist anzunehmen, daß flüssige Luft schneller verdampft und reaktionsfreudiger ist als feste Luft, die Versuchsanordnung also zu höheren Drücken führt, als sie im Reaktoreinsatz zu erwarten wären.



### 5.3 Zusammenfassung der Fehlerbetrachtung

Die Genauigkeit der Druckmessung und -auswertung ist für den Zweck der Versuche (Ermittlung von Auslegungsdaten für ein Druckrohr) genügend groß. Die prinzipiellen Unterschiede zwischen der Versuchsanordnung und den wirklichen Verhältnissen im Druckrohr führen höchstens zu einer Überschätzung der Drücke, also zu Fehlern nach der sicheren Seite hin.

## 6. Vorversuche

### 6.1 Versuche im Trauzlblock\*)

Um mit der Handhabung der Flüssiggase bei den notwendigerweise extrem niedrigen Temperaturen vertraut zu werden und um eine grobe Abschätzung der Auswirkungen der zu untersuchenden Reaktion zu erhalten, wurden zunächst einige Versuche im Bleiblock nach Trauzl durchgeführt. Der Einfachheit halber wurden hier Sprengkapseln, z.Teil mit Tetryl- oder TNT-Preßlingen verstärkt, als Zünder verwendet.

Es wurde festgestellt, daß zur Zündung von  $30 \text{ cm}^3$  Flüssig- $\text{H}_2$  mit  $15 \text{ cm}^3 \text{ O}_2$  (teils flüssig, teils fest) eine Zündenergie entsprechend 8p TNT oder mehr erforderlich war. Die Wirkung der genannten  $\text{H}_2$ - $\text{O}_2$ -Mengen entsprach etwa der von 6 bis 8p TNT.

Die Einzelheiten der Trauzlblock-Versuche wurden in einem KFK-internen Bericht /34/ ausführlich dargestellt, es wird daher an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

### 6.2 Eichversuche mit Knallgas\*\*)

Um den Einfluß der als Initialzündung benutzten Knallgasreaktion erkennen und bei der Auswertung eliminieren zu können, wurde eine Reihe von Versuchen ohne Einsatz von Flüssig- $\text{H}_2$  durchgeführt (Tabelle 2.)

---

\*) Die Versuche wurden durchgeführt unter der Leitung von Herrn H.Lichti.

\*\*\*) Die Versuche wurden teilweise unter der Leitung von Herrn H.Lichti durchgeführt.

Typische Druck-Zeit-Diagramme zeigt Abb.16. Die bei den Flüssig-H<sub>2</sub>-Versuchen (s. 4.) aufgetretenen Schwingungen und Druckspitzen wurden auch hier registriert. Der Höchstdruck P<sub>1</sub> (größte Druckspitze), gemessen im Zündrohr durch Geber 2, betrug im Mittel etwa 60 at bei einer Streubreite von ± 50 %. Der mittlere Druck, etwa vergleichbar mit dem "quasistatischen" Druck bei den Flüssig-H<sub>2</sub>-Versuchen, lag zwischen 0 und 15 at.

Wurden in das Druckrohr Glasdewars mit H<sub>2</sub>O- oder Flüssigluft-Füllung eingebracht, um die Versuchsanordnung der Flüssig-H<sub>2</sub>-Versuche (Abb.2) zu simulieren, dann registrierte Geber 1 im Druckrohr stark verkleinerte Druckspitzen (s. Abb.16 unteres Teilbild und Abb.17). Die Dämmwirkung der gefüllten Dewargefäße betrug bis zu 75 %.

Vergleicht man die Knallgasversuche mit den Flüssig-H<sub>2</sub>-Versuchen, dann sind folgende Beobachtungen interessant: Form, Dauer und Frequenz der Druckspitzen sind in beiden Fällen sehr ähnlich, ebenso die von Geber 2 im Zündrohr registrierte Höhe der Spitzen. Die Druckspitzenhöhe an Geber 1 im Druckrohr war bei den Knallgasversuchen normalerweise etwa 10 %, bei Verdämmung durch gefüllte Dewars bis zu 85 % kleiner als an Geber 2 im Zündrohr. Bei den Flüssig-H<sub>2</sub>-Versuchen dagegen wurden an Geber 1 oft höhere Spitzen (s. z. B. Abb.6) gemessen, trotz der Dämmwirkung der bei diesen Versuchen immer vorhandenen Dewargefäße.

Aus diesem Vergleich kann man folgenden Schluß ziehen: Die bei den Flüssig-H<sub>2</sub>-Versuchen registrierten Druckspitzen stellen Schockwellen der Knallgas-Initialzündung im Zündrohr dar. Diese Schockwellen überlagern sich dem allgemeinen Druckanstieg im Reaktionsgefäß, der durch Verdampfung und Verbrennung der Flüssiggase bewirkt wird. Vereinzelt treffen sie auf lokal begrenzte Bereiche, in denen die verdampften Flüssiggase günstig gemischt sind; dort werden sie verstärkt oder lösen kleinere Teildetonationen aus.

### 6.3 Versuche mit flüssigem bzw. festem Sauerstoff \*)

6.3.1 Die Versuchserie mit  $O_2$  (Tabelle 3) wurde durchgeführt, um zu ermitteln, ob und wie stark sich die räumliche Anordnung der Reaktionspartner zueinander auf die Höhe der entstehenden Drücke auswirkt. Abweichend von der Beschreibung in Abschnitt 3.1 und von Abb.2 wurden diese Versuche mit einem verkleinerten Druckrohr durchgeführt: Gesamtvolumen des Reaktionsgefäßes  $V_G = 3,05$  l gegenüber 6,19 l bei Normalausführung.

Es wurden folgende Varianten untersucht (Abb.18):

6.3.2  $H_2$  und  $O_2$  in einem Glasdewargefäß "gemischt": Eine echte Mischung fand hier nicht statt, da sich der  $O_2$  infolge seiner größeren Dichte am Gefäßboden absetzte, wobei er teilweise gefror.

6.3.3  $H_2$  und  $O_2$  getrennt:  $O_2$  in einem Reagenzglas, das in ein mit Flüssig- $H_2$  gefülltes Dewargefäß eintaucht. Auch hier wurde bis zum Zeitpunkt der Zündung ein Teil des  $O_2$  fest.

6.3.4 Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengestellt; die gemessenen Höchstdrücke  $P_1$  wurden in Abb.19 über dem  $H_2$ -Volumen aufgetragen. Es ist zu erkennen, daß die Höchstdrücke bei "gemischten" Reaktionspartnern im Durchschnitt höher liegen als bei getrennter Anordnung der Komponenten. Die Gesamtstreuung der Ergebnisse ist jedoch größer als der erkennbare Unterschied der beiden Varianten.

Zum Vergleich ist die Einhüllende der gemessenen Höchstdrücke  $P_1$  bei den Versuchen mit Flüssig-Luft eingetragen (normales Druckrohr, 100 % stöchiometrisches Verhältnis  $H_2$ -Luft).

Die höchsten "quasistatischen" Drücke  $P_2$  (Tabelle 3) lassen keinen Unterschied zwischen den beiden Versuchs-

---

\*) Die Versuche wurden teilweise unter der Leitung von Herrn E.Lichti durchgeführt.

varianten erkennen.

Wichtigstes Ergebnis der  $H_2-O_2$ -Reihe: Ein gewisser Einfluß der räumlichen Anordnung der Reaktionspartner auf den entstehenden Höchstdruck ist wahrscheinlich, eine quantitative Aussage ist nicht möglich.

7. Literaturangaben

- /1/ Haffner H., Kapulla H., Oehme H., Spath F.  
Die Kalte Neutronenquelle für den Reaktor FR2  
RB-Bericht 1/65, Januar 1965
- /2/ Haffner H.  
Die Moderatorkammer für die Kalte Neutronenquelle  
im R3-Kanal des FR2. Projekt FR2/16. RB-Bericht  
4/66, Mai 1966 (nicht veröffentlicht)
- /3/ Spath F.  
Projekt FR2/16; Sicherheitsmaßnahmen; Notiz über eine  
Besprechung am 20.10.65 (nicht veröffentlicht)
- /4/ Spath F.  
Projekt FR2/16; Versuche mit Flüssig-He zur Luft-  
detektion im Strahlrohrpfropfen.  
Versuchsbericht vom 3.8.66 (nicht veröffentlicht)
- /5/ Cassut, Maddocks, Sawyer  
A Study of the Hazards in Storage and Handling of  
Liquid Hydrogen.  
A.D. Little Inc., Cambridge, Mass.
- /6/ Freytag H.H.  
Handbuch der Raumexplosionen  
1965, Verlag Chemie GmbH.
- /7/ Gmelin  
Handbuch der anorganischen Chemie  
System Nr. 3, 0 (Sauerstoff)
- /8/ Hütte, Taschenbuch, Band I, Abschn.7  
28.Aufl. 1955
- /9/ Jost W.  
Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen  
Berlin 1939
- /10/ Lewis B., Von Elbe G.  
Combustions, Flames and Explosions of Gases  
2nd edition, New York 1961

- /11/ Zeldowich, Kompaneets  
Theory of Detonation
- /12/ Ward D.L., Pearce D.G., Merret P.J.  
Liquid Hydrogen Explosions in Containment Vessels  
AERE-R 4312 (Interim Report)  
1963, Harwell
- /13/ Ward D.L., Hayes P.  
Liquid Hydrogen Explosions in Containment Vessels  
AERE-R 4554 (2nd Interim Report)  
1964, Harwell
- /14/ Pearce D.G., Ward D.L., Hayes P.  
Liquid Hydrogen Explosions in Containment Vessels  
AERE-R 4584, 1966, Harwell
- /15/ Scott, Denton, Nichols  
Technology and Uses of Liquid Hydrogen  
1964, Pergamon Press
- /16/ Schwarz Dr. Ernst  
Handbuch der Feuer- und Explosionsgefahr  
6.Auflage 1964
- /17/ Adkins A.W. et. al.  
Storage, Servicing, Transfer and Handling of  
Hydrogen  
Report AFFTC-TR-61-18, May 1961
- /18/ Belles F.E., Ehlers I.G.  
Shock Wave Ignition of Hydrogen-Oxygen-  
Diluent Mixtures Near Detonation Limits  
NASA Lewis Research Center, Cleveland, Ohio
- /19/ Pigford T.H.  
Explosion- and Detonation Properties of Mixtures of  
Hydrogen, Oxygen and Water Vapour.  
ORNL 1322, Washington 1952

- /20/ Greenfield M.A.  
Kinetic Experiments on Water Boilers - A, Core  
Report Part IV: Containment Aspects of  $H_2-O_2$ -Explosions.  
USAEC-Report NAA-SR-S418  
North American Aviation Inc., Dec. 1960
- /21/ Freiwald, Koch  
Bereiche der räumlichen Detonation von  $C_2H_2-O_2-N_2$ -  
Gemischen in Abhängigkeit von Art und Stärke der  
Zündung  
Deutsch-Französ.Forschungsinstitut, Saint-Louis
- /22/ Schardin, Molitz, Schöner  
Wirkungen von Spreng- und Atombomben auf Bauwerke.  
Zeitschr. "Ziviler Luftschutz", Heft 12, 1954
- /23/ A.D.Little Inc.  
Progress Report No16, Informal Report to ARDC,  
Feb.1959
- /24/ Weintraub A.A.  
Control of Liquid Hydrogen Hazards of Experimental  
Facilities  
HASL-160
- /25/ Cassut L.H.  
Experimental Investigation of Detonation in Unconfined  
Gaseous Hydrogen-Oxygen-Nitrogen Mixtures  
A.D.Little Inc.; Cambridge, Mass.
- /26/ Litchfield E.L., Hay M.H., Forshey D.R.  
Direct Electrical Initiation of Freely Expanding  
Gaseous Detonation Waves
- /27/ Cottrell W.B.  
Ozone Explosion in Irradiated Cryogenic Apparatus  
and Implication upon N.S. Savannah Gaseous  
Waste Disposal System.  
ORNL 58-7-97, July 1958

- /28/ Coltmann R.R., Blewitt T.H., Noggle T.S.  
Technology and Equipment Utilized in Low Temperature  
Reactor Irradiation  
Rev. of Sc. Instr. 28/Nr.5, 1957
- /29/ Lichti  
Unfälle mit Stickstoff-Kryostaten unter Bestrahlung  
Notiz vom 4.12.1963 (nicht veröffentlicht)
- /30/ Lacaze A.  
Modération des Neutrons aux très Basses Températures.  
Rapport CEA 2012, 1962
- /31/ Webb  
Cold Neutron Sources  
AERE, Harwell; Reactor Science and Technology,  
Vol 17, 1963
- /32/ Marfaing R.  
Dispositif d'irradiation dans L'azote liquide pour  
la pile Ulysse  
Rapport, présenté à Euratom, Karlsruhe  
Fevrier 1965
- /33/ Gracie P.S.  
Strength of Metals Under Rapid Loading, a Survey in  
Relation to the DIDO 4H5 Liquid Hydrogen Loop  
Containment Vessel  
AERE M 1471 Sept. 1965
- /34/ Lichti  
Projekt FR2/16; Reaktion von flüssigem Wasserstoff  
mit Sauerstoff; Versuche mit dem Trauzlblock.  
RB-Notiz Nr. 14/65, 30.4.1965 (nicht veröffentlicht)
- /35/ Cassut, Biron, Vonnegut  
Electrostatic Hazards Associated with the  
Transfer and Storage of Liquid Hydrogen  
A.D.Little Inc.; Cambridge, Mass.
- /36/ Van Dolah R.W., Zabetakis M.G., Burgess D.S., Scott G.S.  
Review of Fire and Explosion Hazards of Flight  
Vehicle Combustibles  
ASD Technical Report 61-278, April 1961



Reaktion von Flüssig-H<sub>2</sub> mit Flüssig-Luft

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vers.- Nr.	Vol. Fl.-H <sub>2</sub> V <sub>H</sub>	% stöch.	P <sub>1</sub> *)	P <sub>2</sub> **)	P <sub>1</sub> /P <sub>2</sub>	$\frac{P_1}{V_H}$	$\frac{P_1 \cdot V_G}{V_H}$ ***)	$\frac{P_2}{V_H}$	$\frac{P_2 \cdot V_G}{V_H}$ ***)	Bemerkungen
-	cm <sup>3</sup>	-	at	at	-	at/cm <sup>3</sup>	at/cm <sup>3</sup> :l	at/cm <sup>3</sup>	at/cm <sup>3</sup> :l	-
L1	40	20	36	14	2,57	0,9	2,74	0,35	1,07	Luft- } Kleines teil- } Druck- weise } rohr fest } V <sub>G</sub> =3,05 l
L2	40	20	40	16	2,5	1	3,05	0,4	1,22	
L3	40	20	34	16	2,12	0,85	2,59	0,4	1,22	
L4	20	100	36	20	1,8	1,8	5,5	1	3,05	
L5	40	100	97	20	4,85	2,43	15	0,5	3,09	
L6	40	100	22	22	1	0,55	3,4	0,55	3,4	
L7	40	100	16	8	2	0,4	2,48	0,2	1,24	
L8	40	100	16	8	2	0,4	2,48	0,2	1,24	
L9	40	100	32	24	1,33	0,8	4,95	0,6	3,71	
L10	40	100	nicht auswertbar		-	-	-	-	-	
L11	40	100	22	12	1,83	0,55	3,4	0,3	1,86	
L12	60	100	80	10	8	1,33	8,2	0,17	1,05	
L13	60	100	nicht auswertbar		-	-	-	-	-	Elektronikfehler

\*) P<sub>1</sub> = Höchstdruck (höchster gemessener Druck)\*\*\*) V<sub>G</sub> = Rauminhalt des Reaktionsgefäßes\*\*) P<sub>2</sub> = größter "quasistatischer" Druck

Tabelle 1 (Fortsetzung)

Blatt 2  
von 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vers.- Nr.	Vol. Fl.-H <sub>2</sub> V <sub>H</sub>	% stöch.	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub> / P <sub>2</sub>	$\frac{P_1}{V_H}$	$\frac{P_1 \cdot V_G}{V_H}$	$\frac{P_2}{V_H}$	$\frac{P_2 \cdot V_G}{V_H}$	Bemerkungen
L14	150	100	360	300	1,2	2,4	14,9	2,0	12,36	
L15	40	100	42	25	1,68	1,05	6,5	0,625	3,87	
L16	140	70	210	210	1	1,5	9,3	1,5	9,26	
L17	100	100	90	60	1,5	0,9	5,5	0,6	3,71	
L18	100	100	180	130	1,38	1,8	11,1	1,3	8,05	
L19	100	100	160	120	1,33	1,6	9,9	1,2	7,45	
L20	80	175	nicht	auswertbar	-	-	-	-	-	keine Reaktion
L21	200	10	nicht	auswertbar	-	-	-	-	-	Elektronik ver- sagt
L22	200	10	nicht	auswertbar	-	-	-	-	-	keine Auslösung
L23	200	30	nicht	auswertbar	-	-	-	-	-	keine Reaktion
L24	200	30	34	27	1,26	0,17	1,05	0,13	0,81	
L25	200	30	nicht	auswertbar	-	-	-	-	-	Bedienungsfehler (Kameras)
L26	200	30	68	40	1,7	0,34	2,1	0,2	1,24	
L27	200	30	66	66	1	0,33	2,04	0,33	2,01	
L28	200	30	21	21	1	0,1	0,62	0,1	0,62	
L29	200	50	390	260	1,5	1,95	12,1	1,3	8,04	

Tabelle 1 (Fortsetzung)

Blatt 3  
von 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Vers.- Nr.	Vol. Fl.-H <sub>2</sub> V <sub>H</sub>	% stöch.	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub> /P <sub>2</sub>	$\frac{P_1}{V_H}$	$\frac{P_1 \cdot V_G}{V_H}$	$\frac{P_2}{V_H}$	$\frac{P_2 \cdot V_G}{V_H}$	Bemerkungen	
L30	40	70	nicht auswertbar		-	-	-	-	-	Elektronikfehler	
L31	40	70	60	24	2,4	1,5	9,3	0,63	3,9		
L32	40	70	36	12	3	0,9	5,5	0,3	1,86		
L33	100	50	86	40	2,15	0,86	5,3	0,4	2,48		
L34	100	50	72	56	1,28	0,72	4,45	0,56	3,47		
L35	100	70	nicht auswertbar		-	-	-	-	-		Bedienungsfehler (Elektronik)
L36	100	70	31	31	1	0,31	1,9	0,31	1,9		
L37	100	70	39	39	1	0,39	2,4	0,39	2,4		
L38	100	70	28	28	1	0,28	1,74	0,28	1,74		
L39	150	50	80	50	1,6	0,53	3,3	0,33	2,04		
I40	150	50	65	56	1,16	0,43	2,67	0,37	2,29		
I41	200	40	90	74	1,22	0,45	2,78	0,37	2,29		
I42	200	40	330	240	1,38	1,64	10,2	1,2	7,42		
I43	200	40	110	103	1,07	0,55	3,4	0,52	3,18		
I44	200	40	110	110	1	0,55	3,4	0,55	3,4		
I45	250	40	150	100	1,5	0,6	3,7	0,4	2,48		

Tabelle 1 (Fortsetzung)

Blatt 4  
von 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vers.- Nr.	Vol. Fl.-H <sub>2</sub> V <sub>H</sub>	% stöch.	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub> /P <sub>2</sub>	$\frac{P_1}{V_H}$	$\frac{P_1 \cdot V_G}{V_H}$	$\frac{P_2}{V_H}$	$\frac{P_2 \cdot V_G}{V_H}$	Bemerkungen
I46	250	40	70	20	3,5	0,28	1,75	0,08	0,5	
I47	250	40	35	35	1	0,14	0,87	0,14	0,87	
I48	200	50	56	56	1	0,28	1,75	0,28	1,73	
I49	200	50	117	117	1	0,47	2,9	0,47	2,91	

Tabelle 2 Versuche mit Knallgas

Blatt 1  
von 3

Vers.- Nr.	Gas- Anteile	***) Gefäß- volumen (1)	*) $P_0$ (ata)	*) $P_1$ (ata)	*) $t_1$ (ata)	Bemerkungen
KV 1	$2H_2/O_2$	2,4	1,5	90		
KV 2	$2H_2/O_2$	2,4	1,5	65		
KV 3	$2H_2/O_2$	2,4	1,5	55		
KV 4	$4H_2/O_2$	2,4	1,25	-		keine Anzeige
KV 5	$4H_2/O_2$	2,4	1,25	-		keine Anzeige
KV 6	$4H_2/3O_2$	2,4	1,75	55		
KV 7	$2H_2/O_2$	2,4	1,5	55		
KV 8	$2H_2/O_2$	3,05	1,5	65		
KV 9	$2H_2/O_2$	3,05	1,5	65		
KV10	$2H_2/O_2$	3,05	1,5	55		
KV11	$2H_2/O_2$	3,05	1,5	40		
KV12	$2H_2/O_2$	3,05	1,5	70		
KV13	$2H_2/O_2$	3,05	1,5	70		
KV14	$2H_2/O_2$	3,05	1,5	55		
KV15	$2H_2/O_2$	3,05	1,5	35		
KV16	$2H_2/O_2$	3,05	1,5	40		
KV17	$2H_2/O_2$	3,05	1,5	55		
KV18	$2H_2/O_2/N_2$	3,05	2,0	70		
KV19	$2H_2/O_2/N_2$	3,05	2,0	70		
KV20	$2H_2/O_2/4N_2$	3,05	3,5	40		
KV21	$2H_2/O_2/4N_2$	3,05	3,5	70		
KV22	$2H_2/O_2/4N_2$	3,05	3,5	70		

nicht messbar, da nur eine Messstelle

\*)  $P_0$  = Fülldruck,  $P_1$  = Maximaldruck nach Zündung $t_1$  = Zeitdifferenz zw. Erstausschlägen Geber 2 und Geber 1

\*\*\*) Volumen, das nach Zündung zur Verfügung steht

Vers. Nr.	Gas-Anteile	Gefäßvolumen (l)	*) P <sub>0</sub> (ata)	*) P <sub>1</sub> (ata)	*) t <sub>1</sub> (ms)	Bemerkungen
KV23	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	3,05	2,0	70		
KV24	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	3,05	1,5	70		
KV25	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	3,05	1,5	70		
KV26	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	3,05	1,5	40	-	
KV27	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	3,05	1,5	56	0,2	
KV28	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	3,05	1,5	-	-	keine Aufzeichnung
KV29	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	3,05	1,5	62	0,25	
KV30	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	3,05	1,5	38	**)	
KV31	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	3,05	1,5	38	**)	
KV32	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	3,05	1,5	55	0,3	
KV33	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	3,05	1,1	-	-	keine Zündung
KV34	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	3,05	1,5	44	**)	
K 1	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	6,19	1,5	67	0,6	
K 2	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	6,19	1,5	-	-	keine Aufzeichnung
K 3	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	6,19	1,5	89	0,7	
K 4	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	6,19	1,5	47	0,7	
K 5	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	6,19	1,5	50	0,8	
K 6	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	6,19	1,5	60	0,85	
K 7	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	6,19	1,5	60	0,8	2 DewargefäÙe mit zusammen 1 l H <sub>2</sub> O als Verdämmung. Dämmwirkung ca.70%
K 8	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	6,19	1,5	45	**)	
K 9	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	6,19	1,5	40	0,7	
K 10	2H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	6,19	1,5	45	0,7	

\*) siehe Blatt - 1 -

\*\*) Aufzeichnungen nicht vollständig

Tabelle 2 Versuche mit Knallgas (Fortsetzung)

Blatt 3  
von 3

Vers.- Nr.	Gas- Anteile	Gefäß- volumen (l)	*) $P_0$ (ata)	*) $P_1$ (ata)	*) $t_1$ (ms)	Bemerkungen
K11	$2H_2/O_2$	6,19	1,5	30	0,8	1 Dewargefäß mit $\approx 700 \text{ cm}^3$ $H_2O$ als Verdämmung Dämmwirkung ca. 75%
K12	$2H_2/O_2$	6,19	1,5	30	**)	
K13	$2H_2/O_2$	6,19	1,5	35	0,8	1 Dewargefäß mit 150cm <sup>3</sup> fl.Luft als Verdämmung Dämmwirkung ca. 70 %
K14	$2H_2/O_2$	6,19	1,5	50	0,8	
K15	$2H_2/O_2$	6,19	1,5	40	0,85	
K16	$2H_2/O_2$	6,19	1,5	40	0,85	

\*) siehe Blatt - 1 -

\*\*) Aufzeichnungen nicht vollständig

Tabelle 3 Versuche mit Flüssig-Sauerstoff

Blatt 1  
von 3

Vers. Nr.	Menge Fl-H <sub>2</sub>	% stöch.	Anordnung *)	P <sub>1</sub> **)	P <sub>2</sub> **)	Bemerkungen
	cm <sup>3</sup>			at	at	
0 1	40	100	tr.	-	-	keine Anzeige
0 2	40	100	tr.	20	20	
0 3	40	100	tr.	-	-	keine Anzeige
0 4	40	100	tr.	72	45	
0 5	40	100	tr.	20	18	
0 6	40	100	tr.	-	-	keine Anzeige
0 7	40	100	tr.	20	20	
0 8	40	100	tr.	10	8	
0 9	40	100	m	70	-	keine Anzeige; Wert für P <sub>1</sub> aus Festigkeitsrechnung; Druckrohr aufgebeult
010	40	100	tr.	18	18	
011	40	100	tr.	28	28	
012	30	100	tr.	55	55	H <sub>2</sub> und O <sub>2</sub> in je einem Glasdewar
013	25	120	m	65	20	
014	70	100	m	175	0	Druckrohr aufgebeult
015	70	100	m	150	0	Druckrohr gerissen
016	40	100	tr.	49	37	
017	40	100	tr.	72	50	
018	40	100	tr.	42	42	
019	40	100	tr.	78	45	
020	40	100	tr.	34	34	

\*) tr = Fl-H<sub>2</sub> u. Fl-O<sub>2</sub> in getrennten Gefäßen;  
m = Fl-H<sub>2</sub> u. Fl-O<sub>2</sub> in einem Gefäß, gemischt } siehe Abb.18

\*\*) P<sub>1</sub> = Höchstdruck (Maximal gemessener Druck);  
P<sub>2</sub> = größter "quasistatischer" Druck.



Tabelle 3 Versuche mit Flüssig-Sauerstoff  
(Fortsetzung)

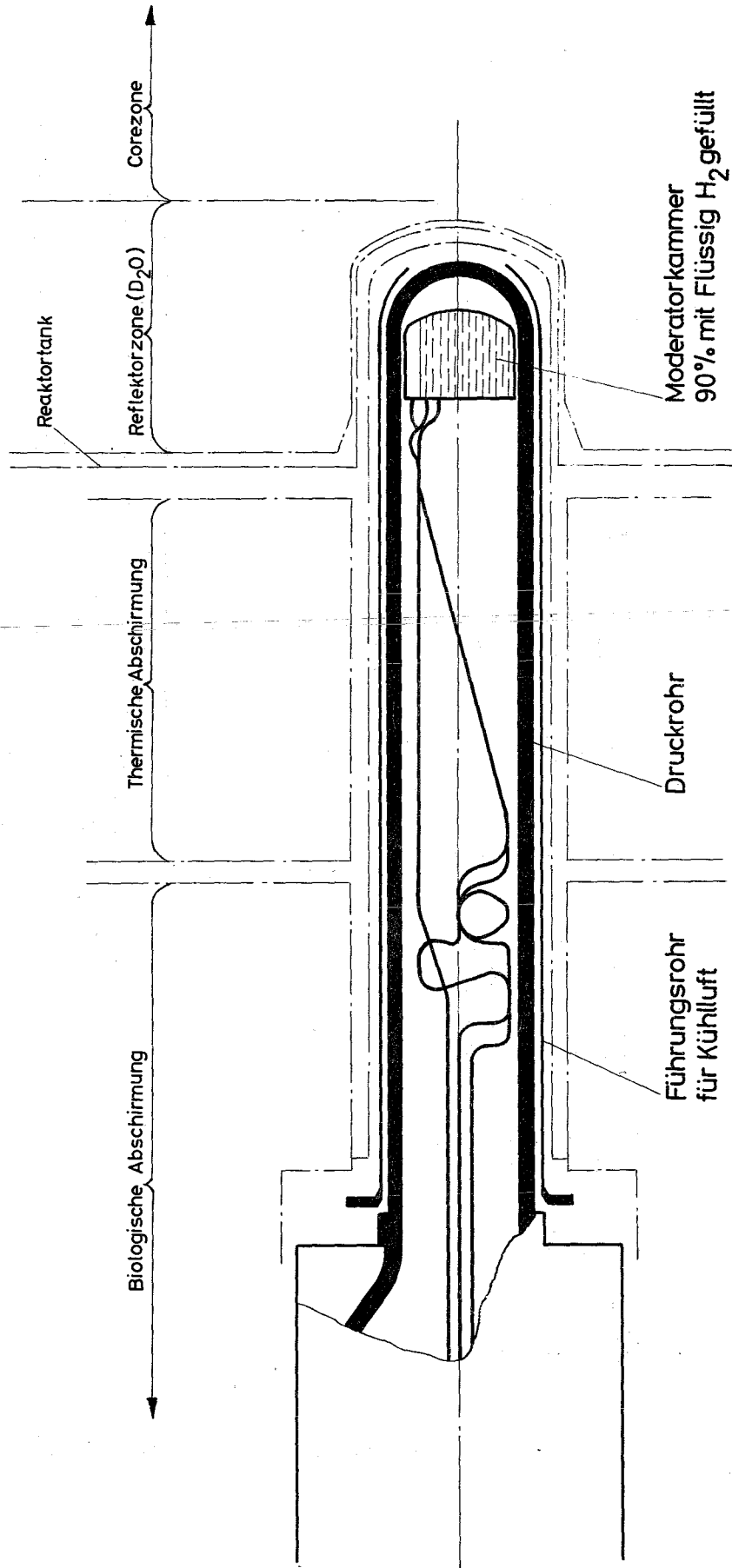
Blatt 2  
von 3

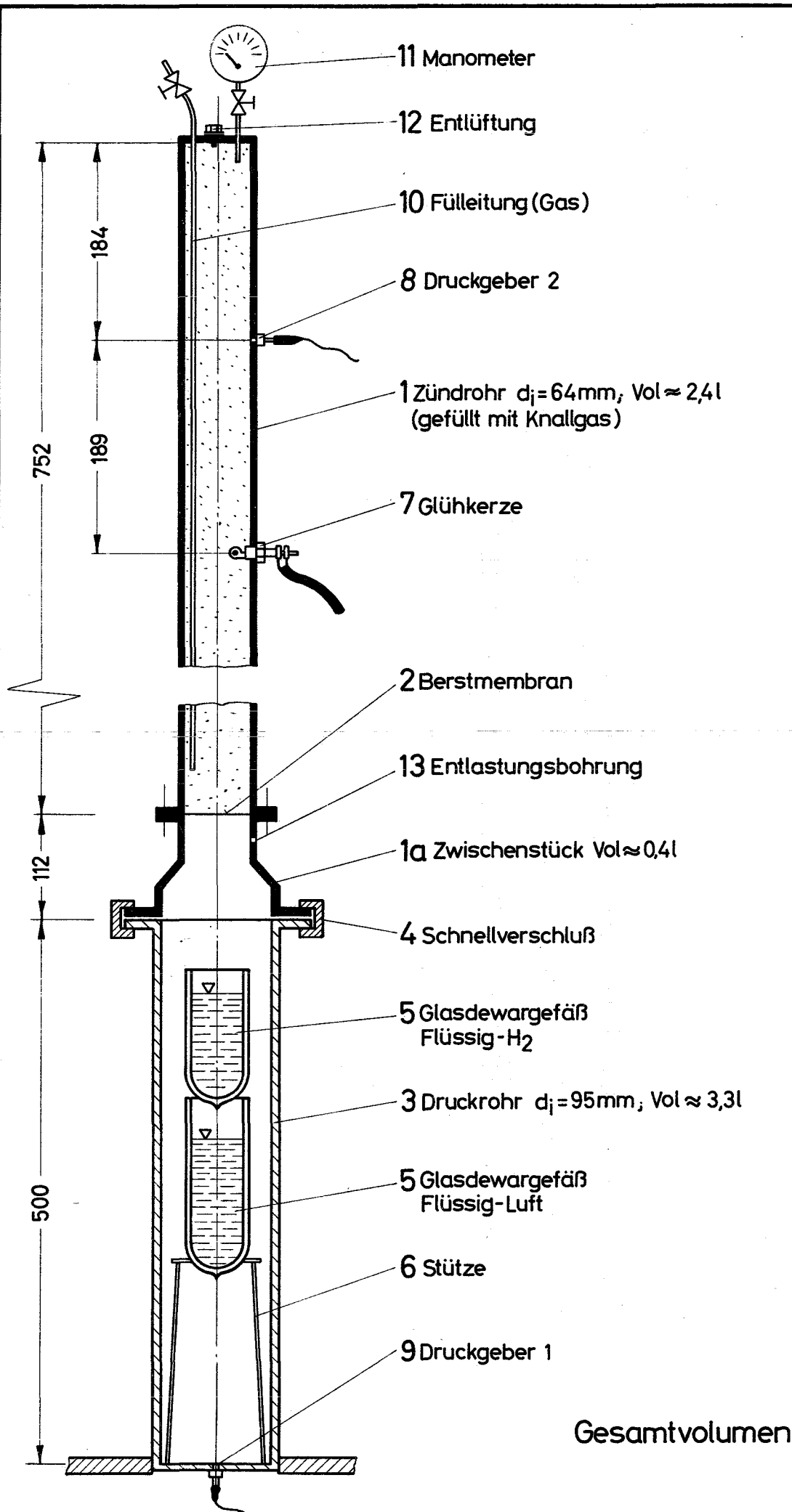
Vers. Nr.	Menge Fl.-H <sub>2</sub>	% stöch.	Anord- nung	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	Bemerkungen
	cm <sup>3</sup>			at	at	
021	40	100	tr.	45	36	
022	40	100	tr.	60	44	
023	40	100	tr.	50	30	
024	40	100	tr.	60	42	
025	40	100	tr.	68	68	
026	40	100	tr.	60	34	
027	40	100	tr.	60	55	
028	40	100	tr.	20	15	
029	40	100	tr.	-	-	kein Zündgas, keine Trennfolie, keine Zündung
030	40	100	tr.	56	40	
031	40	100	tr.	22	22	
032	40	100	tr.	60	54	
033	40	100	tr.	50	28	
034	40	100	tr.	50	42	
035	40	100	tr.	32	32	
036	40	100	tr.	36	36	
037	40	100	tr.	30	30	
038	50	80	tr.	60	52	
039	50	80	tr.	140	74	
040	50	80	tr.	52	52	
041	50	80	tr.	94	60	

Tabelle 3 Versuche mit Flüssig-Sauerstoff  
(Fortsetzung)

Blatt 3  
von 3

Vers. Nr.	Menge Fl.-H <sub>2</sub>	% stöch.	Anord- nung	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	Bemerkungen
	cm <sup>3</sup>			at	at	
042	40	100	m	-	-	keine Anzeige
043	40	100	m	64	12	
044	40	100	m	60	12	
045	40	100	m	64	20	
046	40	100	m	120	22	Zündrohr aufgebeult
047	40	100	m	106	24	
048	40	100	m	120	20	
049	40	100	m	-	-	keine Zündung
050	40	100	m	132	30	
051	40	100	m	84	31	



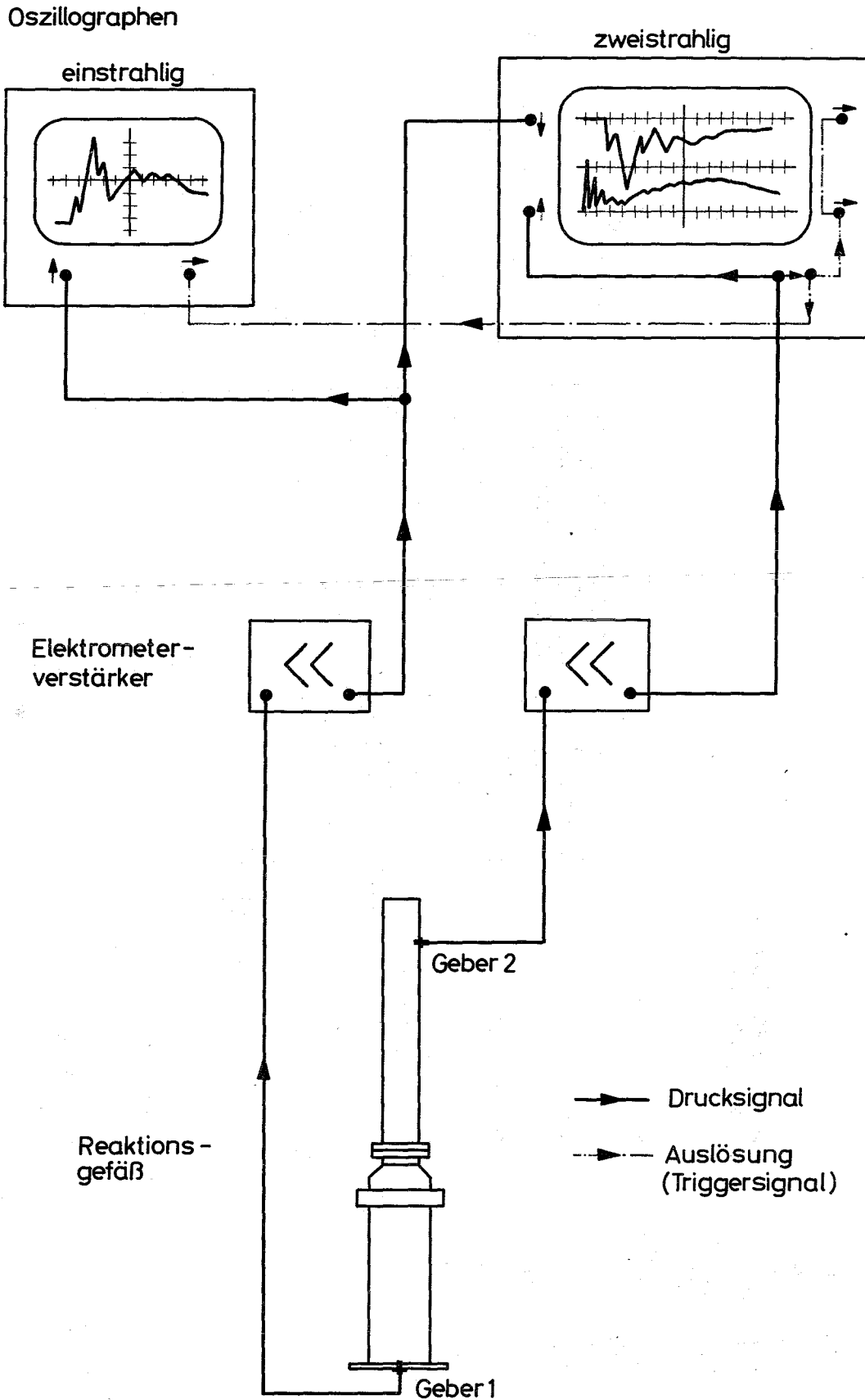


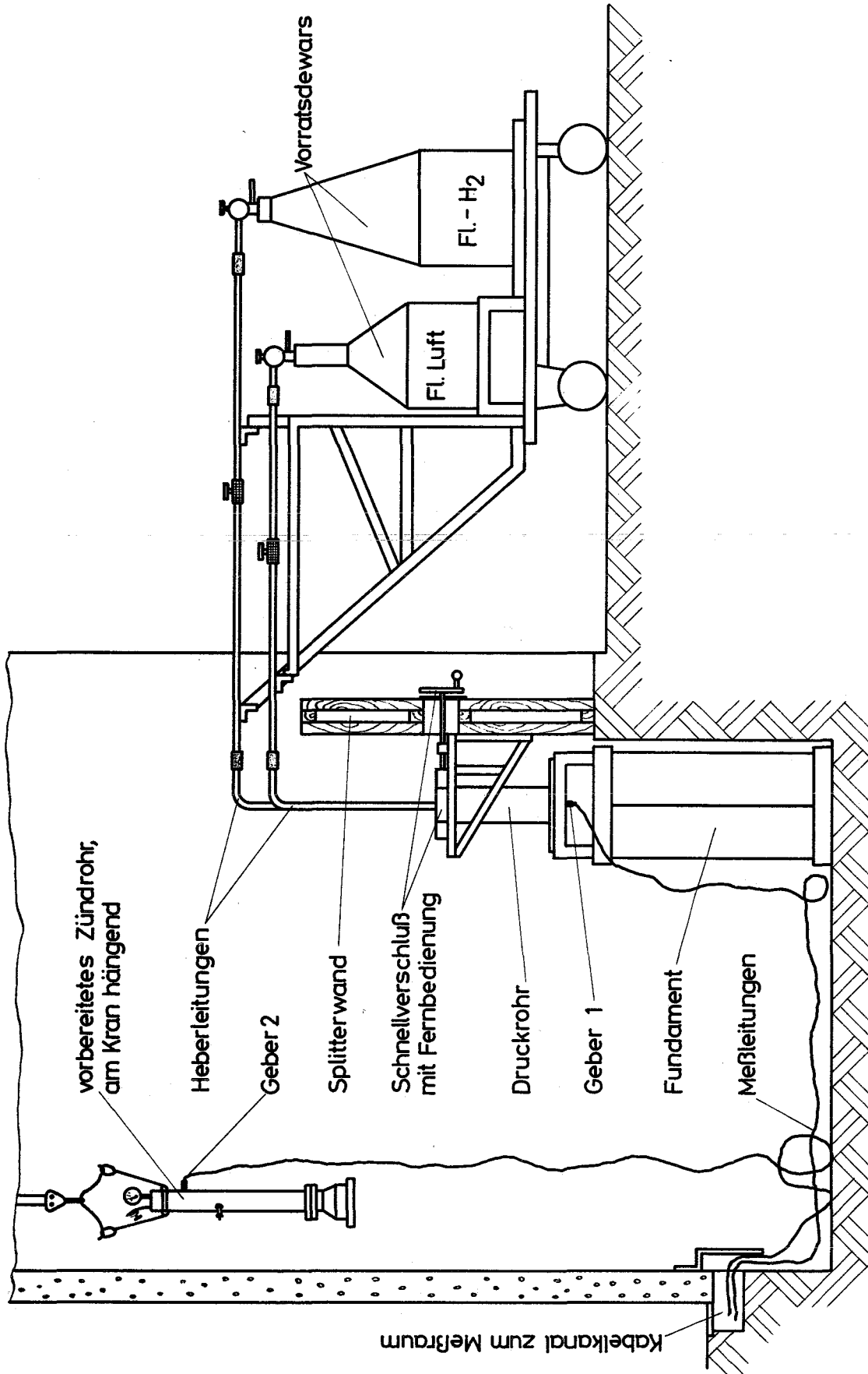
**Abb. 2**  
P016-10-4-2

H<sub>2</sub>-Reaktionsversuche  
**Reaktionsgefäß, Schema**

Gesellschaft für  
Kernforschung  
Karlsruhe  
Abteilung Reaktorbetrieb

Gesamtvolumen  $V_G = 6,185\text{l}$

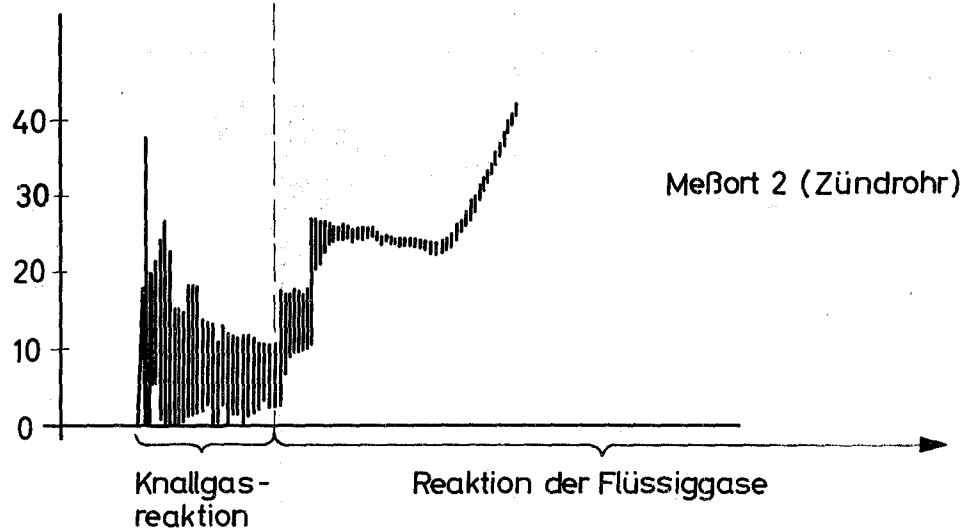
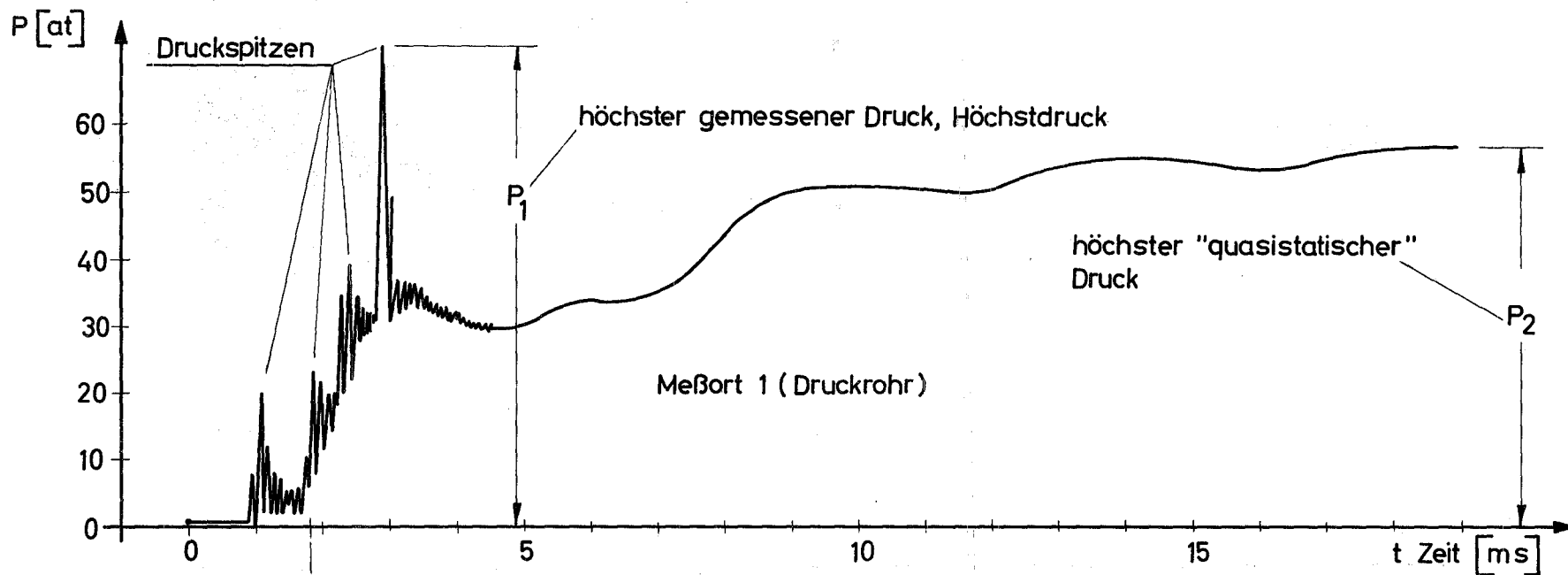




# Druck - Zeit - Diagramm

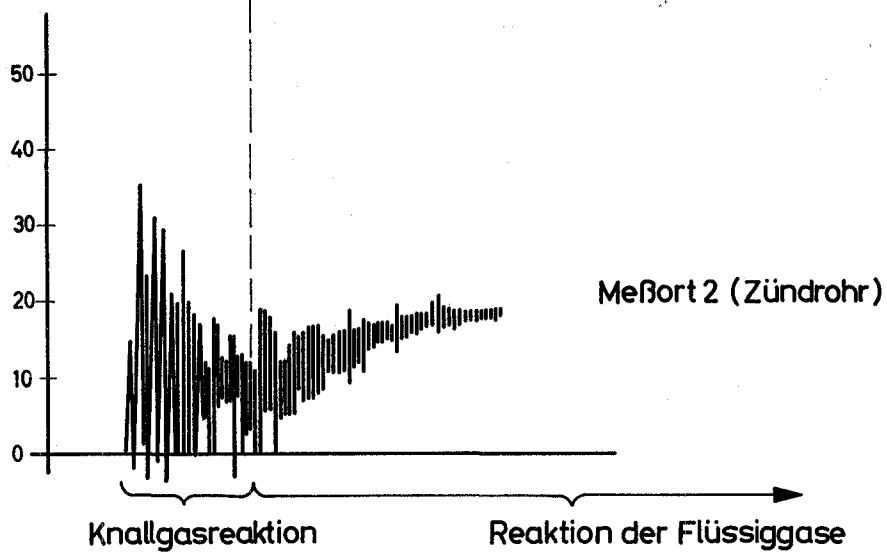
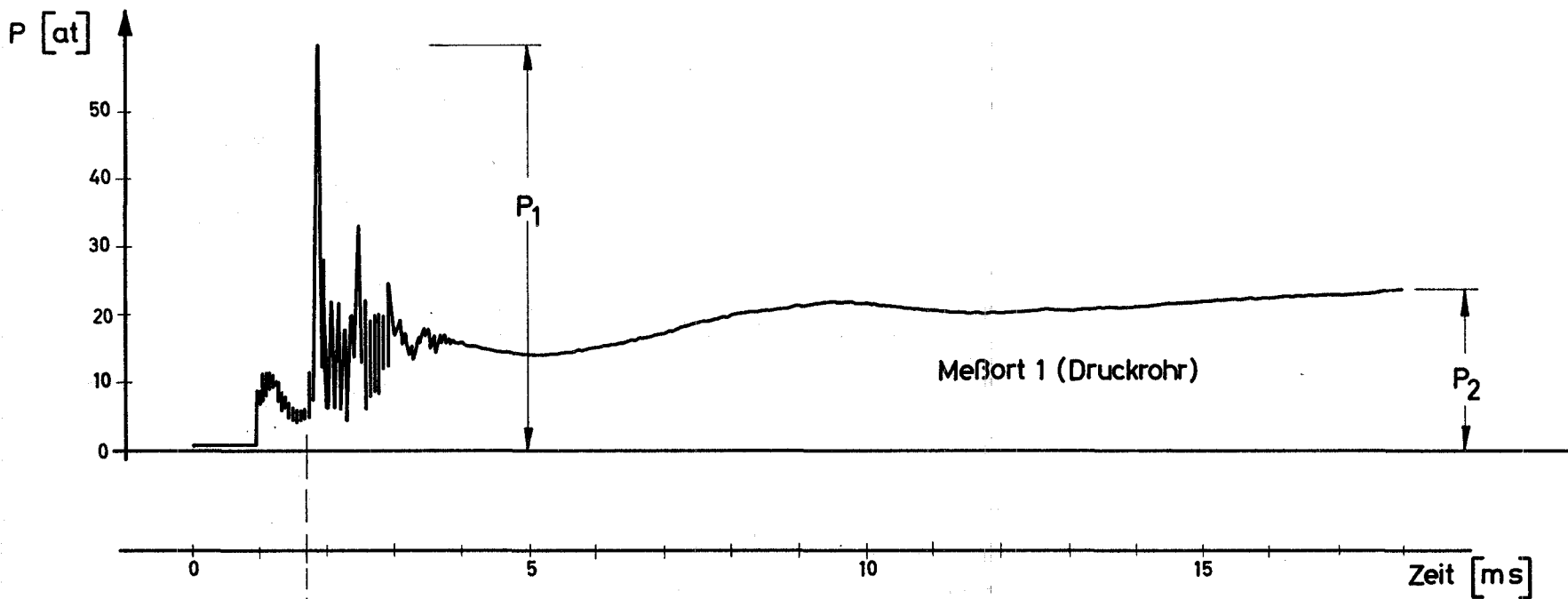
Versuch Nr. L 34

Abb.5  
P016-10-4-5



# Druck-Zeit-Diagramm

Abb.6  
P016-10-4-6

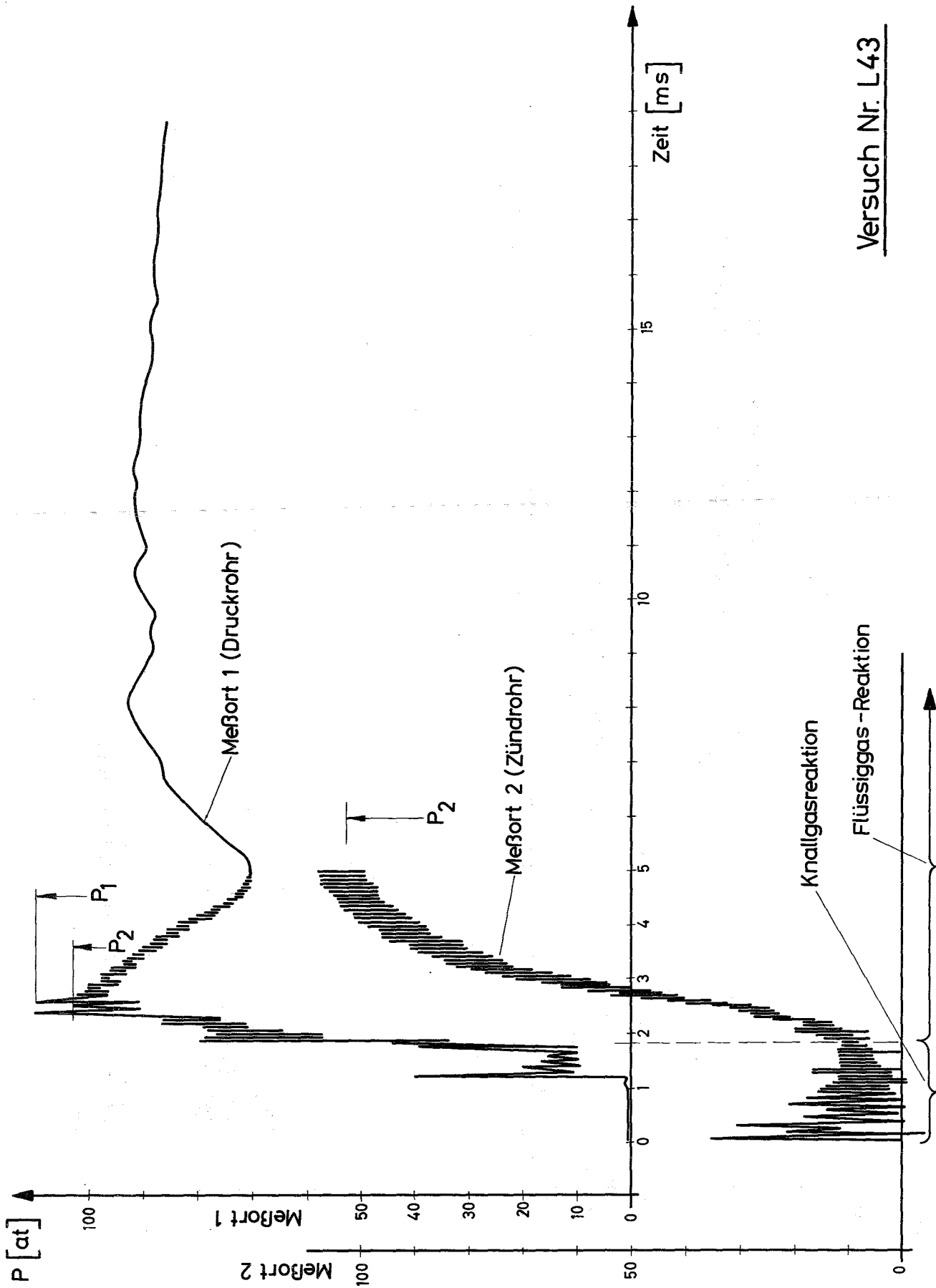


Versuch Nr. L 31



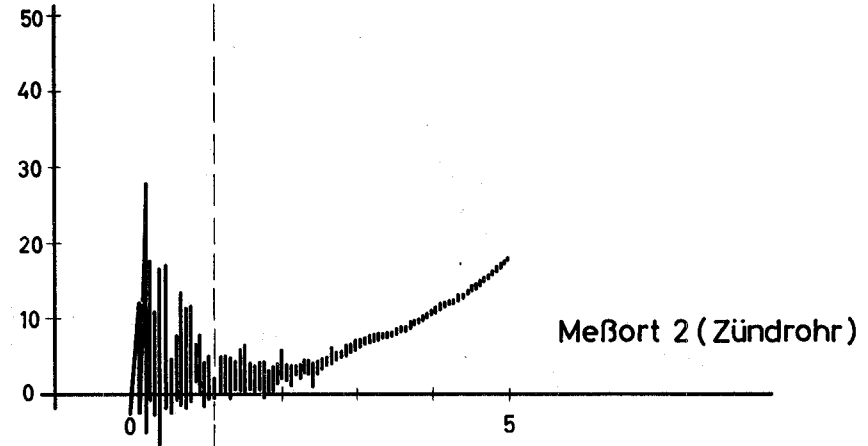
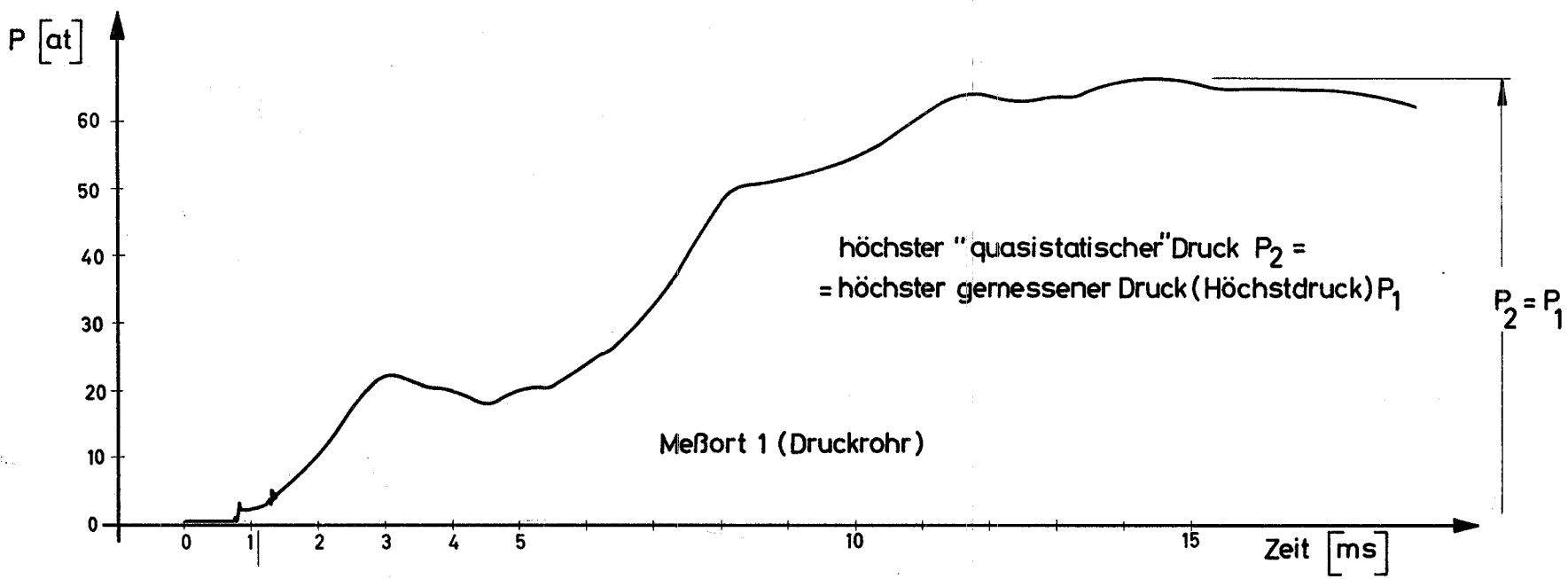
# Druck-Zeit-Diagramm

Versuch Nr. L43



Druck-Zeit-Diagramm

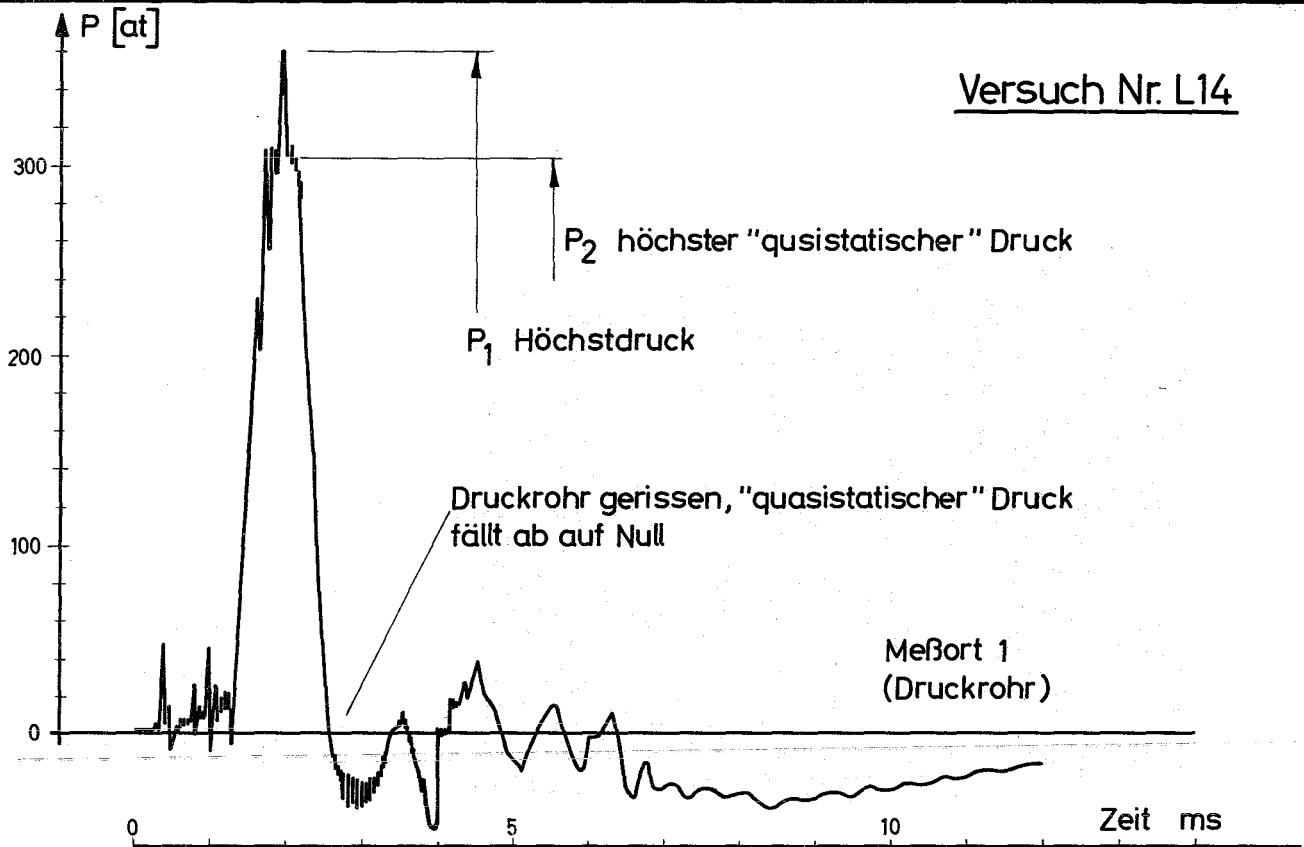
Abb. 8  
P016-10-4-8



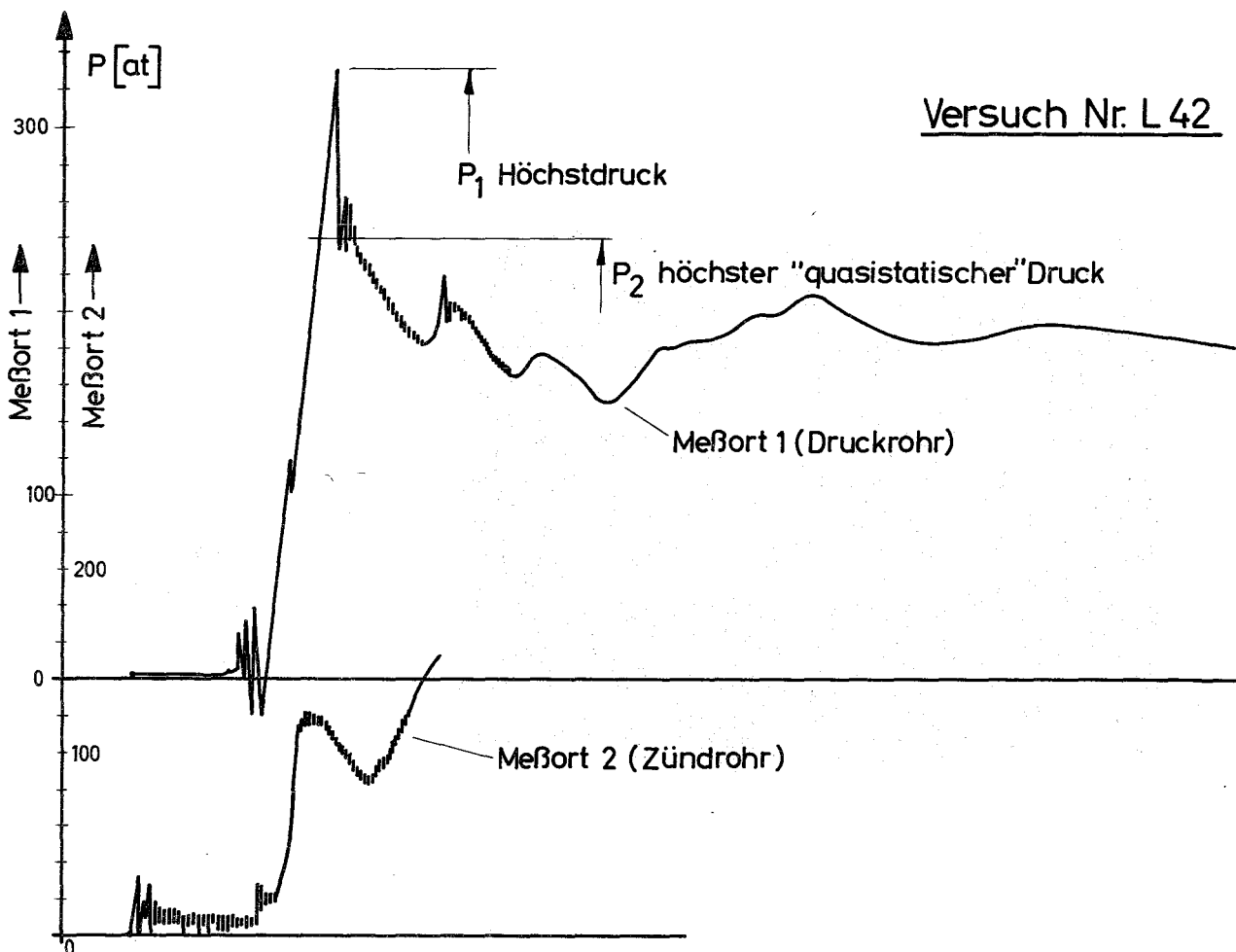
Knallgasreaktion      Reaktion der Flüssiggase

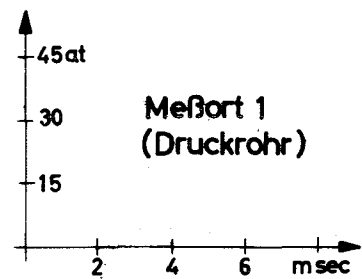
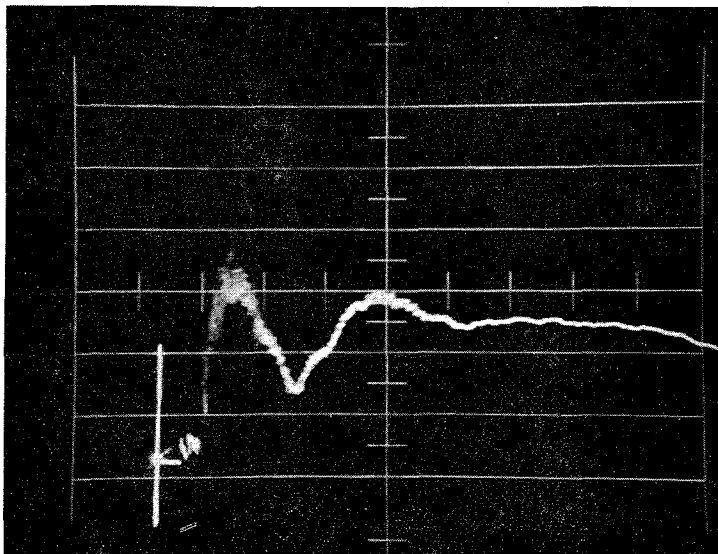
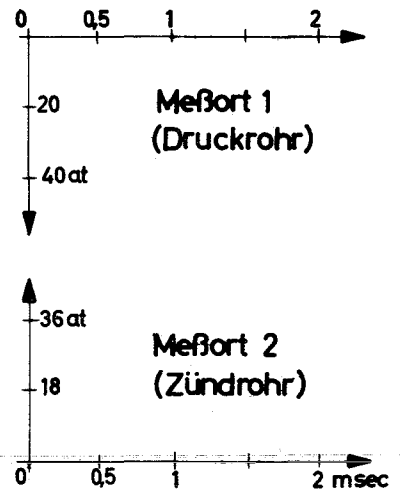
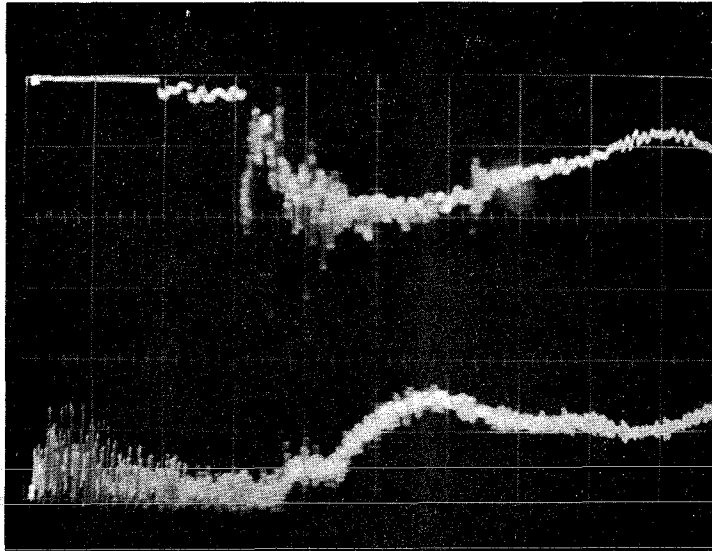
Versuch Nr. L 27

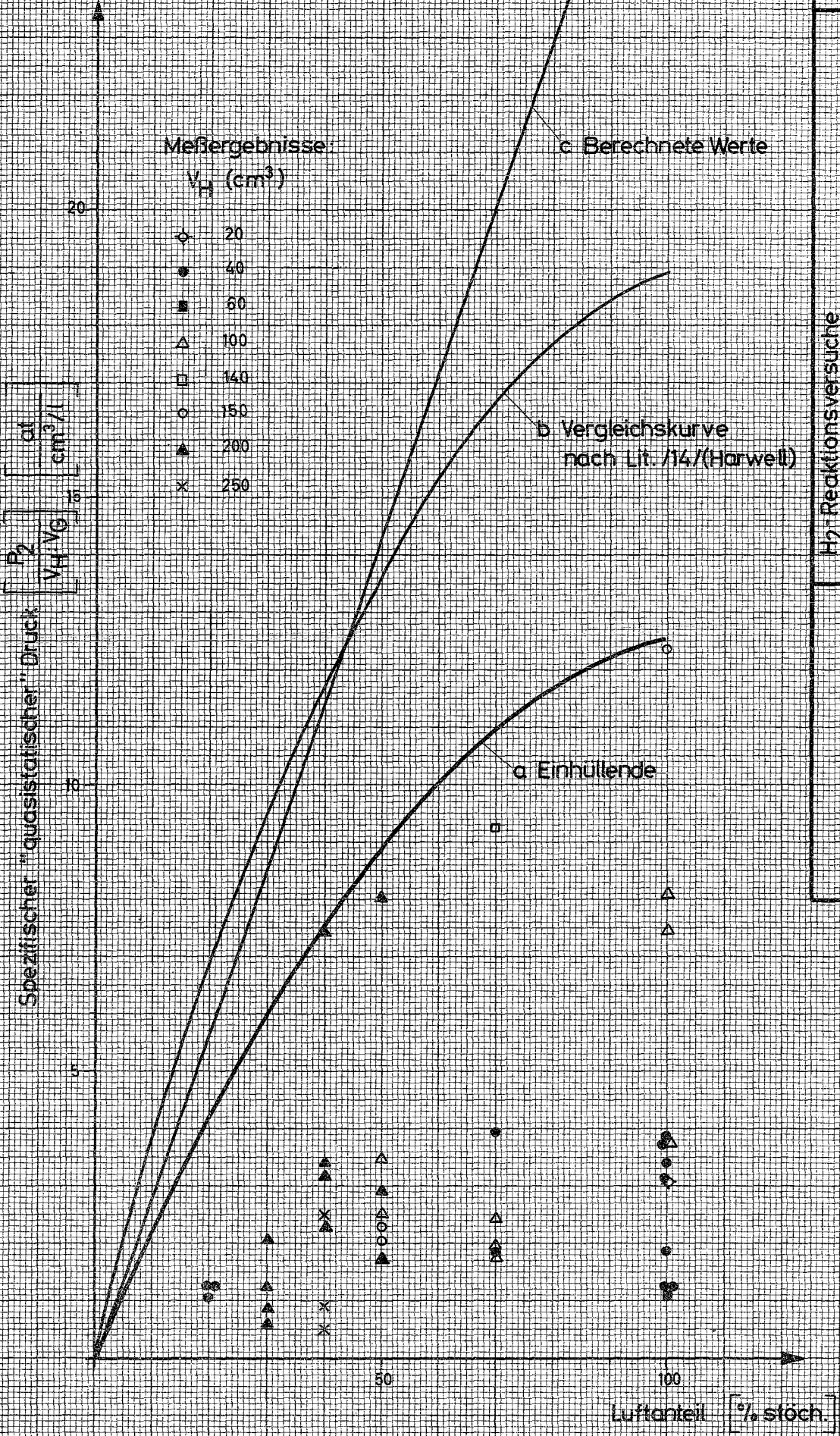
Versuch Nr. L14



Versuch Nr. L 42







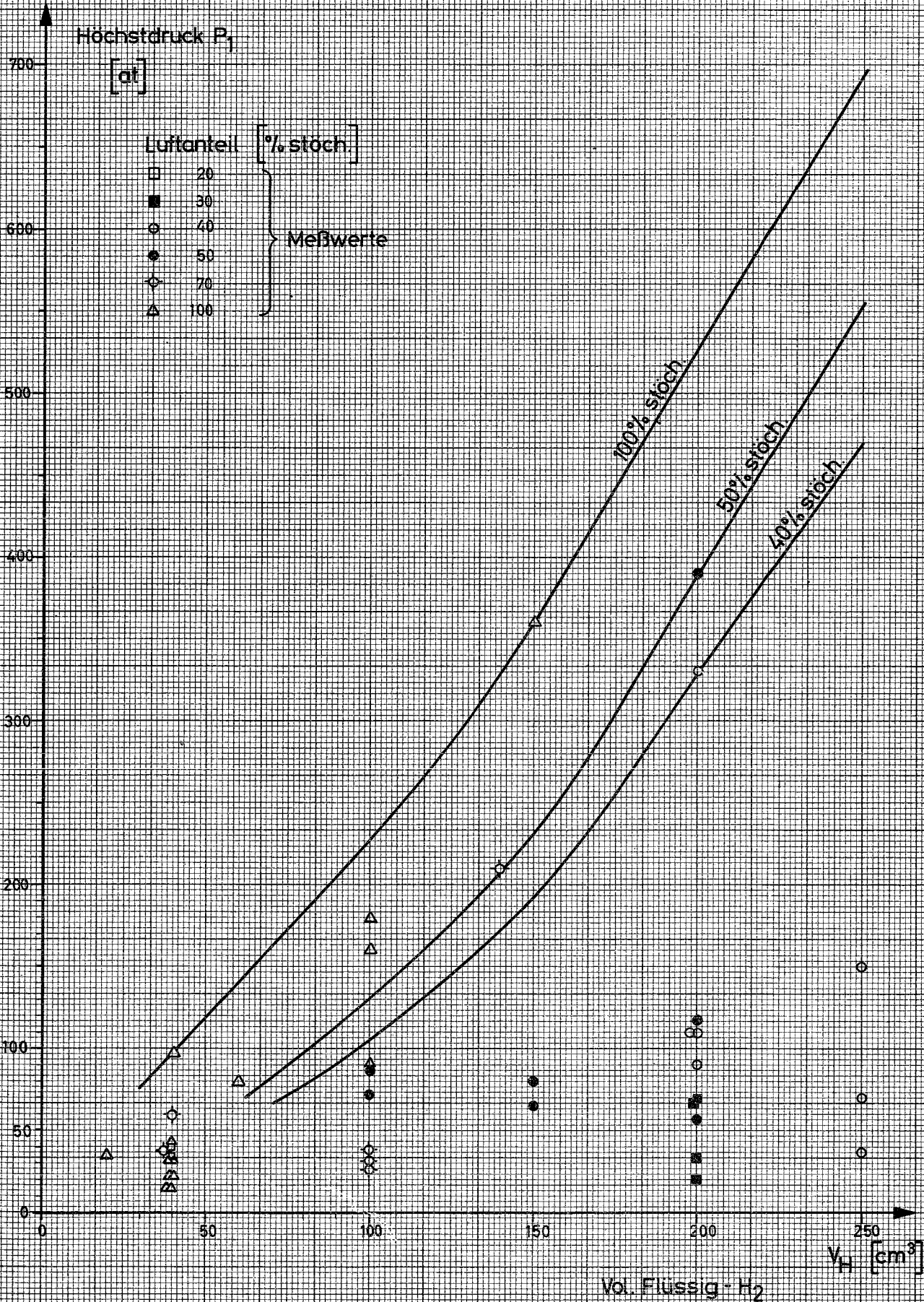
H<sub>2</sub>-Reaktionsversuche

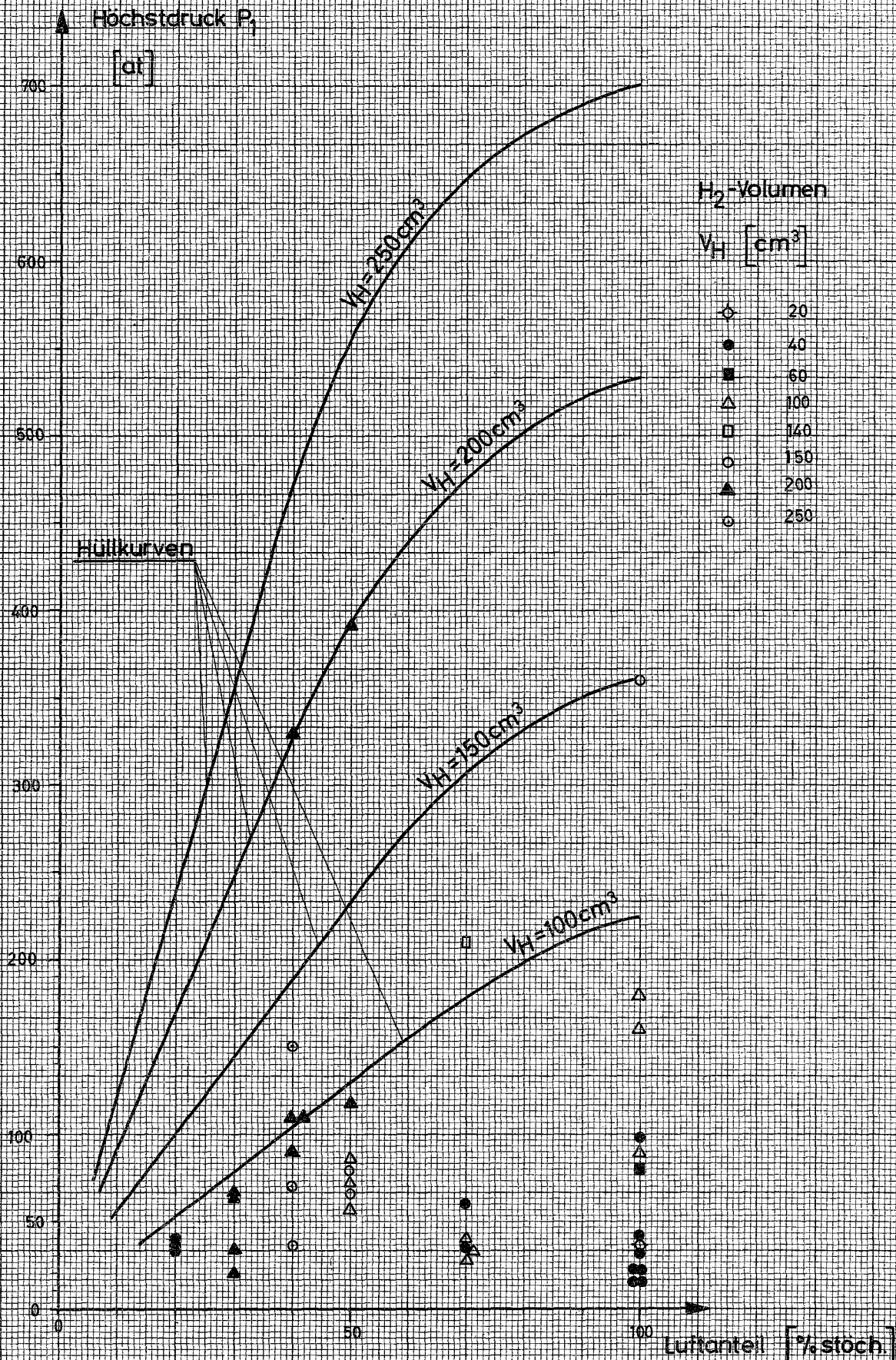
Reaktion Flüssig-H<sub>2</sub> mit Flüssig-Luft  
 Spezifischer "quasistatischer" Druck

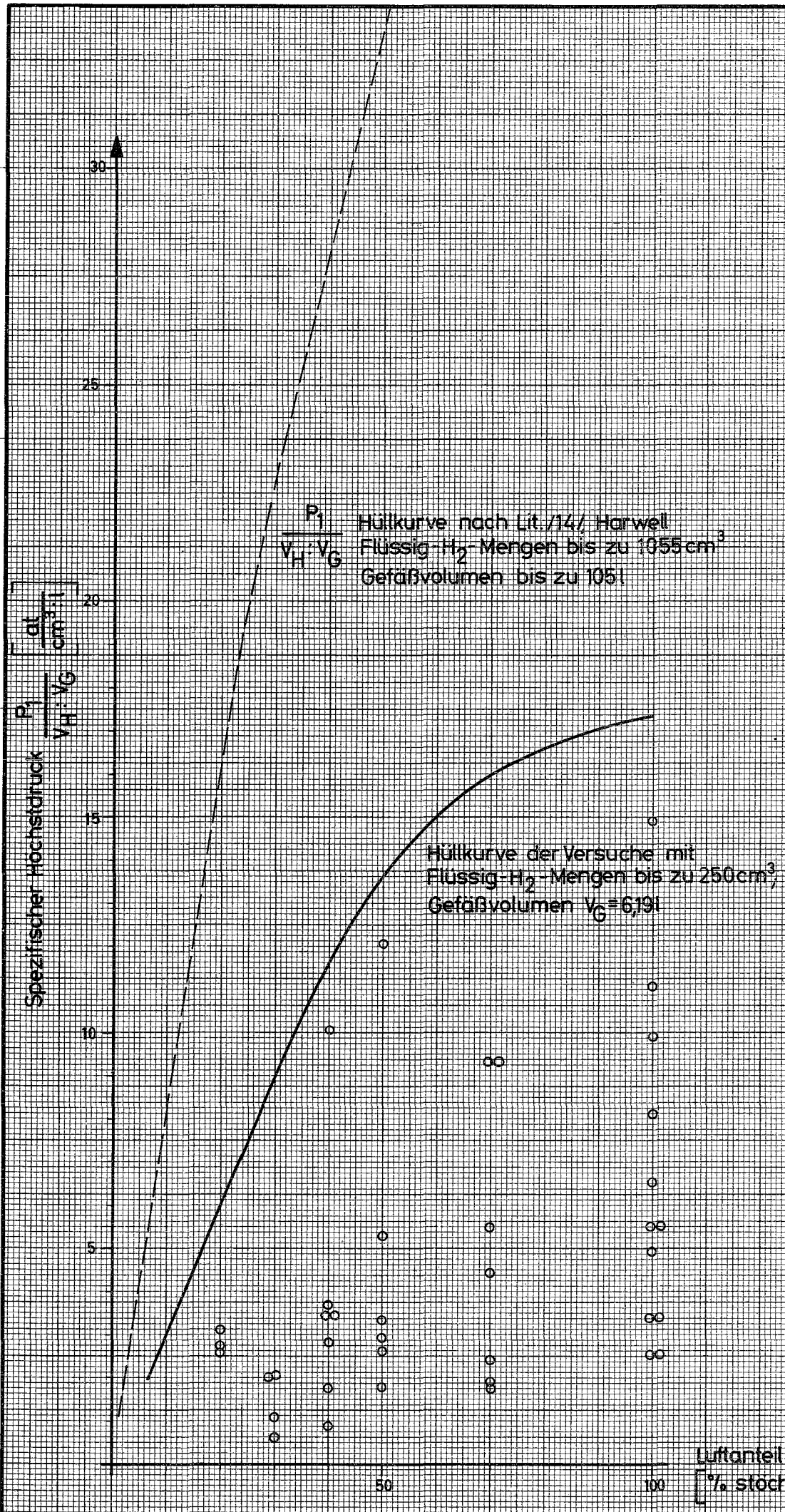
Gesellschaft für  
 Kernforschung  
 Karlsruhe  
 Abteilung Reaktorbetrieb

Abb.11

P016-10-2-11







H<sub>2</sub>-Reaktionsversuche

Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe  
Abteilung Reaktorbetrieb

Abb 14

P016-10-4-14

Reaktion Flüssig-H<sub>2</sub> mit Flüssig-Luft  
Vergleich mit Versuchen in Harwell, Lit./14/

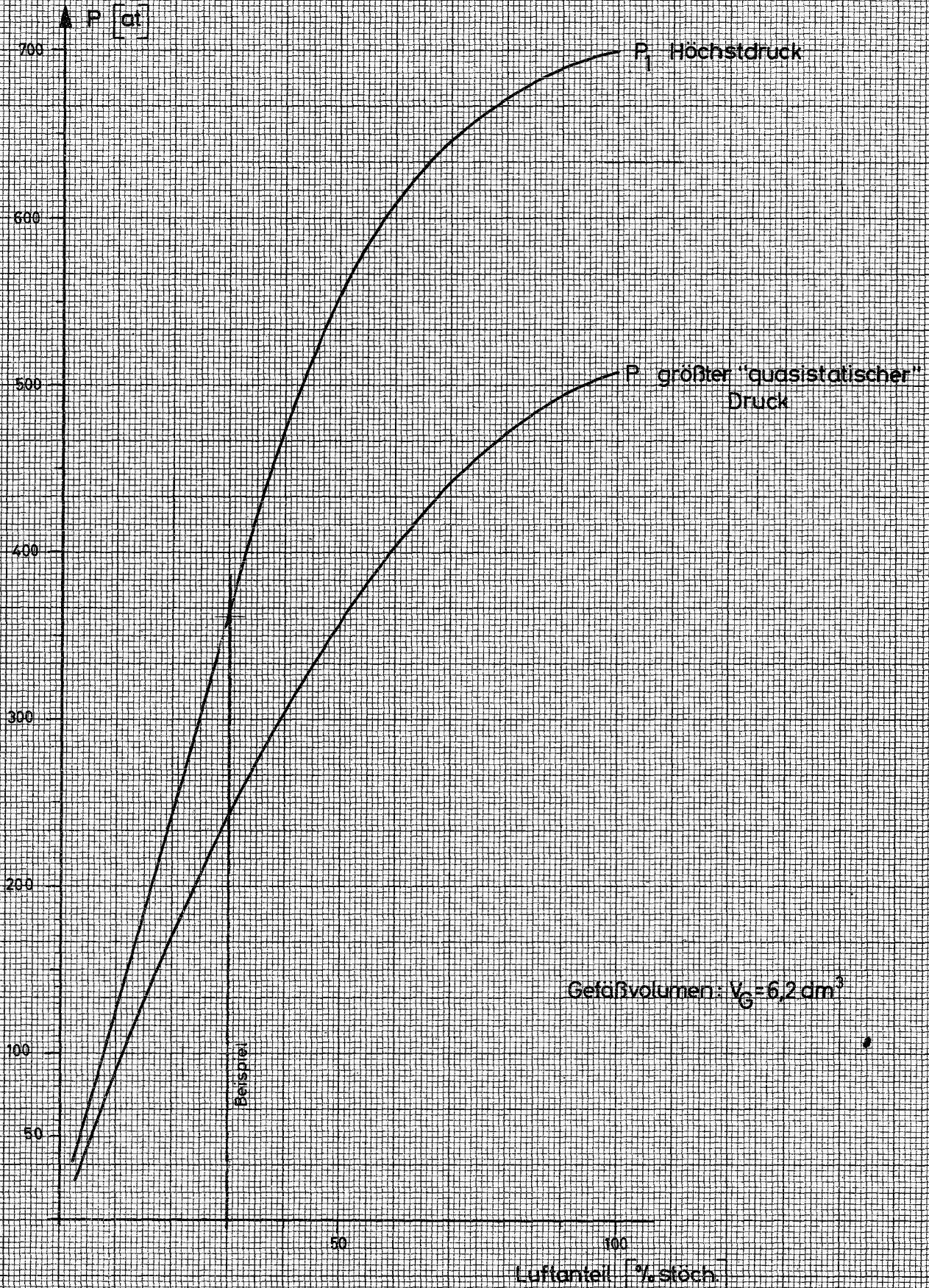


Gesellschaft für  
Kernforschung  
Karlsruhe  
Abteilung Reaktorbetrieb

H<sub>2</sub>-Reaktionsversuche

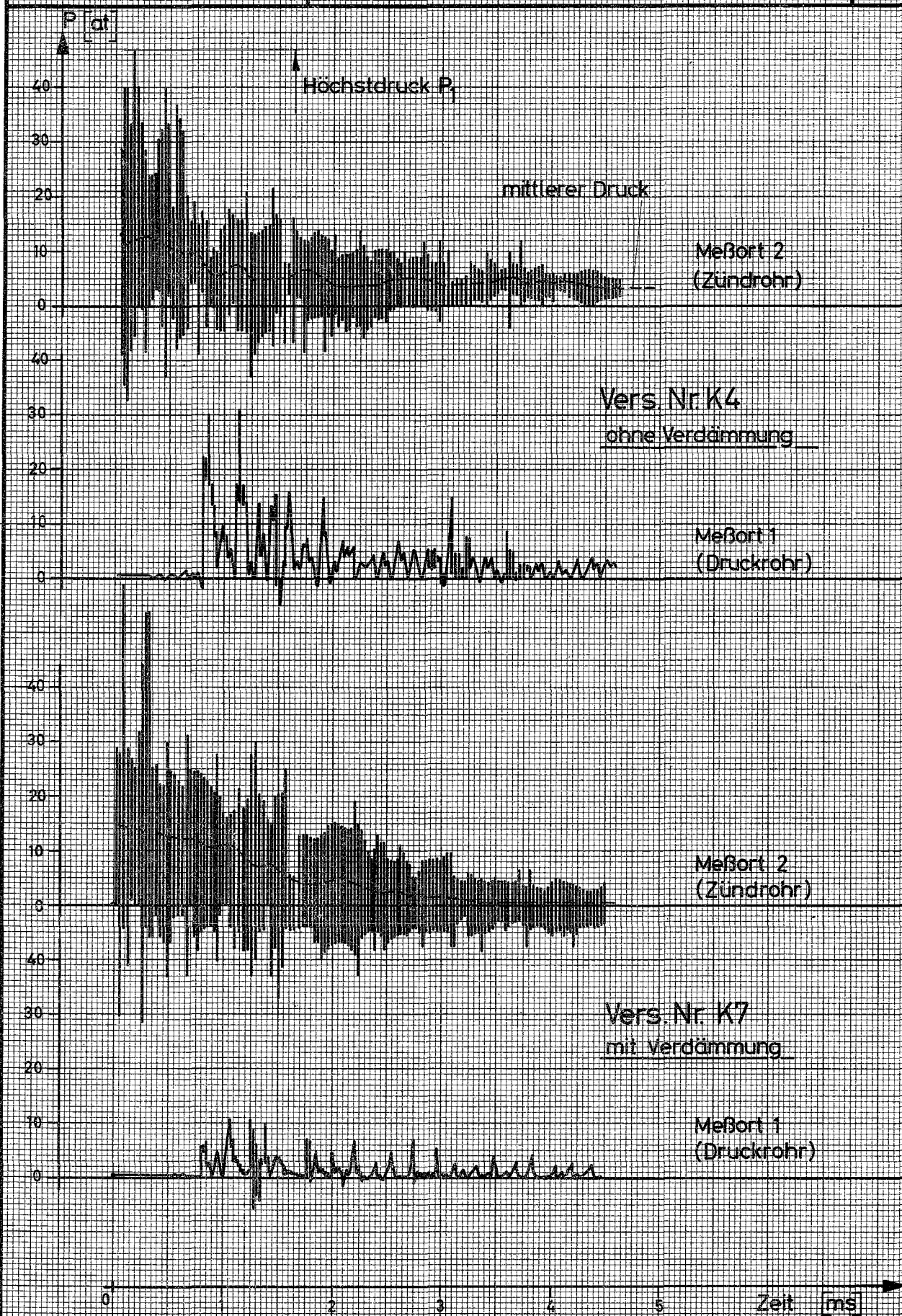
Reaktion Flüssig-H<sub>2</sub> mit Flüssig-Luft  
Gesamtergebnis: Hüllkurven der Messungen mit  
bis zu 250 cm<sup>3</sup> Flüssig H<sub>2</sub>

Abb.15  
P016-10-4-15



# Knallgasreaktion

## Druck-Zeit-Diagramme



P [at]

50

40

30

20

10

0

Vers. Nr. K9

ohne Verdämmung

Meßort 1  
(Druckrohr)

40

30

20

10

0

Vers. Nr. K11

mit Verdämmung

Meßort 1  
(Druckrohr)

0

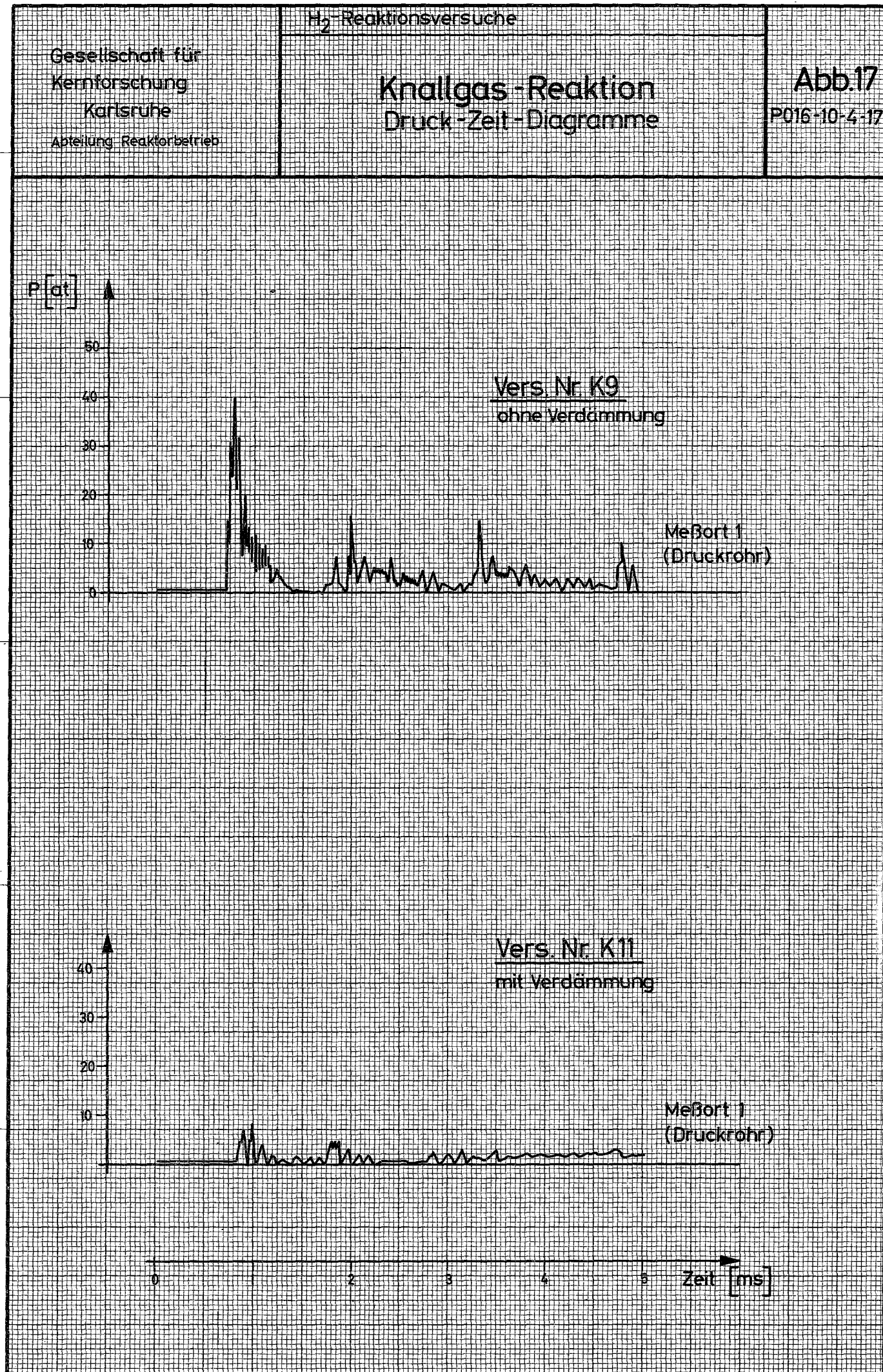
2

3

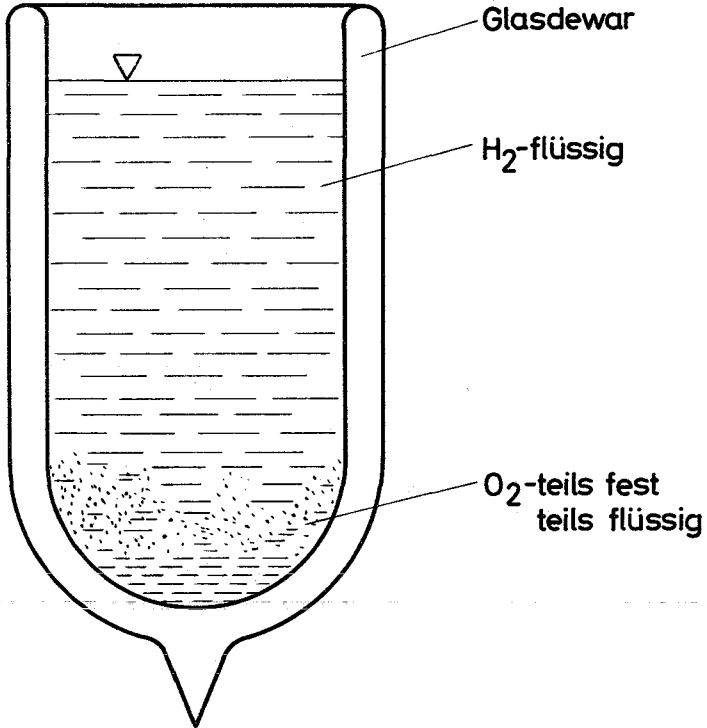
4

5

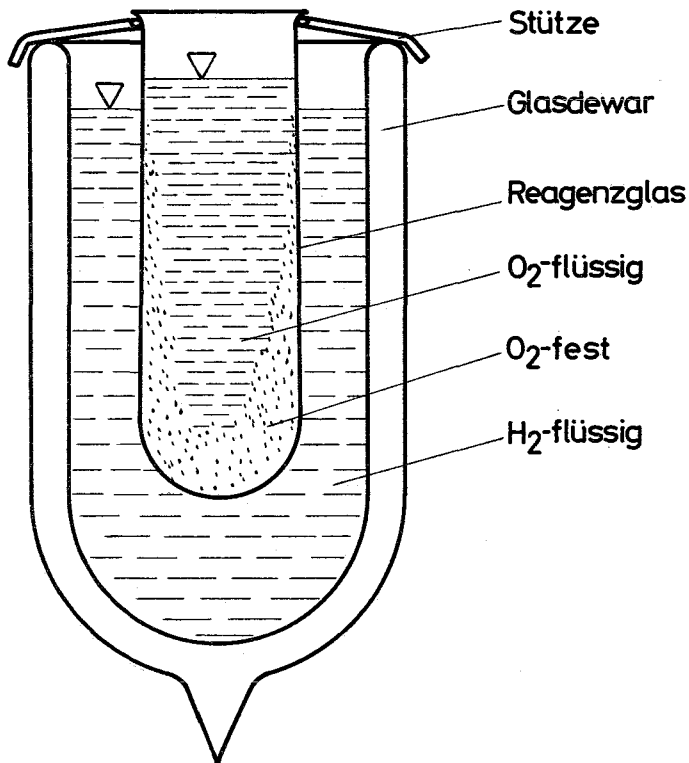
Zeit [ms]



Reaktion H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>  
Versuchsvarianten



Anordnung "m"  
Komponenten gemischt



Anordnung "tr"  
Komponenten getrennt

