

# BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brände von Erdölprodukten in Tanks  
Versuche und Rechenmodell

21

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER  
ARBEITSKREIS V – UNTERAUSSCHUSS "FEUERWEHRANGELEGENHEITEN"

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

AGF

Forschungsbericht Nr. 21

Brände von Erdölprodukten in Tanks  
Versuche und Rechenmodell

von

Dr.-Ing. H.G. Werthenbach

Die Abschnitte 1-6 enthalten den Text der von der Fakultät für  
Chemieingenieurwesen der Universität Karlsruhe (TH) genehmig-  
ten Dissertation des Verfassers

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

August 1971

FA.Nr. 44 (4/68)

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1.	Einleitung und Zielsetzung der Arbeit	6
2.	Literaturübersicht	10
2.1.	Abbrandgeschwindigkeit, Wärmezone	10
2.2.	Verbrennungsverlauf, Temperatur und Emissionsgrad der Flamme	21
2.3.	Wärmetransport von der Flamme zur Flüssigkeit	27
2.4.	Flammenlänge	34
3.	Versuche über die Wärmezufuhr von der Tankwand in die Flüssigkeit im Bereich unterhalb des Flüssigkeitsspiegels	38
3.1.	Meßmethode	38
3.2.	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	40
3.3.	Meßergebnisse und Folgerungen	43
4.	Versuche über die Verbrennung im Tankinneren	45
4.1.	Versuchsprogramm	45
4.2.	Versuchsanlage und Versuchsbedingungen	47
4.3.	Meßmethoden	52
4.3.1.	Konzentrationsmessung	52
4.3.2.	Temperaturmessung	53
4.3.3.	Flammenlängenmessung	53
4.4.	Meßergebnisse	54
4.4.1.	Konzentrationsmessung	54
4.4.2.	Temperaturmessung	63
4.4.2.1.	Untere Flammenzone im Tank	64
4.4.2.2.	Temperaturen im zeitlichen Mittel	66
4.4.2.3.	Schwingungsbreite der Temperaturschwankungen	68
4.4.2.4.	Frequenz der Temperaturschwankung	71
4.4.2.5.	Erscheinungsbild der Flammen	73
4.4.2.6.	Flammenlänge	75

4.5.	Meßfehler	79
4.6.	Zusammenfassung über Luftzufuhr und Verbrennung unterhalb der Tankmündung	81
5.	Möglichkeiten zum Aufbau eines Rechenmodells über Tankbrände	83
6.	Rechenmodell eines Tankbrandes	86
6.1.	Strahlungsaustausch zwischen Flamme und Flüssigkeit und zwischen Tankwand und Flüssigkeit	86
6.2.	Der Einfluß der Tankwand auf das Brandverhalten	95
6.3.	Abbrandgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Füllhöhe des Tanks und der Branddauer	97
6.4.	Anwendung des Rechenmodells	98
6.4.1.	Konzeption für künftige Versuche	98
6.4.2.	Berechnung der maximalen Abbrandgeschwindigkeit	99
6.4.3.	Maximaler Einfluß einer gekühlten Tankwand bei realen Tanks	99
6.5.	Flammenlänge	101
7.	Brandversuche an Modelltanks mit und ohne Wasserkühlung des Tankmantels	105
7.1.	Wahl der Tankabmessungen	105
7.2.	Brennstoff	106
7.3.	Versuchsaufbau	107
7.4.	Versuchsbedingungen	111
7.5.	Meßergebnisse	114
7.5.1.	Abbrandgeschwindigkeit	114
7.5.2.	Temperaturen im Tankinneren und in der Tankwand	114
7.5.3.	Durch Kühlung abgeführter Wärmestrom	116
7.5.4.	Temperaturverlauf in der Flüssigkeit	116
7.6.	Folgerungen aus den Versuchen	121
7.6.1.	Flammentemperatur	121
7.6.2.	Temperatur im Tankraum zwischen Flamme und Flüssigkeit	122
7.6.3.	Temperatur der Tankwand	122
7.6.4.	Eindringtiefe der Flamme in den Tank	124
7.6.5.	Kühlung der Tankwand	128
8.	Zusammenfassung	129
9.	Literaturverzeichnis	132
10.	Anhang	136

Verwendete Formelzeichen

$Ar$	=	Archimedes - Zahl ( $Ar = \frac{1}{Fr} \cdot \frac{\rho_U - \rho_F}{\rho_F}$ )
$a_K$	=	erweiterte Temperaturleitzahl, beinhaltet noch Konvektionsanteil
$c$	=	spez. Wärme des Brennstoffes
$c_B$	=	Massenkonzentration des Brennstoffes für stöch. Mischung
$C_S$	=	Strahlungszahl des schwarzen Körpers
$d$	=	Tankinnendurchmesser
$F_B$	=	Querschnittsfläche des Tanks = Fläche des Flüssigkeitsspiegels
$F_F$	=	Fläche des Flammenbodens von der Flüssigkeit her gesehen
$Fr$	=	Froude-Zahl ( $Fr = u^2/g d$ )
$F_W$	=	Innenfläche der Tankwand zwischen Flammenboden und Flüssigkeit
$F'_W$	=	Querschnittsfläche des Tankmantels
$g$	=	Erdbeschleunigung
$h$	=	Koordinate in Richtung der Tankachse, Ursprung im Flüssigkeitsspiegel, Richtung zur Tanköffnung positiv, Richtung zum Tankboden negativ
$h_{FB}$	=	Abstand zwischen Flammenboden und Brennstoffspiegel
$h_{MB}$	=	Abstand zwischen Tankmündung und Brennstoffspiegel
$H$	=	Tankhöhe
$H_u$	=	Heizwert des Brennstoffes
$K_{max}$	=	Max. Abnahme der Abbrandgeschwindigkeit durch Kühlung der Tankwand
$L$	=	Flammenlänge
$m$	=	Verhältnis von $W$ zu $V$ ( $W = m \cdot V$ )

- $\dot{m}$  = Massenstrom des Brennstoffdampfes
- $\dot{Q}_a$  = von der Flüssigkeit aufgenommener Wärmestrom
- $\dot{Q}_{FB}$  = Strahlungswärmestrom vom Flammenboden zur Flüssigkeit
- $\dot{Q}_K$  = Wärmestrom zur Flüssigkeit durch Konvektion
- $\dot{Q}_W$  = Wärmestrom in der Tankwand
- $\dot{Q}_{WB}$  = Strahlungswärmestrom von der Tankwand zur Flüssigkeit
- $\dot{Q}'_{WB}$  = Wärmestrom zur Flüssigkeit durch Wärmeübergang von der Tankwand
- $\dot{Q}_Z$  = Gesamtwärmestrom zur Flüssigkeit
- $r$  = Verdampfungswärme der Flüssigkeit
- $s$  = Wanddicke des Tanks
- $t, T$  = Temperatur
- $t_B, T_B$  = Temperatur der Brennstoffoberfläche während des Brandes
- $t_F, T_F$  = mittlere Flammentemperatur
- $t_S, T_S$  = oberer Siedepunkt der Flüssigkeit
- $t_U, T_U$  = Umgebungstemperatur = Temp. der Flüssigkeit vor der Zündung
- $t_W, T_W$  = Temp. der Tankwand zwischen Flammenboden und Flüssigkeit
- $u$  = mittlere Brennstoffdampfgeschwindigkeit resultierend aus  $v_a$
- $v_a$  = Abbrandgeschwindigkeit
- $v_{a\infty}$  =  $v_a$  bei optisch dichten Flammen
- $v'_a$  = Anteil an der Abbrandgeschwindigkeit  $v_a$  durch Wärmeleitung aus der Tankwand
- $V$  = Substitution für  $\epsilon_F \cdot \epsilon_B \cdot C_S \left[ \left( \frac{T_F}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right]$

- $V_{ges}$  = Gesamtvolumen der Lagerbehälter einer Raffinerie
- $W$  = Substitution für  $\epsilon_W \cdot \epsilon_B \cdot c_S \left[ \left( \frac{T_W}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right]$
- $x$  = Koordinate in Richtung Tankachse, Ursprung in Tankmündung
- $y$  = laufende Koordinate senkrecht zur Strömungsrichtung
- $\alpha$  = Wärmeübergangszahl
- $\epsilon_B$  = Absorptionszahl der Flüssigkeit
- $\epsilon_F$  = Emissionszahl des Flammenbodens
- $\epsilon_{ges}$  = Substitution für  $\epsilon_F \cdot \epsilon_B$  bzw.  $\epsilon_W \cdot \epsilon_B$
- $\epsilon_W$  = Emissionszahl der Tankwand zwischen Flammenboden und Flüssigkeit
- $\lambda_W$  = Wärmeleitfähigkeit des Tankmantels
- $\rho_B$  = Dichte des Brennstoffes
- $\rho_F$  = Dichte der Gase in der Flammenzone
- $\rho_U$  = Dichte der Umgebungsluft
- $\tau$  = Zeit
- $\bar{\varphi}$  = Winkelverhältnis
- $\bar{\varphi}_{FB}$  = Winkelverhältnis des Flammenbodens in Bezug auf die Flüssigkeit
- $\bar{\varphi}_{ges}$  = Gesamtwinkelverhältnis von Flammenboden und Tankwand in Bezug auf die Flüssigkeit
- $\bar{\varphi}_{WB}$  = Winkelverhältnis der Tankwand der Höhe  $h_{FB}$  in Bezug auf die Flüssigkeit
- $\bar{\varphi}'_{WB}$  = Winkelverhältnis eines Flächenteilchens  $dF_W$  der Tankwand in Bezug auf die Flüssigkeit
- $B$  = Index für Flüssigkeit (Brennstoff)
- $F$  = Index für Flamme
- $M$  = Index für Tankmündung
- $W$  = Index für Tankwand

## 1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT

Die Lagerung von Erdölprodukten in Tanks stellt wegen der Häufung größter Energiemengen auf begrenztem Raum hohe sicherheitstechnische Anforderungen [1].

Es hat daher nicht an Versuchen gefehlt, einen Einblick in das Geschehen bei Flüssigkeitsbränden in Tanks zu gewinnen. Zu nennen sind einmal die Löschversuche an brennenden Tanks. Sie dienen fast ausschließlich der Erprobung und Beurteilung verschiedener Löschtechniken und -taktiken. Vielfach beträgt die Brenndauer nur wenige Minuten. Ein weiteres Untersuchungsgebiet sind die Brände von Flüssigkeitslachen. Sie werden allgemein durch sehr niedrige, stets bis zum Rande gefüllte Tanks simuliert. Diese Versuche geben Aufschluß über die möglichen Gefahren beim Auslaufen brennbarer Flüssigkeiten, z.B. bei Unfällen von Flugzeugen, Raketen oder Tankwagen.

Eine Aussage über den gesamten Brandablauf in einem Großtank können Löschversuche und Brände von Flüssigkeitslachen nicht geben. Lediglich einzelne Ergebnisse wie Flammentemperatur, Flammenlänge, Emissionsgrad der Flamme u.a. sind übertragbar.

Brände in realen Tanks sind dadurch ausgezeichnet, daß der Flüssigkeitsspiegel im Laufe des Brandes absinkt. Damit können sich für das Brandgeschehen völlig neue Verhältnisse ergeben.

Modellversuche an Kleintanks von 4 mm bis etwa 2 m Durchmesser können - soweit sie die Frage nach dem gesamten Brandablauf überhaupt behandeln - noch nicht auf Großtanks übertragen werden. Bei diesen Kleintanks werden Vorgänge im Wärmetransportmechanismus von der Flamme in die Flüssigkeit wichtig, die bei Großtanks völlig vernachlässigt werden können.

Bei Versuchen an realen Tanks beschränken die anfallenden Kosten, die schnell anwachsenden Schwierigkeiten der Versuchsdurchführung sowie die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen Durchmesser und Tiefe der Versuchsbehälter erheblich. Die in

anderen Zweigen der Technik üblichen Messungen an im Betrieb befindlichen Anlagen sind ebenfalls nicht möglich. Untersuchungen des Brandverlaufes sind durchweg mit der Zerstörung des Versuchsobjektes verbunden. Alle diese Gründe führen dazu, daß Meßergebnisse von Großbränden in ausreichender Zahl nicht zu erwarten sind. Die hier gestellte Frage nach dem Brandverlauf von Großtanks unter Berücksichtigung des absinkenden Flüssigkeitsspiegels wird somit durch Versuche in absehbarer Zukunft nicht geklärt werden können.

Ein Tankbrand gehört zu den sich selbst unterhaltenden Bränden. Der Wärmerückfluß von der Flamme in die gelagerte Flüssigkeit bestimmt zusammen mit der Wärmeaufnahme der Flüssigkeit deren Verdampfungsrate und damit den aufsteigenden Dampfstrom. Die zeitliche Absenkung des Flüssigkeitsspiegels durch die Verdampfung wird als Abbrandgeschwindigkeit bezeichnet. Sie nimmt eine Schlüsselstellung bei der Beschreibung eines Tankbrandes ein.

Bild 1.-1 zeigt die 4 Komponenten des Wärmeflusses von der Flamme in die Flüssigkeit. Es sind dies Strahlungsaustausch zwischen Flamme und Brennstoff, Strahlungsaustausch zwischen der Tankwand über der Flüssigkeit und dem Brennstoff, Wärmezufuhr durch Gaskonvektion und durch Wärmeübergang von der heißeren Tankwand an die Flüssigkeit im Bereich unterhalb des Flüssigkeitsspiegels. Der jeweilige Anteil der Komponenten am Gesamtwärmestrom hängt von der Flüssigkeit und den Tankdimensionen ab.

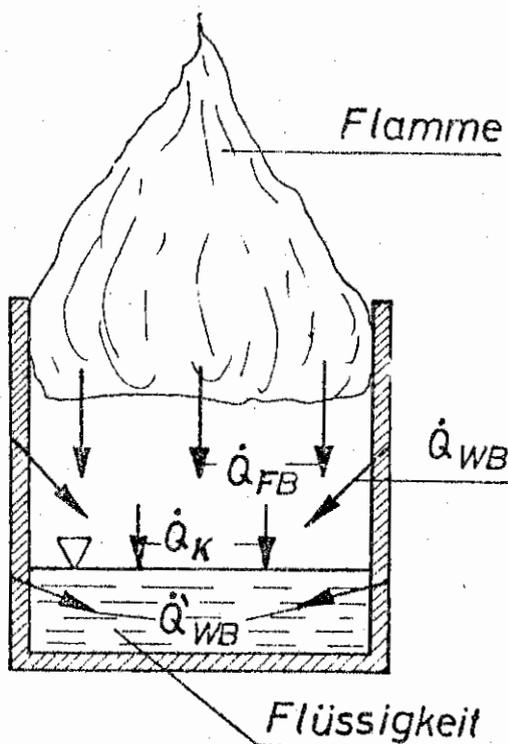


Bild 1.-1: Aufteilung des Wärmerückstromes von der Flamme in die Flüssigkeit in 4 Komponenten.

$\dot{Q}_{FB}$  = Strahlung von der Flamme zur Flüssigkeit.

$\dot{Q}_{WB}$  = Strahlung von der Tankwand zur Flüssigkeit.

$\dot{Q}_K$  = Wärmetransport durch Gaskonvektion.

$\dot{Q}_{WB}$  = Wärmetransport von der Tankwand an die Flüssigkeit im Bereich dicht unterhalb des Flüssigkeitsspiegels.

Die Wärmebilanz und damit die Abbrandrate wird durch folgende Größen bestimmt: Temperatur und Emissionsgrad der Flamme, optische Dichte der Flamme, Form und Lage der unteren Flammenbegrenzung in Bezug auf den Flüssigkeitsspiegel, Temperatur und Emissionsgrad der Tankwand über der Flüssigkeit, Temperaturverteilung über und unter dem Flüssigkeitsspiegel, Temperaturkurve in der Tankwand unter dem Flüssigkeitsspiegel, Wärmetransport und Wärmezonenbildung in der Flüssigkeit, Verdampfungswärme, spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit, Siedekurve und Absorptionsvermögen der Flüssigkeit, Lage des Flüssigkeitsspiegels im Tank und Abmessungen des Tanks.

In einer Literaturübersicht wird gezeigt, welche dieser Größen bekannt sind und welche Bedeutung für das Brandgeschehen ihnen im einzelnen beigemessen wird.

Anschließend folgen Versuche über die Wärmezufuhr von der Tankwand unterhalb des Flüssigkeitsspiegels und über die Lage und Form der unteren Flammenbegrenzung.

Für die Wärmezufuhr aus der Tankwand liegt in der Literatur nur die Abschätzung vor, daß sie bei größeren Tanks vernachlässigbar ist. Die Versuche werden den zulässigen Bereich dieser Annahme aufzeigen.

Lage und Form der unteren Flammenbegrenzung in Bezug auf den Flüssigkeitsspiegel beeinflussen wesentlich die Strahlung von der Flamme und der Tankwand in die Flüssigkeit. Hierzu gibt es keine Literaturangaben. Die Modellversuche zeigen erste Gesetzmäßigkeiten auf und erlauben gewisse Annahmen für das auf den Literaturangaben und Versuchen des Verfassers aufbauende Rechenmodell eines Tankbrandes.

Das Rechenmodell entsteht aus einer Wärmebilanz zwischen Flamme und Flüssigkeit. Es zeigt die Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit von der Lage des Flüssigkeitsspiegels im Tank und von der Branddauer. Für zahlenmäßig nicht nachgewiesene Größen läßt das Rechenmodell eine Abschätzung ihres Einflusses zu und zeigt damit die Richtung weiterer Arbeiten.

Obwohl die Flammenlänge für diese Arbeit nur soweit Bedeutung hat, als die optische Dichte der Flamme, vom Flüssigkeitsspiegel her gesehen, an eine Mindestflammenlänge gebunden ist, wird sie doch kurz abgehandelt. Aus den Literaturangaben und Modellversuchen kann eine Abhängigkeit der Flammenlänge von der Froude-Zahl aufgezeigt werden, die einen weiten Durchmesserbereich umfaßt. Damit ist eine einfache Berechnung der Flammenlänge brennender Tanks möglich. Ihre Bedeutung gewinnen diese Angaben über die Flammenlänge durch die von den Flammenabmessungen abhängige Wärmebelastung in der Umgebung eines brennenden Tanks.

## 2. LITERATURÜBERSICHT

### 2.1. ABBRANDGESCHWINDIGKEIT, WÄRMEZONE

Bei gefülltem Tank liegt die Abbrandgeschwindigkeit von Erdölprodukten in der Größenordnung von 1 - 4 mm/min [2]. BURGESS u.a. [3,4] führen die Abbrandrate auf die bei der Verbrennung in Luft freiwerdende und die für Verdampfung und Erwärmung der Flüssigkeit erforderliche Wärmemenge zurück. Sie argumentieren, daß der Prozentsatz der zur Flüssigkeitsoberfläche gestrahlten Wärme etwa konstant sei. Die Abbrandrate  $v_{\infty}$  ist damit proportional dem Quotienten der genannten Wärmemengen. Bild 2.-1 zeigt das experimentelle Ergebnis der Autoren, das sie zahlenmäßig mit

$$v_{\infty} = 0,0076 \frac{H_u}{r+c(t_s-t_U)} \quad [\text{cm/min}] \quad (2.-1)$$

angeben.

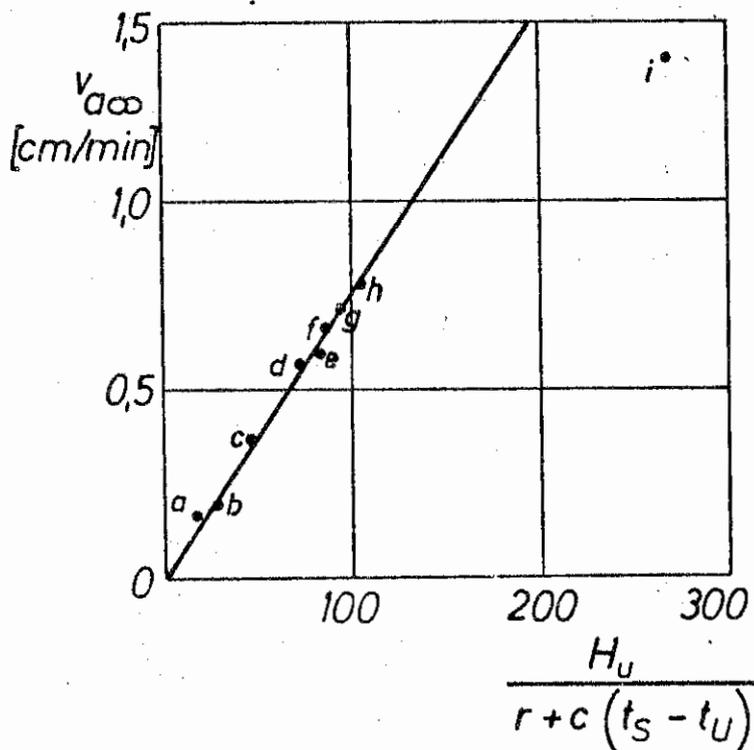


Bild 2.-1: Abbrandrate  $v_{\infty}$  verschiedener Flüssigkeiten als Funktion des Heizwertes und der zum Verdampfen notwendigen Wärme [3,4].

a = Methanol, b = Diäthylen-triamin, c = unsym. Dimethylhydrazin, d = Xylol, e = Benzol, f = flüss. Erdgas, g = Hexan, h = Butan, i = flüss. Wasserstoff.

SPALDING [5] führt die Abbrandrate auf konvektiven Wärmetransport durch die Dampfphase zwischen Flüssigkeit und Flamme zurück. SPALDING bezieht sich dabei auf eigene Untersuchungen [6], nach denen sowohl die Lösungen der Grenzschichtgleichungen für laminare Verbrennung von einer vertikalen flachen Platte als auch die experimentellen Werte für die Verbrennung unter laminaren Bedingungen von einer Kugeloberfläche gemeinsam angegeben werden können. Die Gleichung führt SPALDING vom laminaren in den turbulenten Fall über und paßt sie damit an die Verhältnisse von Bränden größerer Tanks an. Durch Einsetzen charakteristischer Stoffwerte für das Verbrennen von Kohlenwasserstoffen in Luft erhält er

$$v_{\infty} = 0,003 \frac{H_u}{r + c(t_s - t_u)} \quad [\text{cm/min}] \quad (2.-2)$$

Dieser Ausdruck entspricht Gleichung 2.-1.

Wichtigste Folgerung aus beiden Gleichungen ist die Durchmesserunabhängigkeit der Abbrandrate größerer Tanks. Zu diesem Ergebnis kommt auch HOTTEL [7] durch eine Analyse des Wärmestromes in die Flüssigkeit.

Den typischen Verlauf der Abbrandgeschwindigkeit für Durchmesser unterhalb des Bereiches durchmesserunabhängiger Abbrandgeschwindigkeit zeigt Bild 2.-2. Die Grenze liegt dort bei etwa 1 m Tankdurchmesser. Auf den gesamten Kurvenverlauf wird in Abschnitt 2.3 bei der Besprechung der Wärmetransportvorgänge eingegangen.

Obwohl die Autoren [3, 4, 5, 6, 7, 8] es nicht ausdrücklich betonen, können die Folgerungen aus Gleichung 2.-1 und 2.-2 sowie Bild 2.-2 nur für gefüllte Tanks bzw. Flüssigkeitslachen gelten. Wie die Bilder 2.-3 und 2.-4 sowie Tafel 2.-1 zeigen, fällt die Abbrandgeschwindigkeit mit absinkendem Flüssigkeitsspiegel. Abschätzungen über den Verlauf der Abbrandgeschwindigkeit mit absinkender Flüssigkeitsoberfläche liegen nicht vor.

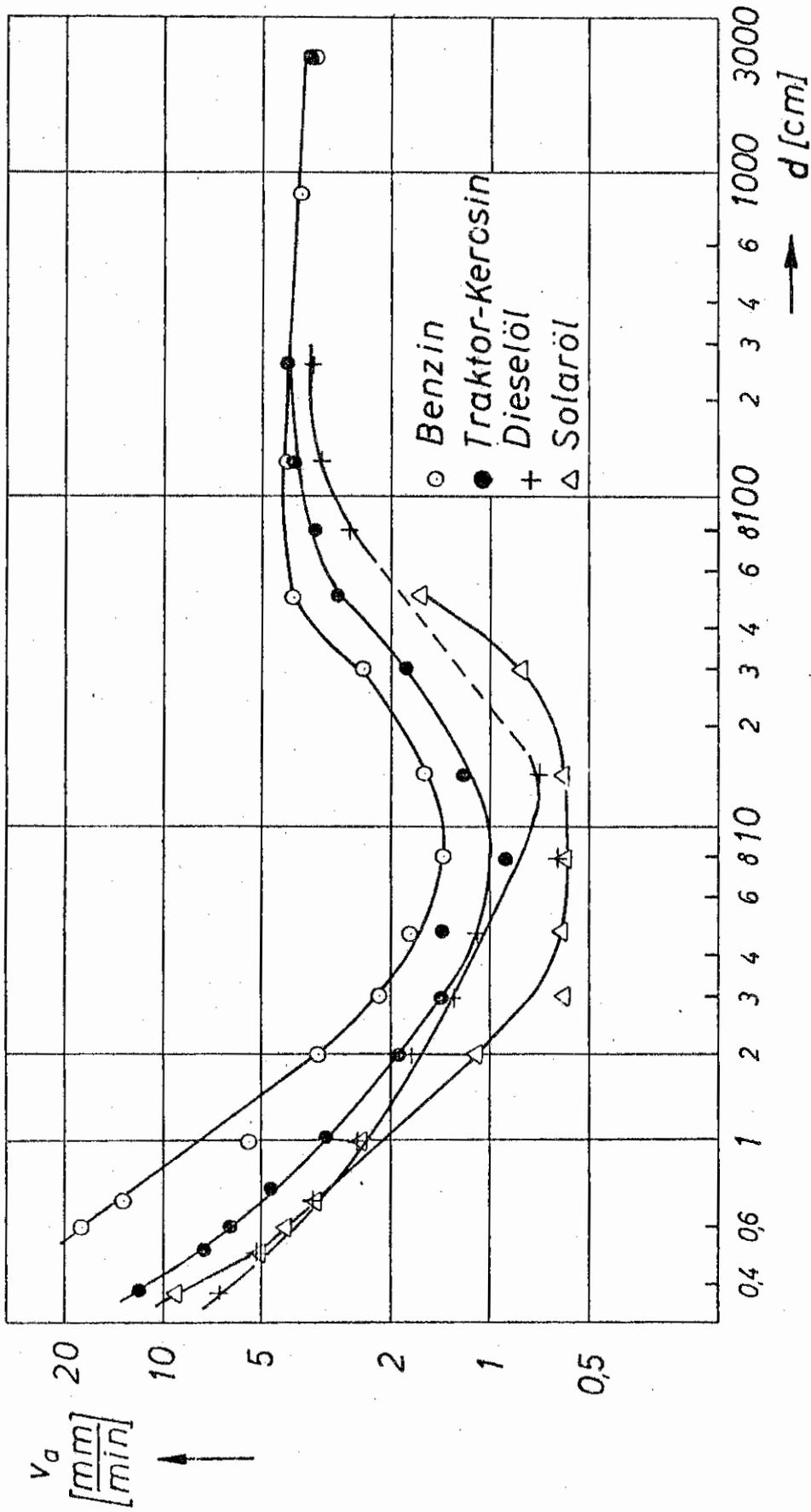


Bild 2.-2: Abbrandgeschwindigkeit verschiedener Erdölprodukte bei Tankdurchmessern von 0,37 bis 2290 cm [8].

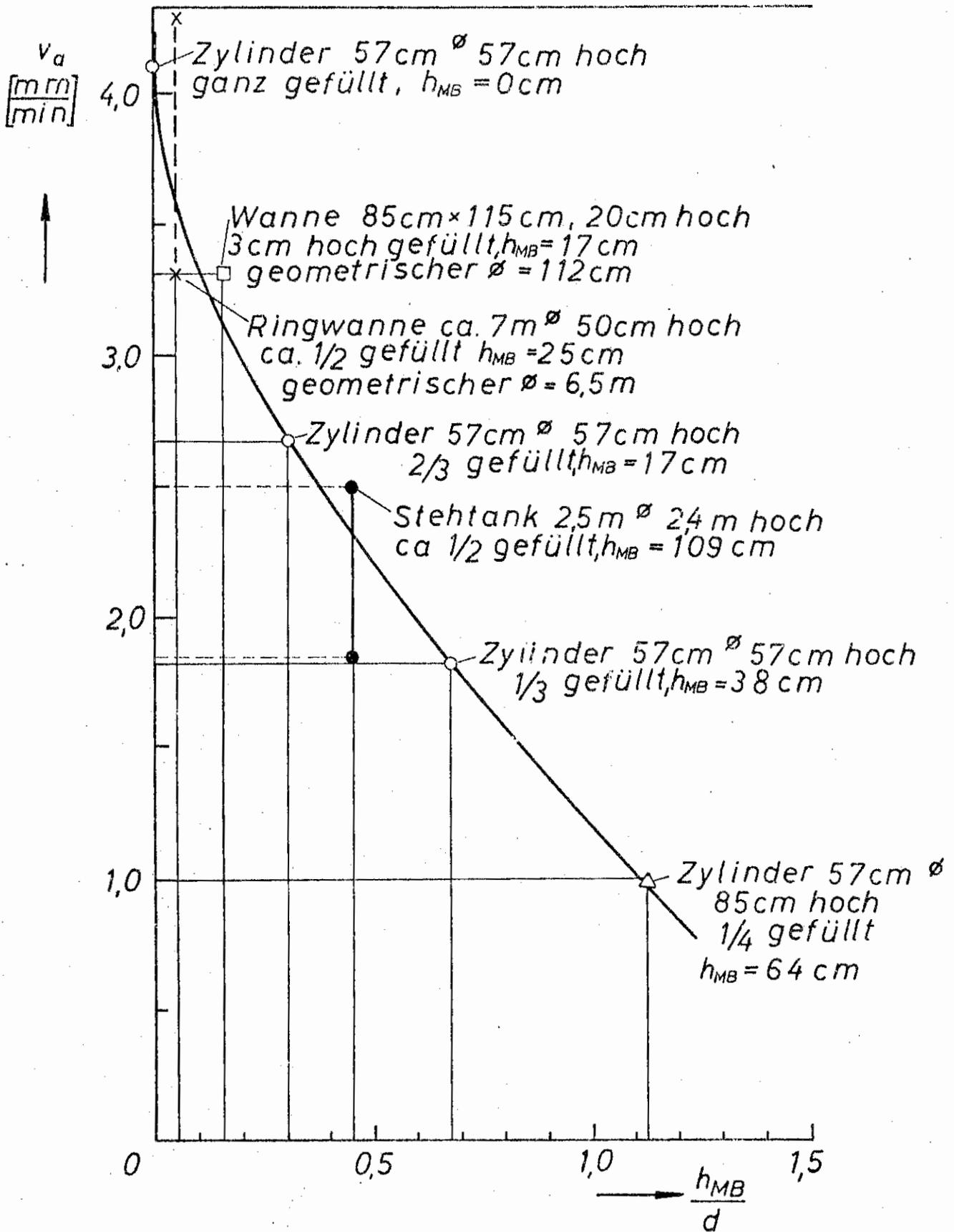


Bild 2.-3: Abbrandgeschwindigkeit von Benzin in verschiedenen großen Behältern als Funktion von  $\frac{h_{MB}}{d}$ .  $h_{MB}$  = Abstand Tankmündung - Flüssigkeitsspiegel,  $d$  = Tankdurchmesser [9].

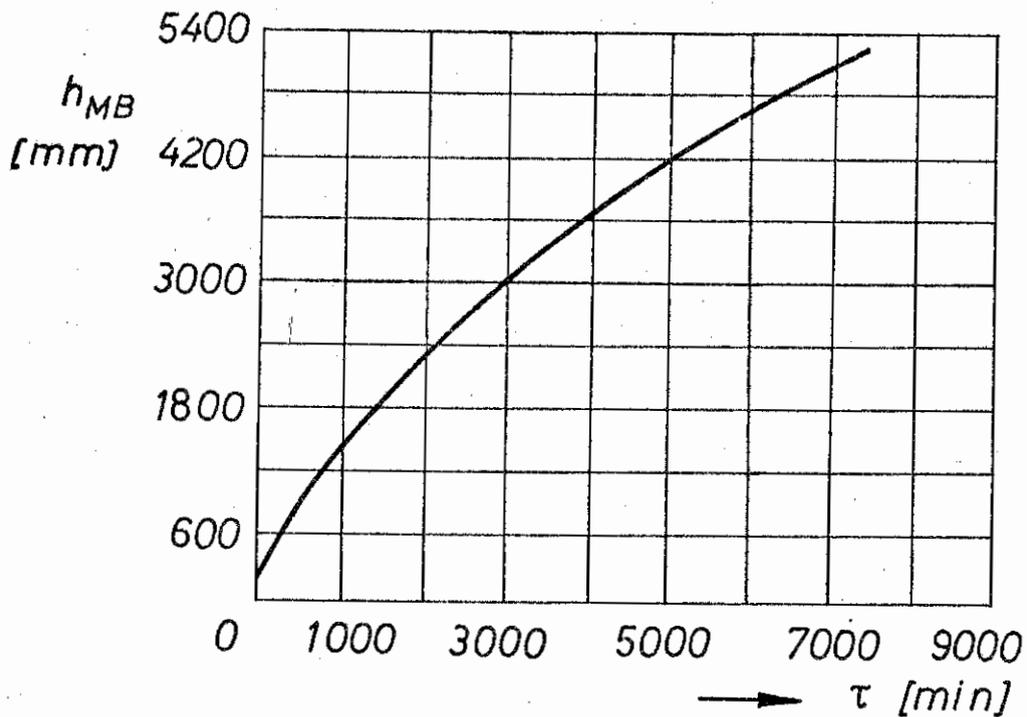


Bild 2.-4: Absinken des Flüssigkeitsspiegels von Dieselöl in einem Tank von 95 cm Durchmesser im Laufe des Brandes.  $h_{MB}$  = Abstand Tankmündung - Flüssigkeitsspiegel. Nach [10].

Tafel 2.-1. Abnahme der Abbrandgeschwindigkeit von Benzin bei wachsendem Abstand der Brennstoffoberfläche von der oberen Tanköffnung [11].

Tankdurchmesser [cm]	120				
Abstand des Brennstoffspiegels vom Tankrand [cm]	11,5	36	81	97	149
Abbrandgeschwindigkeit [cm/min]	0,472	0,375	0,20	0,154	0,148

Örtliche Unterschiede in der Verdampfung der Flüssigkeit werden nach AKITA und YUMOTO [12] durch radiale Strömungen ausgeglichen.

Je nach der Temperaturkurve, die sich unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche einstellt, unterscheidet man wärmezonebildende und nicht wärmezonebildende Brennstoffe. Den typischen Temperaturverlauf für Brennstoffe ohne Wärmezone zeigen die Bilder 2.-5 bis 2.-7. Gemessen wurde in einem mit Dieselöl gefüllten Tank von 560 mm Durchmesser und 1000 mm Höhe [2]. In Längsrichtung des Tanks waren Thermoelemente mit 2,54 cm Abstand angebracht. Der Brand wurde nach 61 Minuten gelöscht. Man erkennt aus Bild 2.-5, daß eine merkliche Erwärmung des Öles nicht tiefer als etwa 5 cm unter die Oberfläche drang.

Bild 2.-6 zeigt die Temperaturverteilung unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche in der Gleichgewichtsperiode (nach etwa 45 min Brennzeit).

Die mittlere Temperaturanzeige beim Durchgang der Flüssigkeitsoberfläche durch die Lötperle jedes Thermoelementes war für das verwendete Dieselöl  $345^{\circ}\text{C}$ . Die ASTM Destillation einer Ölprobe ergab 97 %iges Abdestillieren bei dieser Temperatur. Tafel 2.-2 zeigt Ergebnisse von Destillationsproben bei weiteren Brennstoffen.

Die Flüssigkeitsoberfläche hat daher bei Brennstoffen ohne Wärmezone die obere Siedetemperatur des Produktes. Bei keinem anderen geprüften Öl dieser Klasse war das Eindringen der Wärme in die Flüssigkeit größer als bei Dieselöl. Der untere Siedepunkt des verwendeten Dieselöls liegt nach Bild 2.-6 nur etwa 1,5 cm unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche.

In Bild 2.-7 ist die Lage einer Isothermenebene von  $38^{\circ}\text{C}$  (stellvertretend für merkbare Erwärmung) während der Brennzeit für verschiedene Erdölprodukte aufgezeigt. Die Kurven streben einer Gleichgewichtslage zu oder haben diese schon

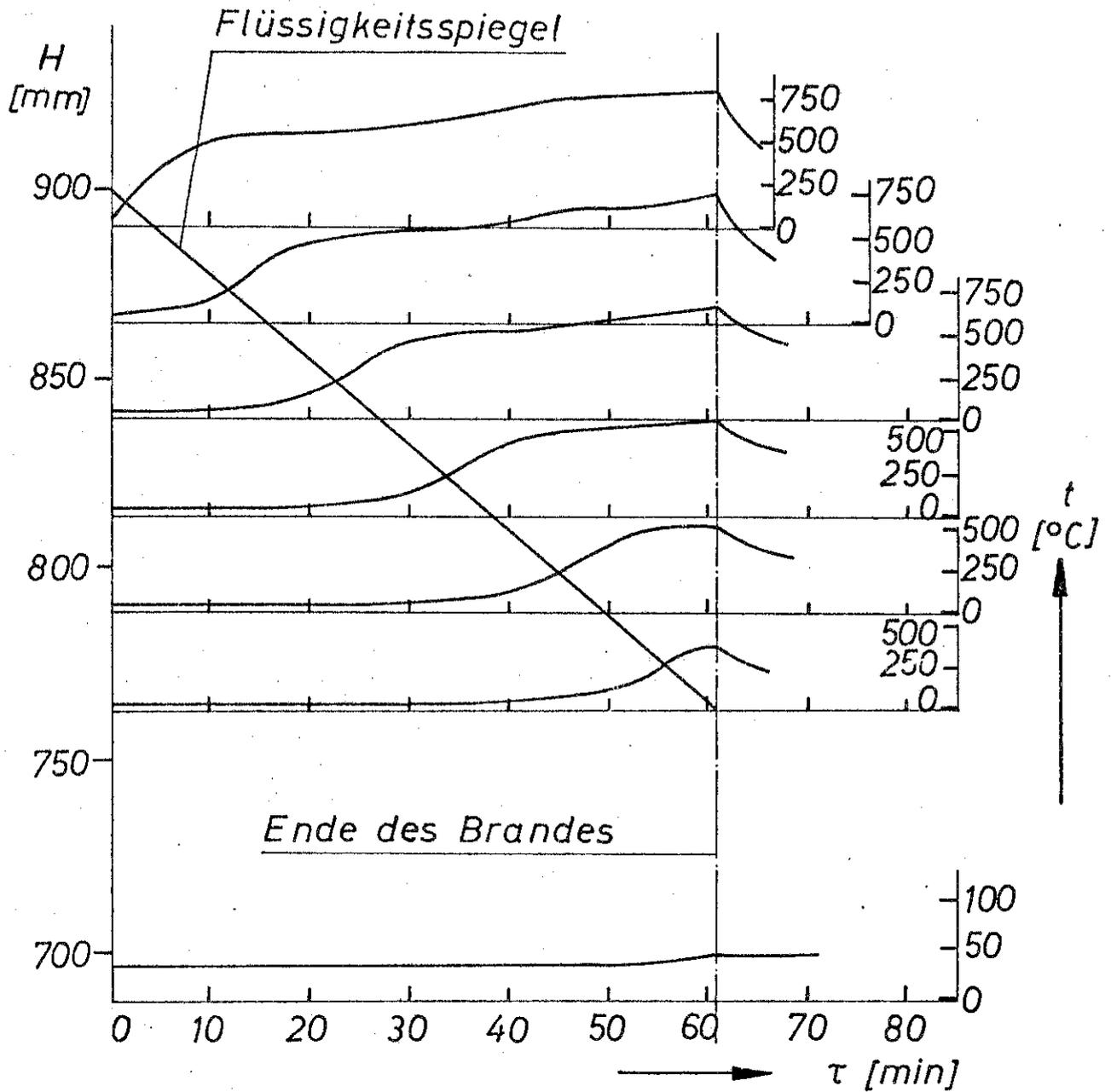


Bild 2.-5: Temperatur unter- und oberhalb des Flüssigkeitsspiegels beim Abbrand von Dieseltreibstoff als Funktion der Branddauer [ 2 ].

Tafel 2.-2. Mittlere Oberflächentemperatur und ASTM-Destillationswerte bei Ölen ohne Wärmezone [2]

Qualität	Mittlere Oberflächentemp. [°C]	Abdestilliert bei mittl. Oberflächentemperatur [%]
Benzol	93	98
Test-Benzin	206	93
Motoren-Petroleum	321	100
Leucht-Petroleum	326	100
Dieselöl (1)	366	100
Dieselöl (2)	354	97
Dieselöl (3)	358	98

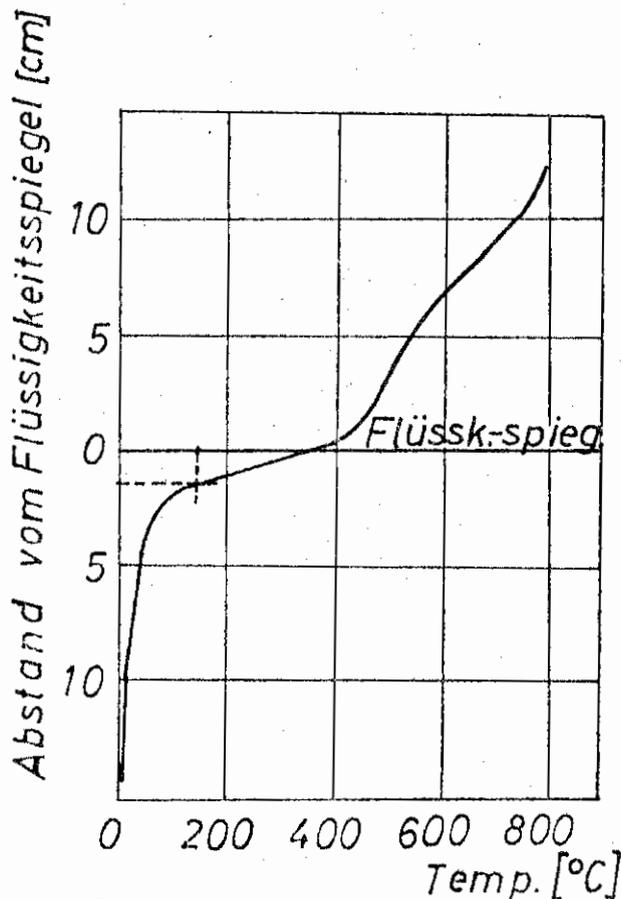


Bild 2.-6: Temperatur unter- und oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche von Dieselöl nach etwa 45 min Brenndauer. Unterer Siedepunkt von 150 ° C liegt nur ca. 1,5 cm unterhalb des Flüssigkeitsspiegels (gestrichelt). Nach [2].

erreicht. Nahezu konstanter Abstand zwischen Oberfläche und 38 °C-Ebene ist nach 10 bis 20 Minuten Brennzeit erreicht. Bei konstantem Abstand bleibt die in der Flüssigkeit gespeicherte Wärme konstant.

Es wird gefolgert, daß Flüssigkeiten ohne Wärmezone Schicht für Schicht ohne Rückstand verbrennen. Entsprechende Temperaturverteilungen geben auch BLINOV und CHUDJAKOV [10] an.

Zu den Flüssigkeiten, die keine Wärmezone bilden, gehören alle Einkomponentenbrennstoffe. Wie anschließend gezeigt wird, ist die Bildung einer Wärmezone an einen weiten Siedebereich der Flüssigkeit gebunden. Eine Umkehrung dieses Schlusses ist nicht zulässig. Ferner gehören dazu nach HALL [13] Kerosin und Benzin, nach BURGOYNE und KATAN [2] Brennöl, Dieselöl, Marinedieselöl, Transformatorenöl und Schmieröl, nach BLINOV und CHUDJAKOV [10] Traktor-Kerosin, Dieselöl, Solaröl, Transformatorenöl sowie Petroleum und Benzin in kleinen Gefäßen.

Bei der Berechnung der Temperaturkurve unterhalb der Oberfläche mit Hilfe der Fourier-Gleichung für Wärmeleitung muß ein von BLINOV und CHUDJAKOV [10] experimentell nachgewiesener Konvektionsanteil am Aufbau des Temperaturfeldes berücksichtigt werden. Für eine mit  $v_a$  absinkende Flüssigkeitsoberfläche ergibt sich dann

$$t-t_U = (t_S - t_U) \exp \frac{v_a h}{\alpha_K} \quad (2.-3)$$

$\alpha_K$  ist für jeden Brennstoff experimentell zu ermitteln. Erste Werte gibt [10]. Die durch Gleichung 2.-3 dargestellte Temperaturkurve ergibt sich nach Erreichen des Wärmegleichgewichtes unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche.

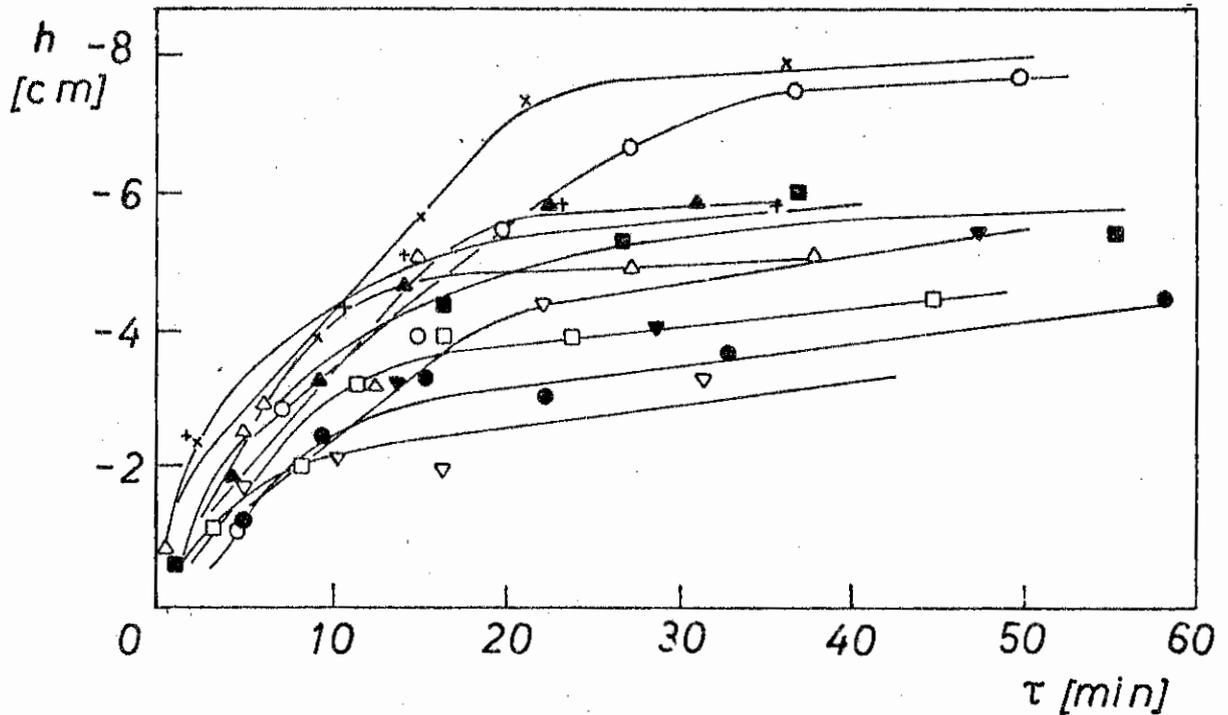


Bild 2.-7: Eindringen der Temperatur 38 ° C (stellvertretend für merkbare Erwärmung) während der Brennzeit unter die Oberfläche verschiedener Erdölprodukte. Nach [27].

Zeichenerklärung

- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| ▼ Schmieröl (grade 8) | □ Test-Benzin          |
| ● Leucht-Petroleum    | + Motorenpetroleum     |
| ▲ Dieselöl            | x Schmieröl (grade 3)  |
| △ Dieselöl            | ■ Schmieröl (grade 20) |
| ○ Dieselöl            | ▽ Benzol               |

Brennstoffe mit Wärmezonenebildung weisen unter der Oberfläche eine Zone gleicher Temperatur auf. Der Übergang zu der vom Brand unbeeinflussten Flüssigkeit findet in einer relativ dünnen Übergangszone statt. Die Wärmezonentemperatur liegt unter dem oberen Siedepunkt des Produktes. Allerdings gibt es Anzeichen für einen steilen Temperaturgradienten unterhalb des Flüssigkeitsspiegels [2], so daß dieser sich auf der Temperatur des oberen Siedepunktes befinden könnte. Destillationsproben zeigten aber, daß auch dann nur ein geringer Bruchteil des Wärmerückstroms zur Verdampfung des Wärmezonenproduktes an der Flüssigkeitsoberfläche dient. Die Schichtdicke der Wärmezone nimmt im Laufe des Brandes ständig zu und kann nach längerer Branddauer die gesamte noch gelagerte Flüssigkeit umfassen.

Erreicht die Wärmezone den Tankboden, kommt es zum Überkochen des Tankes. Dies wird nach HALL [13] auf das plötzliche Verdampfen einer Wasserschicht am Tankboden zurückgeführt. BLINOV und CHUDJAKOV [10] und BURGOYNE und KATAN [2] weisen zusätzlich auf Siedeverzüge in der Wärmezone hin.

Die Geschwindigkeit, mit der die untere Begrenzung der Wärmezone in die unbeeinflusste Flüssigkeit vordringt, ist nach einer gewissen Anlaufzeit im wesentlichen konstant. Sie hängt von der Flüssigkeit ab und muß experimentell bestimmt werden. Ein Wärmegleichgewicht wie bei Brennstoffen ohne Wärmezone stellt sich nicht ein.

Die Wärmezone wird auf die fraktionierte Verdampfung der Erdölprodukte mit weitem Siedebereich zurückgeführt [2, 10, 13, 14]. In der Wärmezone sammeln sich die Fraktionen mit hohem Siedebereich an. In der Übergangsschicht zwischen Wärmezone und der unbeeinflussten Flüssigkeit findet infolge des großen Temperaturunterschiedes eine Verdampfung der leichtsiedenden Bestandteile statt. Diese steigen als Dampfblasen durch die

Wärmezone an die Flüssigkeitsoberfläche. Dabei bewirken sie eine starke Durchwirbelung und Mischung des Wärmezoneninhaltes. Dieser Rühreffekt sorgt für die gleichmäßige Temperatur der Wärmezone und den Wärmetransport von der Oberfläche in die Übergangsschicht. Bild 2.-8 zeigt das Vordringen der Wärmezone in einem brennenden Heizöltank; Bild 2.-9 den Temperaturverlauf nahe der Oberfläche von brennendem Rohöl nach 45 Minuten Brennzeit [2].

Eine Wärmezone bilden alle Erdölprodukte mit weitem Siedebereich, wie z.B. Rohöl, schwere Heizöle und nach [2] auch Motorenbenzin.

## 2.2. VERBRENNUNGSVERLAUF. TEMPERATUR UND EMISSIONSGRAD DER FLAMME

Für die aus einem Tank brennende Diffusionsflamme liegen Messungen über Luftansaugung, Konzentrations- und Temperaturverlauf nicht vor. Verantwortlich dafür sind einmal die übergroßen Abmessungen von Tanks im Vergleich zu den Modellen von Freistrahlfammen und die damit verbundenen Schwierigkeiten der Versuchsdurchführung, ferner die besonderen Eigenschaften der Flammen aus Tanks, wie z.B. Rußbildung und äußerst geringe Gasgeschwindigkeit.

Durch einfachere Messungen zu beschaffendes Zahlenmaterial liegt dagegen vor. Dies gilt vor allem für die Flammenlänge und die über die gesamte Flamme zeitlich und örtlich gemittelte Temperatur und Emission.

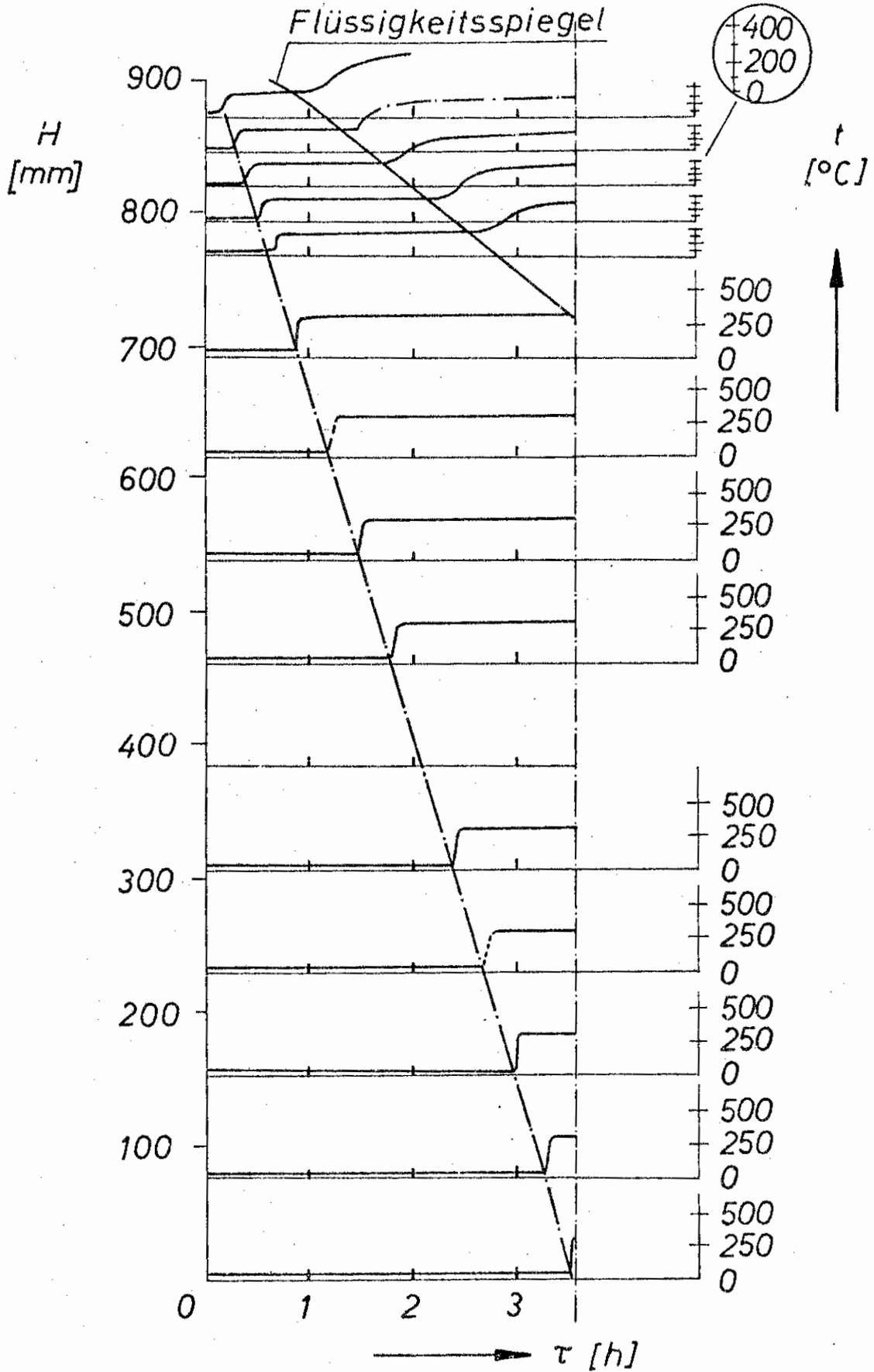


Bild 2.-8: Wärmezonbildung beim Abbrand von Heizöl. Die strichpunktierte Linie gibt das Vordringen der Wärmezone an. Temperaturangaben sind auf die Achse der Thermoelemente bezogen. Nach 3 1/2 h Brennzeit erreichte die Wärmezone den Tankboden und der Tank kochte über [2].

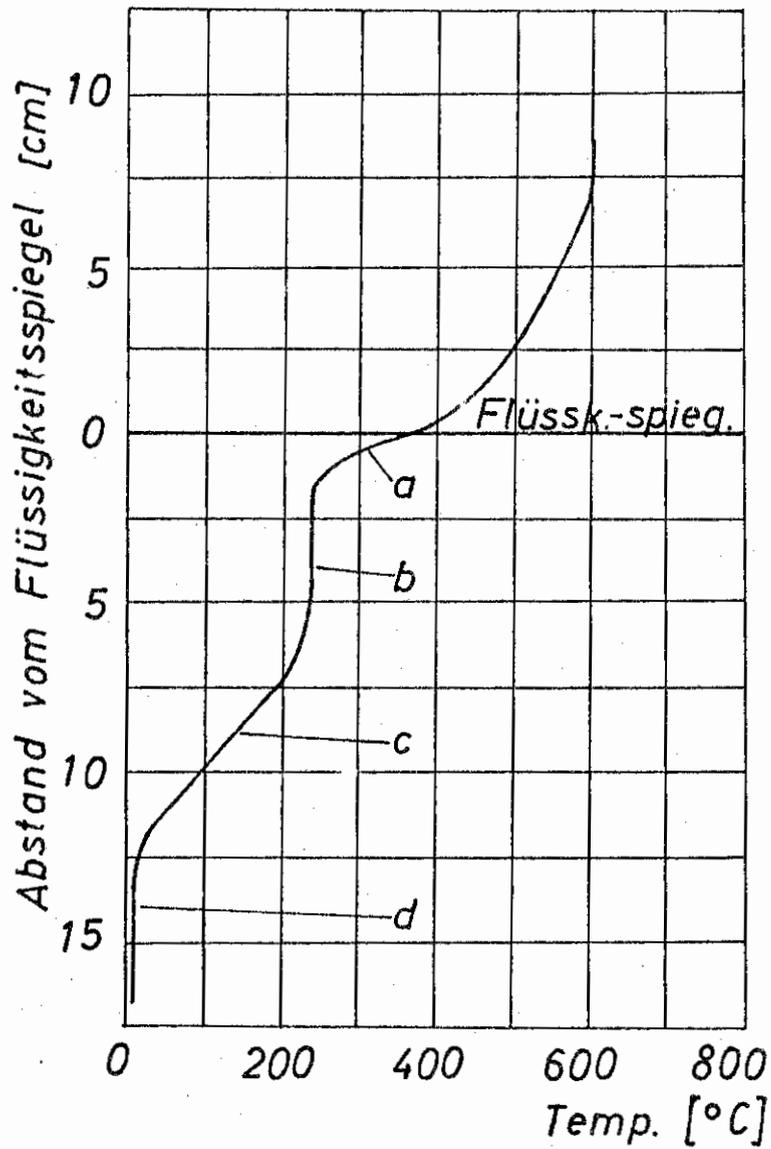


Bild 2.-9: Temperaturverlauf ober- und unterhalb der Oberfläche von brennendem Rohöl nach 45 min Brennzeit [2].

- a = steiler Temperaturgradient an der Flüssigkeitsoberfläche.
- b = Wärmezone mit konstanter Öltemperatur.
- c = Übergangsgebiet Wärmezone - unbeeinflusste Flüssigkeit.
- d = unbeeinflusster Brennstoff auf Umgebungstemperatur.

Zum Verbrennungsverlauf wird lediglich das starke Pulsieren der Flamme (Ballenbildung) [9, 10, 15] und das Eindringen der Flamme in den Tankraum zwischen Mündung und Flüssigkeit erwähnt [10, 11, 15]. Letzteres bestätigen MAGNUS [16] und HINRICHS [17] durch Temperaturmessungen unterhalb der Tankmündung, Bild 2.-10 und 2.-11.

Durch den geringen Impuls des Brennstoffstromes zeigen die Flammen von Erdölprodukten starke Rußbildung. Angaben über die Strahlungseigenschaften einer Benzinflamme machen BLINOV und CHUDJAKOV [10] (Tafel 2.-3). Die Werte sind mit einem Strahlungsdetektor senkrecht zur Flammenachse ermittelt.

Tafel 2.-3: Temperatur und Emissionsgrad einer Benzinflamme im mittleren Teil der Flamme gemessen senkrecht zur Achse [10].

Tankdurchmesser	[cm]	130	130	260	260
Flammentemperatur	[°K]	1390	1390	1403	1447
Emissionskoeffizient		0,75	0,86	0,91	1,0

GORDON und McMILLAN [18] entzündeten 3030 l bzw. 4550 l Benzin in einer Abbrandwanne von 3,66 m Breite und 7,32 m Länge. Der Flüssigkeitsspiegel wurde durch Nachpumpen von Wasser auf konstanter Höhe gehalten. Die Anordnung der Thermolemente zeigt Bild 2.-12, den typischen zeitlichen Temperaturverlauf Bild 2.-13. Die Messungen wurden statistisch ausgewertet und lieferten die in Bild 2.-14 gezeigten Ergebnisse. Sie stellen die für eine Strahlungsrechnung geeignete mittlere Temperatur der Flamme dar.

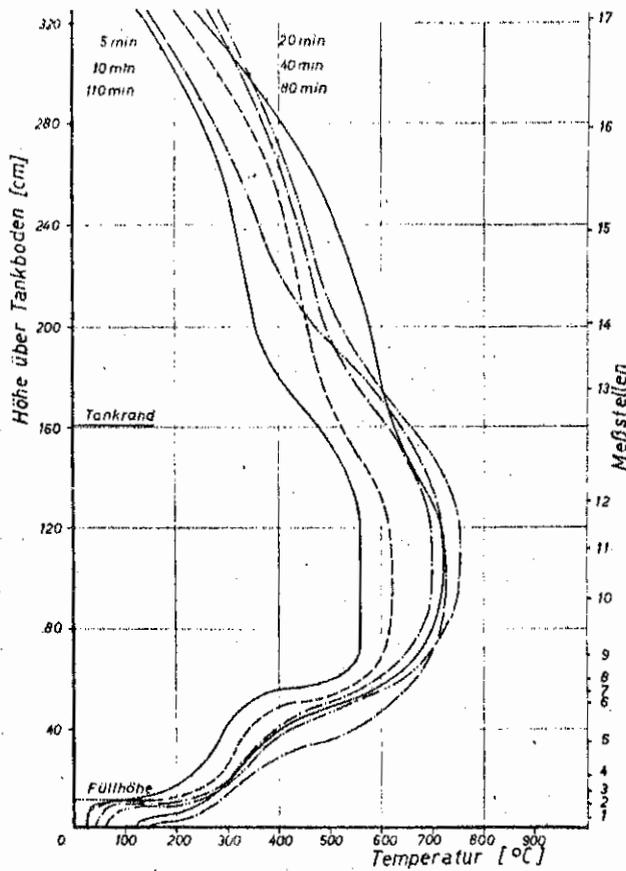


Bild 2.-10: Temperaturverteilung beim Brand von Benzin in 120 cm-Tank [16,17].

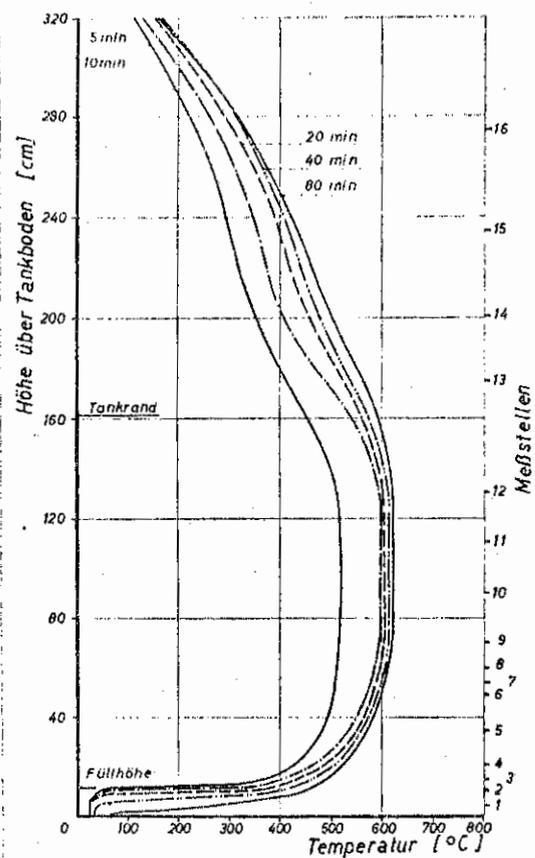


Bild 2.-11: Temperaturverteilung beim Brand von Äthylalkohol in einem 120 cm-Tank [16,17].

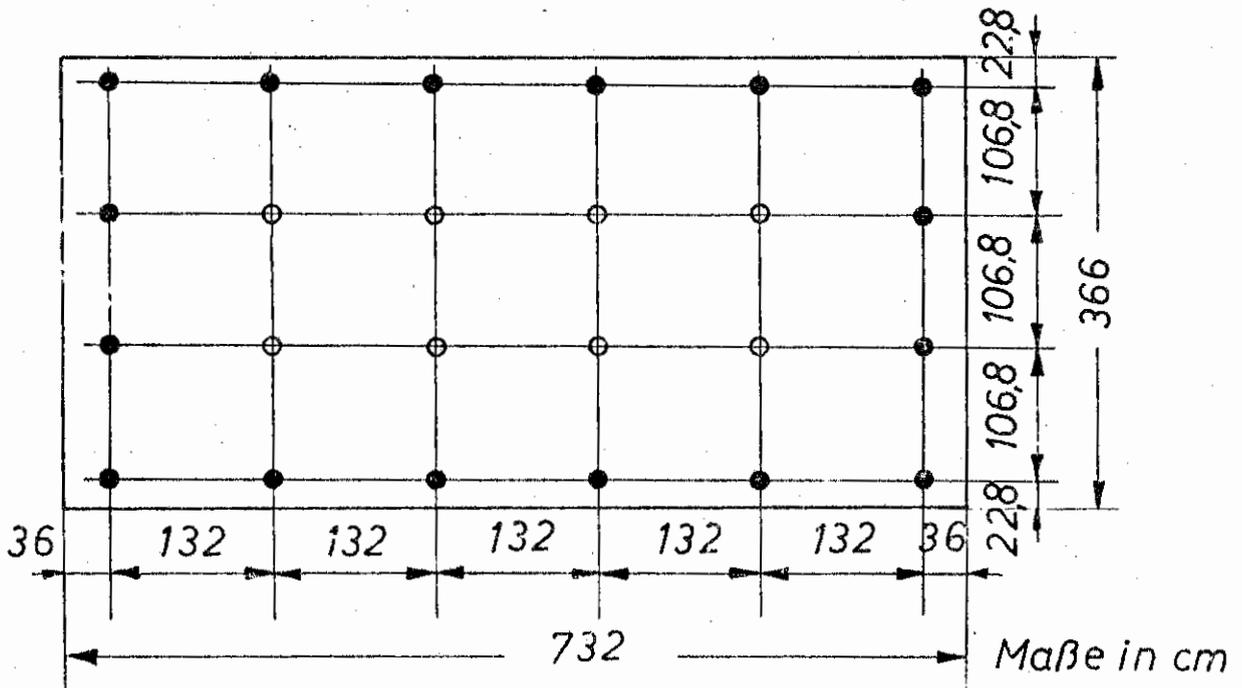


Bild 2.-12: Abbrandwanne von GORDON und McMILLAN [18,7]. Anordnung der senkrechten Stützstäbe, die mit je 6 Thermoelementen bestückt waren. Abstand der Thermoelemente von der Flüssigkeitsoberfläche 15,25, 45,7, 76,1, 106,8, 137,1 und 167,6 cm.

o innere • äußere Temperaturmeßstellen.

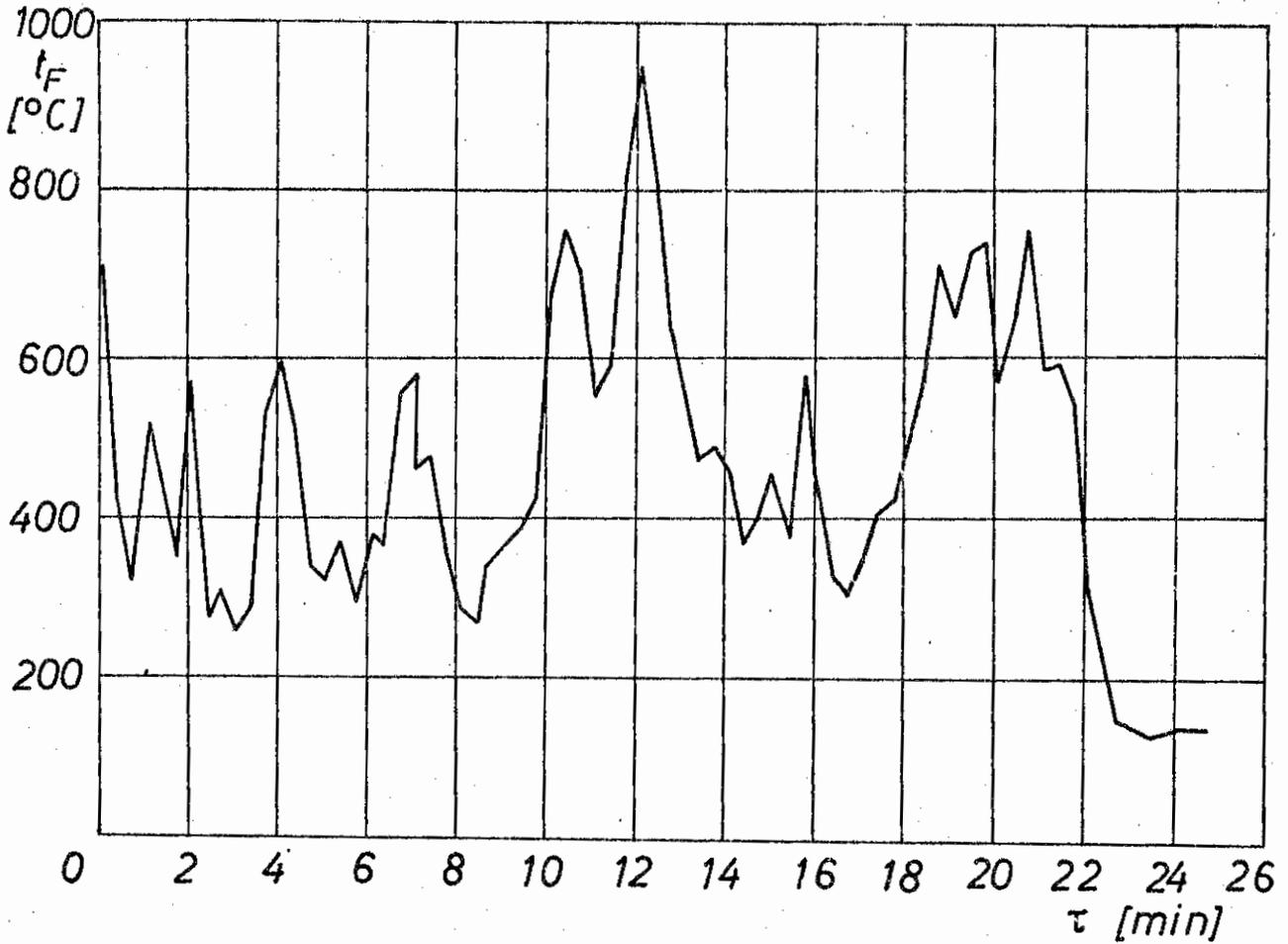


Bild 2.-13: Typischer Verlauf der von einem Thermoelement registrierten Temperatur in der Abbrandwanne von GORDON und McMILLAN [18].

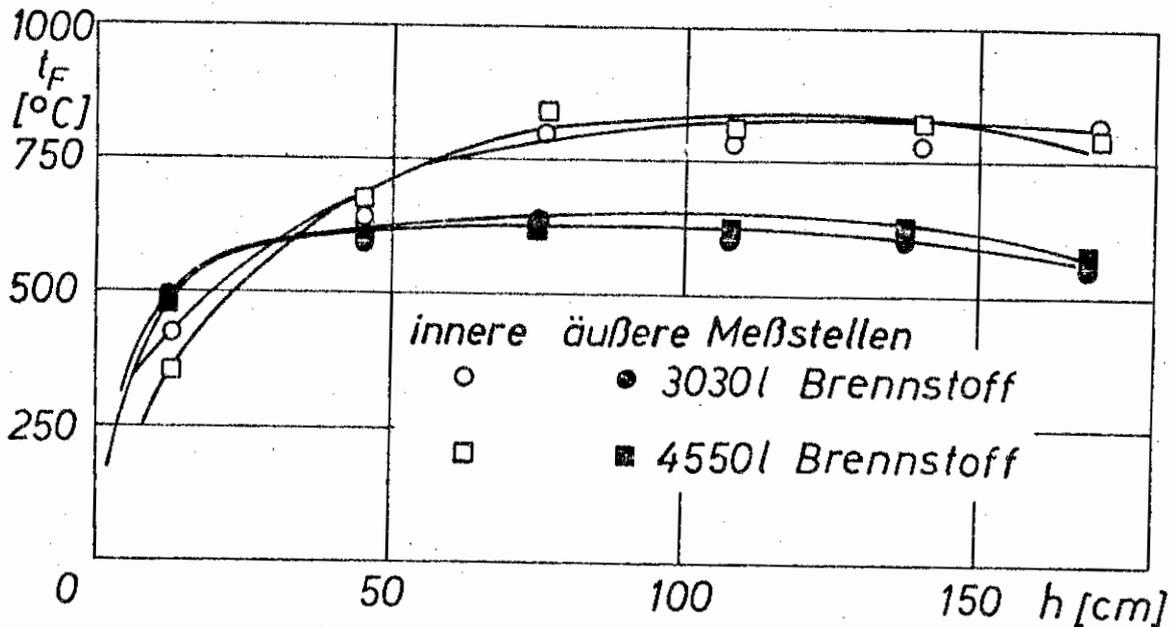


Bild 2.-14: Durchschnittliche Flammentemperatur als Funktion des Abstandes  $h$  von der Brennstoffoberfläche von 100/130-Oktan-Flugbenzin, aufgenommen mit den inneren und äußeren Temperaturmeßstellen [18].

DROTSCHMANN [9] nennt für Transformatorenöl eine Flammentemperatur von 900 - 1300 °K. Nach BURGOYNE und KATAN [2] ist die mit Thermoelementen bestimmte mittlere Flammentemperatur verschiedener Erdölprodukte 1100 - 1200 °K. Auf Grund einer Wärmebilanz schätzte HOTTEL [7] die Flammentemperatur bei den von BLINOV und CHUDJAKOV [8] vorgelegten Abbrandgeschwindigkeiten (Bild 2.-2) auf 1100 °K. Die maximale Flammentemperatur wurde von RASBASH u.a. [15] nach der Zweifarben-Methode an einem Tank von 30 cm Durchmesser bestimmt. Die Werte sind für Alkohol 1563 °K, Benzol 1463 °K, Benzin 1523 °K und Kerosin 1483 °K. GRUMER u.a. [3] geben die maximale Flammentemperatur verschiedener flüssiger Brennstoffe bei Tankbränden ebenfalls mit etwa 1400 °K an. Den Messungen von MAGNUS [16] und HINRICHS [17] entnimmt man eine maximale Flammentemperatur von 1100 °K. TARIFA [19] gibt die mit Thermoelementen gemessenen Temperaturen in einer Heptanflamme aus einem Tank von 25 cm Durchmesser an, Bild 2.-15. Der höchste Wert liegt bei 708 °C.

### 2.3. WÄRMETRANSPORT VON DER FLAMME ZUR FLÜSSIGKEIT

Der Wärmeübergang von der Tankwand in die Flüssigkeit unterhalb des Flüssigkeitsspiegels richtet sich nach der Temperaturverteilung in dieser Zone. Im allgemeinen entspricht die Temperatur der Tankwand unterhalb des Flüssigkeitsspiegels der Temperaturverteilung in der Flüssigkeit, so daß kein Wärmeübergang stattfindet [9, 10, 11].

Lediglich in einer schmalen Zone unterhalb des Flüssigkeitsspiegels wurde ein Wärmeübergang von der Tankwand in die

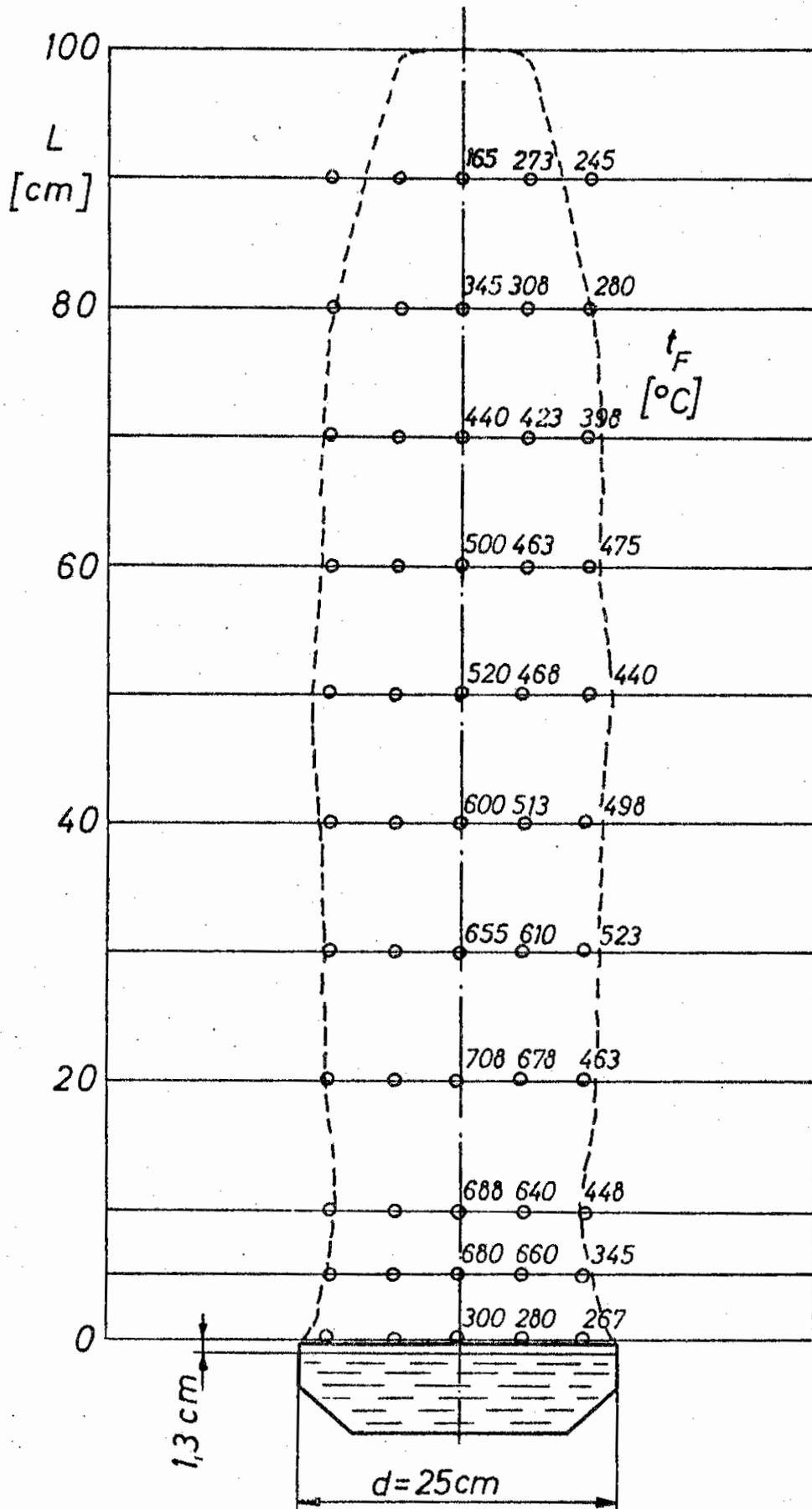


Bild 2.-15: Temperaturverteilung und Kontur einer Flamme von n-Heptan aus einem Tank von 25 cm Durchmesser [19].

Flüssigkeit beobachtet. Die übergehende Wärme stammt aus der von der Flamme erwärmten Wandzone. Bei sonst gleichen Verhältnissen wird die Bedeutung dieser Komponente im wesentlichen vom Verhältnis Tankumfang zu Tankquerschnitt bestimmt. Die auf die Querschnittsfläche bezogene Wärmezufuhr aus der Tankwand wird demnach mit wachsendem Durchmesser immer kleiner und ist schnell zu vernachlässigen [7, 8].

Der Anteil der Gaskonvektion an der Gesamtwärmezufuhr zur Flüssigkeit wird für starkleuchtende Kohlen-Wasserstoffflammen und große Tankdurchmesser als gering bzw. vernachlässigbar angesehen [4, 7, 8, 19, 20, 21]. HOTTEL [7] gab in seiner Besprechung der Arbeit von BLINOV und CHUDJAKOV [8] eine grobe Abschätzung der Wärmeübergangszahl mit  $\alpha = 5 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \text{ h grad})$ . Als maßgebende Temperaturen setzte er die Flammentemperatur und die Temperatur der Flüssigkeitsoberfläche an. Dies trifft sicher nicht die tatsächlichen Verhältnisse.  $\alpha$  wird man daher höher ansetzen müssen.

Die Wärmezufuhr in die Flüssigkeit durch Strahlung aus der Tankwand wird in der Literatur nicht behandelt. DROTSCHMANN [9] gibt lediglich für längere Brenndauer eine Tankwandtemperatur von 500 - 900 °C an.

Der Strahlungswärmetransport aus der Flamme in die Flüssigkeit wird für starkleuchtende Flammen allgemein als dominierende Komponente angesehen. So berechneten BURGESS u.a. [21] den Verlauf der Abbrandgeschwindigkeit als Funktion des Tankdurchmessers unter Vernachlässigung der Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion. Bild 2.-16 zeigt die Übereinstimmung der Versuchswerte mit den berechneten Kurven.

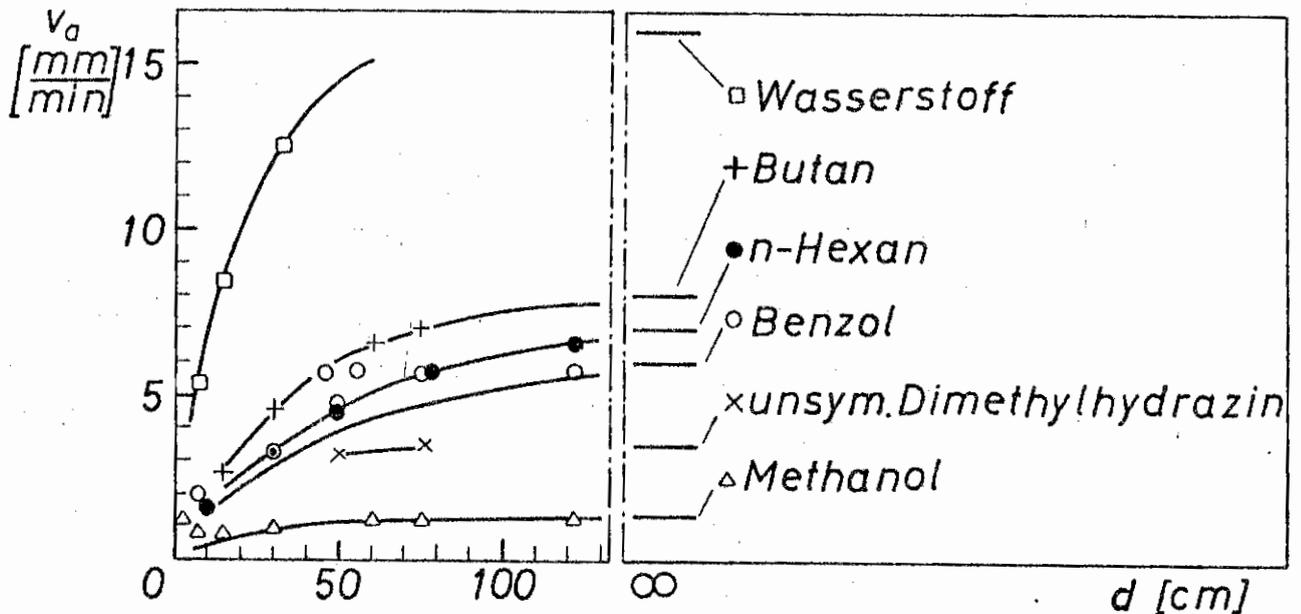


Bild 2.-16: Vergleich von Versuchswerten mit errechneten Werten der Abbrandgeschwindigkeit. Die Rechnung basierte auf alleinigem Wärmetransport durch Strahlung [21].

RASBASH u.a. [15] ermittelten aus den gemessenen Werten der Verdampfungsrate, der Erwärmung der Flüssigkeit unterhalb der Oberfläche, der Flammentemperatur und des Emissionsgrades der Flamme den Wärmetransport durch Strahlung aus der Flamme in die Flüssigkeit. Die Werte zeigt Tafel 2.-4. Für starkleuchtende Flammen deckt der errechnete Wärmefluß mindestens den Wärmeverbrauch der Flüssigkeit. Bei Alkohol, einer Flüssigkeit mit kaum strahlender Flamme, trifft das bei weitem nicht zu.

BURGESS u.a. [21] erklären ihre Versuchswerte bei Tankbränden mit Flüssigkeiten, die leuchtende Flammen bilden, ebenfalls durch alleinigen Wärmetransport durch Strahlung aus der Flamme. Sie weisen in einer späteren Arbeit [22] nach, daß eine von SPALDING [5] aufgestellte Konvektionstheorie (Abschnitt 2.1) ihren Versuchsergebnissen nicht gerecht wird.

Tafel 2.-4. Vergleich der Wärmeaufnahme verschiedener Flüssigkeiten während des Abbrandes mit der Wärmezufuhr durch Strahlung aus der Flamme. Nach [15].

Flüssigkeit	Wärmezufuhr zum Verdampfen des Brennstoffes [cal/min] A	Wärmezufuhr um die fühlbare Wärme der Flüssigkeit zu erhöhen [cal/min] B	Summe A + B [cal/min]	Aus der Flammenstrahlung errechneter Wärmefluß zur Flüssigkeit [cal/min]
Alkohol	13500	4000	17500	3000
Benzol	27500	4500	32000	36000
Benzin	10500	3000	13500	21500
Kerosin	9000	6000	15000	15500

TARIFA u.a. [19] und CORLETT [20] bestätigen ebenfalls die dominierende Rolle der Wärmestrahlung aus der Flamme bei leuchtenden Flammen und solchen Tankdurchmessern, bei denen die Flamme von der Flüssigkeit her gesehen optisch dicht ist. Auch HOTTEL [7] nennt in seiner Besprechung der Arbeit von BLINOV und CHUDJAKOV [8] für größere Tanks und leuchtende Flammen die Strahlung von der Flamme zur Flüssigkeit die tragende Komponente des Wärmetransportes.

Für die nichtleuchtende Verbrennung von Flüssigkeiten kann SPALDINGs Konvektionstheorie durchaus akzeptabel sein, wie Versuche von RASBASH u.a. [15] an Alkohol zeigten.

Die von BLINOV und CHUDJAKOV [8] vorgelegten Abbrandgeschwindigkeiten verschiedener Brennstoffe über einen Durchmesserbereich von 0,37 bis 2290 cm (Bild 2.-2) zeigen die Veränderung des Wärmetransportmechanismus mit wachsendem Tankdurchmesser. Der Wärmeübergang durch Leitung aus der Tankwand in die Flüssigkeit ist bei dem kleinsten Versuchsbehälter am größten. Er nimmt mit wachsendem Tankdurchmesser ständig ab. Die Strahlung der Flamme ist an deren optische Dichte gebunden. Im Bereich kleinerer Durchmesser ist die Strahlungskraft der laminar brennenden Flamme sehr klein. Sie wächst mit ansteigendem Tankdurchmesser und zunehmender Turbulenz der Flamme und strebt einem Endwert zu.

Die Abbrandwerte bei kleinen Durchmessern werden daher der Wärmezufuhr aus der Tankwand zugeschrieben und die bei großen Durchmessern - ab etwa 60 cm Tankdurchmesser - der Strahlung aus der Flamme. Das Minimum bei etwa 20 cm Tankdurchmesser resultiert aus dem schon stark reduzierten Wärmeübergang aus der Tankwand bei noch schwacher Flammenstrahlung.

Die konstante Abbrandgeschwindigkeit ab etwa 1 m Tankdurchmesser stützt die Annahme eines überwiegenden Wärmetransportes durch Strahlung [7, 8].

Aus dieser Arbeit von BLINOV und CHUDJAKOV [8] leitete HOTTEL [7] eine halb-empirische Aussage über das Brandverhalten von Flüssigkeiten in Tanks ab.

HOTTEL setzte für den Wärmeübergang vom Tankrand in die Flüssigkeit

$$\dot{Q}_{WB} = \alpha_1 \pi d (T_F - T_B) \quad , \quad (2.-4)$$

für den Konvektionswärmestrom durch die Gasphase

$$\dot{Q}_K = \alpha_2 d^2 \frac{\pi}{4} (T_F - T_B) \quad (2.-5)$$

und für den Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen Flamme und Flüssigkeit

$$\dot{Q}_{FB} = \sigma \varphi (T_F^4 - T_B^4) [1 - \exp(-Kd)] \quad (2.-6)$$

Darin ist  $\alpha_1$  die Wärmeübergangszahl zwischen Tankwand und Flüssigkeit,  $\alpha_2$  die Wärmeübergangszahl für Konvektion,  $K$  der BEER'sche Extinktionskoeffizient,  $\sigma$  die Strahlungszahl,  $\varphi$  der Blickwinkel, den die Flüssigkeit von der Flamme hat und  $T_B$  die Temperatur der Flüssigkeitsoberfläche.

Die Summe der einzelnen Komponenten ergibt den Gesamtwärmestrom von der Flamme zur Flüssigkeit und bestimmt deren Verdampfungsrate. Nach HOTTEL gestattet diese Aufteilung eine bequeme Abschätzung des Anteils jeder Komponente.

HOTTEL's Analyse wurde von AKITA und YUMATO [12] modifiziert, indem sie  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  als Funktionen des Tankdurchmessers vorgaben.

EMMONS [23] legte eine Dimensionsanalyse der bei einem Tankbrand wichtigen Variablen vor. Mit einer Reduktion von 15 auf 11 unabhängige Variable ergab sich nur eine unwesentliche Vereinfachung des Problems. EMMONS schlug daher wie HOTTEL [7] eine Aufteilung des Wärmestromes in einzelne Komponenten vor.

#### 2.4. FLAMMENLÄNGE

Bild 2.-17 zeigt die dimensionslose Flammenlänge  $\frac{L}{d}$  als Funktion des Tankdurchmessers nach BLINOV und CHUDJAKOV [8] und HINRICHS [17].

BLINOV und CHUDJAKOV [8] unterscheiden bei Flüssigkeitsbränden eine laminare, eine Übergangs- und eine turbulente Flamme, je nach Tankgröße. Ihre Ergebnisse für laminare Flammen [10] stimmen gut mit der nach BURKE und SCHUMANN [24] berechneten Flammenlänge überein. Für turbulente Flammen setzen sie die Flammenlänge proportional dem Ausflußvolumen und umgekehrt proportional der turbulenten Austauschgröße. Für dieses Gebiet erhalten sie so eine konstante dimensionslose Flammenlänge.

HOTTEL [7] interpretiert die Ergebnisse von BLINOV und CHUDJAKOV [8] ebenfalls so.

Allgemein wird in der Literatur die bezogene Flammenlänge auftriebsbehafteter Diffusionsflammen als Funktion der Froude-Zahl dargestellt.

PUTNAM und SPEICH [25] simulierten die Bedingungen freier Flüssigkeits- und Feststoffbrände durch besonders langsame Gasströme aus Düsen. Für den auftriebskontrollierten Bereich der Flammenlänge fanden sie

$$\frac{L}{d} \sim Fr^{1/5}$$

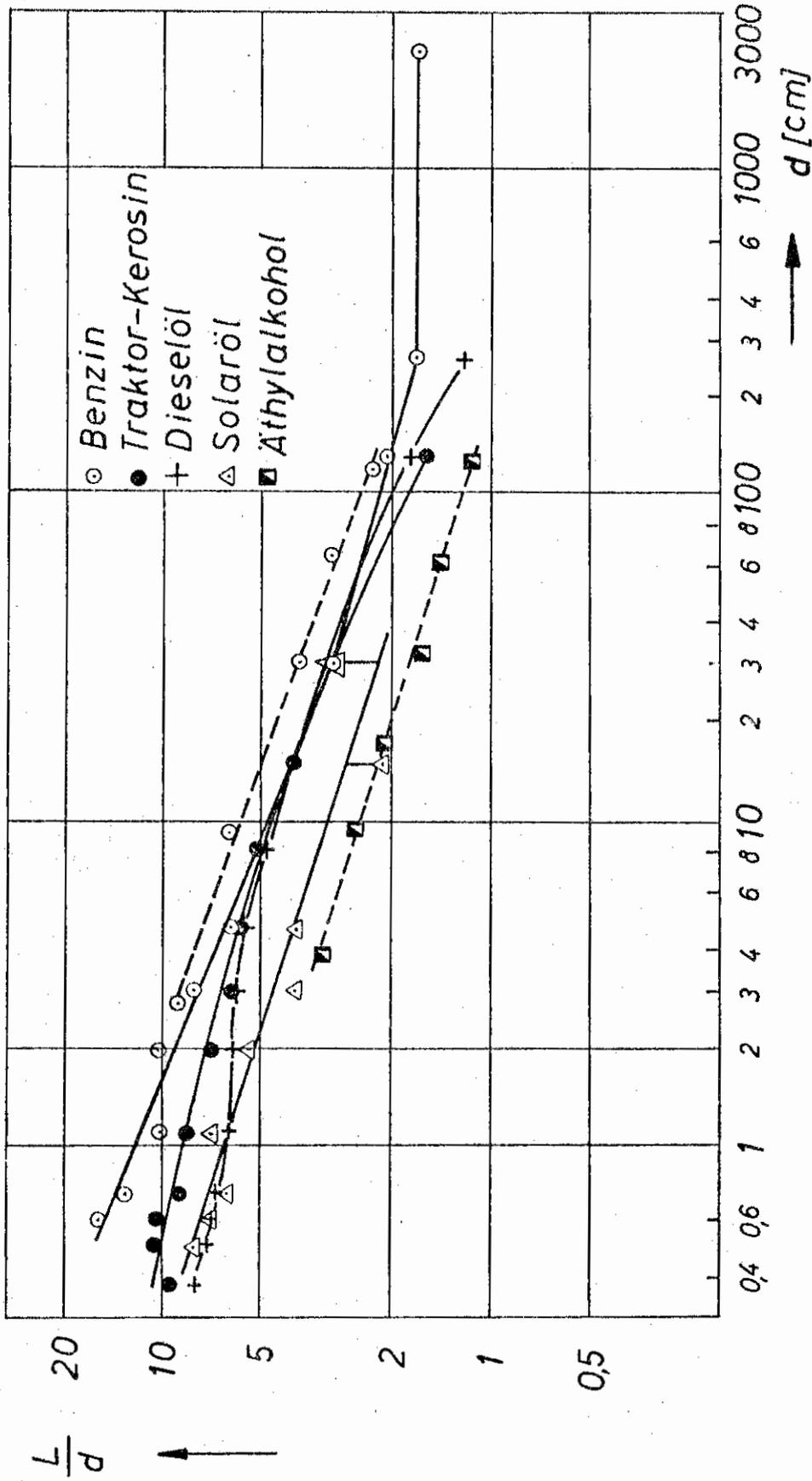


Bild 2.-17: Dimensionslose Flammenlänge  $L/d$  als Funktion des Tankdurchmessers  $d$  für verschiedene Brennstoffe. Ausgezogene Linien nach BLINOV und CHUDJAKOV [8], gestrichelte Linien nach HINRICHS [17].

THOMAS [26] leitet die dimensionslosen Flammenlängen der verschiedensten frei brennenden Stoffe als Funktion der Froude-Zahlen ab.

Für Flammen aus Brennern und Flammen von Holzgerüsten nennt die JOINT FIRE RESEARCH ORGANISATION [27]

$$\frac{L}{d} \sim Fr^{0,30}$$

KREMER [28] gibt die modifizierte Froude-Zahl für auftriebsbehaftete Diffusionsflammen mit einer 1/5-Potenz an.

HESS [29] fand für auftriebsbehaftete Diffusionsflammen an Brennerdurchmessern bis 22 mm

$$\frac{L}{d} \sim Fr^{0,232}$$

SUNAVALA [30] nahm eine Zusammenstellung der von verschiedenen Autoren beschriebenen Flammenlängen auftriebsbehafteter Diffusionsflammen vor. Unter Annahme einer Cosinusverteilung der Strahlgeschwindigkeit in der y-Ebene leitete er folgende theoretische Beziehung für die bezogene Flammenlänge auftriebsbestimmter Diffusionsflammen ab

$$\frac{L}{d} = A B Fr^{1/5} \quad (2-7)$$

mit

$$B = \left(\frac{1}{c_B}\right)^{2/5} \left(\frac{\rho_B}{\rho_F}\right)^{2/5} \left(\frac{\rho_F}{\rho_B - \rho_F}\right)^{1/5} \quad (2-8)$$

Die zum Teil auf andere Rechenwerte bezogenen Ableitungen weiterer Autoren stellt er auf die in Gleichung 2.-7 angegebene Form um und zeigt damit deren Gültigkeit. Für den Faktor A findet er den Wert  $A = 2,45$ . Im Hinblick auf eine Ableitung von STEWARD [31] mit  $A = 7,72$  schlägt SUNAVALA einen Wert von  $A = 5,0$  vor.

### 3. VERSUCHE ÜBER DIE WÄRMEZUFUHR VON DER TANKWAND IN DIE FLÜSSIGKEIT IM BEREICH UNTERHALB DES FLÜSSIGKEITSSPIEGELS

#### 3.1. MESSMETHODE

In der Tankwand fließt ein Wärmestrom in Richtung der Tankachse von der Flammenzone in den kälteren unteren Tankteil. Dieser Wärmestrom ist mit einem Temperaturgradienten in der Tankwand verbunden. Ein weiterer Wärmestrom  $\dot{Q}_{WB}$  geht unterhalb des Flüssigkeitsspiegels von der Tankwand in die Flüssigkeit über, Bild 3.-1.

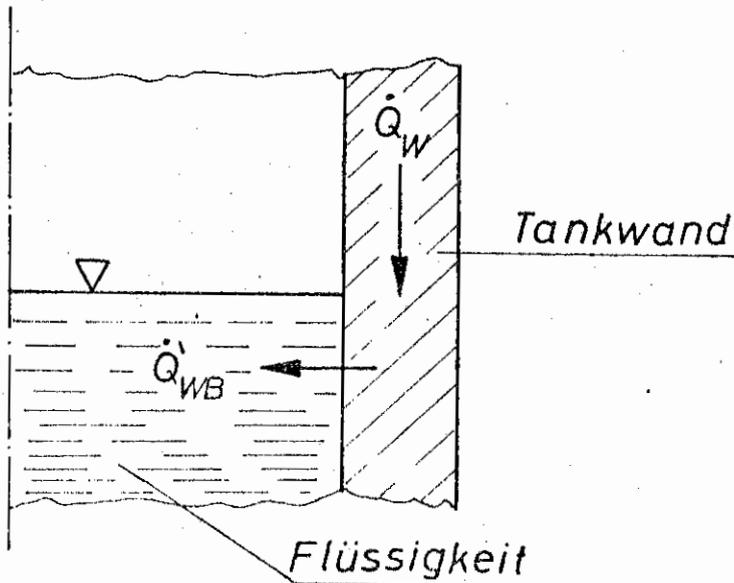


Bild 3.-1: Ausschnitt aus der Tankwand im Bereich des Flüssigkeitsspiegels. Abwärts gerichteter Wärmestrom  $\dot{Q}_W$  in der Wand geht unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche in den Brennstoff über.

Ab einem gewissen Abstand von der Flüssigkeitsoberfläche hat die Tankwand die Temperatur der Flüssigkeit angenommen.

Wärmeverluste des Tankmantels an die Umgebung im Bereich unterhalb des Flüssigkeitsspiegels werden als unbedeutend angenommen. Dann ist der in Höhe des Flüssigkeitsspiegels gemessene Wärmestrom  $\dot{Q}_W$  gleich  $\dot{Q}'_{WB}$ .

$$\dot{Q}_W = \dot{Q}'_{WB} \quad (3.-1)$$

$\dot{Q}_W$  ergibt sich aus dem Temperaturgradienten  $dt/dh$  in Höhe der Brennstoffoberfläche, der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_W$  und der Querschnittsfläche  $F'_W$  der Tankwand zu

$$\dot{Q}_W = \lambda_W F'_W \frac{dt}{dh} \quad (3.-2)$$

Flüssigkeiten ohne Wärmezone nehmen nach Erreichen des Temperaturgleichgewichtes eine feste Temperaturkurve unterhalb des Flüssigkeitsspiegels an (Abschnitt 2.1).

Ein von der Flüssigkeit aufgenommener Wärmestrom  $\dot{Q}_a$  dient zum Erwärmen von Umgebungs- auf Siedetemperatur und zum Verdampfen einer Flüssigkeitsmenge  $\dot{m}$  in der Zeiteinheit.

$$\dot{Q}_a = \dot{m} [r + c(t_S - t_U)] \quad (3.-3)$$

Die Abbrandgeschwindigkeit  $v_a$  ergibt sich aus  $\dot{m}$  zu

$$v_a = \frac{\dot{m}}{F_B \rho_B} \quad (3.-4)$$

mit  $F_B$  als Tankquerschnitt und  $\rho_B$  als Flüssigkeitsdichte.

Entsprechend Gleichung 3.-3 und Gleichung 3.-4 kann auch für  $\dot{Q}_{WB}$  ein Dampfstrom  $\dot{m}$  und eine Abbrandgeschwindigkeit  $v_a$  abgeleitet werden.

$$\dot{Q}_{WB} = \dot{m} [r + c (t_S - t_U)] \quad (3.-5)$$

$$v_a = \frac{\dot{m}}{F_B \rho_B} \quad (3.-6)$$

$v_a$  kann durch eine weitere Methode experimentell bestimmt werden. Löscht man die Flamme in einem Tank, so verdampft die Flüssigkeit durch Wärmezufuhr aus der Tankwand noch eine Zeitlang, bis der Tankmantel abgekühlt ist. Den zeitlichen Verlauf der Verdampfungsrate nach der Löschung extrapoliert man auf den Zeitpunkt der Löschung. So ergibt sich der Anteil  $v_a$  der Wärmezufuhr durch die Tankwand an der Gesamt-  
abbrandgeschwindigkeit  $v_a$ .

### 3.2. VERSUCHSAUFBAU UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Als Abbrandbehälter (Bild 3.-2) wurden Stahlgefäße mit 225 mm Innendurchmesser, 300 mm Innenhöhe und 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15 und 22 mm Wanddicke verwendet. Dicht über dem Tankboden befand sich ein Anschlußstutzen. An der Tankwand waren 8 Thermoelemente angebracht.

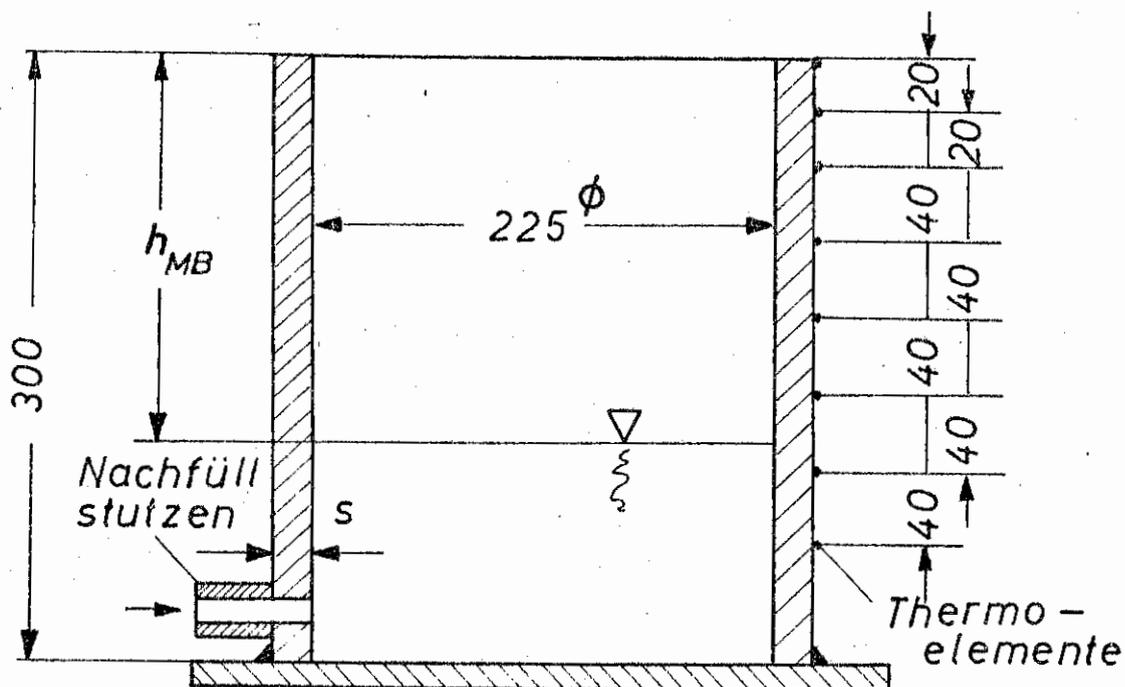


Bild 3.-2: Versuchstank zur Bestimmung des Wandeinflusses.  
 $s = 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15$  und  $22$  mm.

Den Versuchsaufbau zeigt Bild 3.-3. In den Tank a auf dem Gestell b konnte aus dem Gefäß c über das Ventil d Brennstoff fließen. Die Gewichtsabnahme von Gefäß c und die Füllhöhe des Tanks wurden über elektrische Meßwertaufnehmer e mit den Meßbrücken f erfaßt. Mit dem Verschiebegerät g konnte ein Thermoelement h vertikal in dem Tank verfahren werden. Sämtliche Meßwerte wurden von einem 12-Punkt-Drucker j aufgezeichnet. Als Brennstoff ohne Wärmezone diente vergällter Alkohol.

Nach dem Zünden wurde das Wärmegleichgewicht in der Flüssigkeit abgewartet. Der Temperaturgradient  $dt/dh$  wurde in einem Bereich konstanter Abbrandgeschwindigkeit bestimmt. Dazu

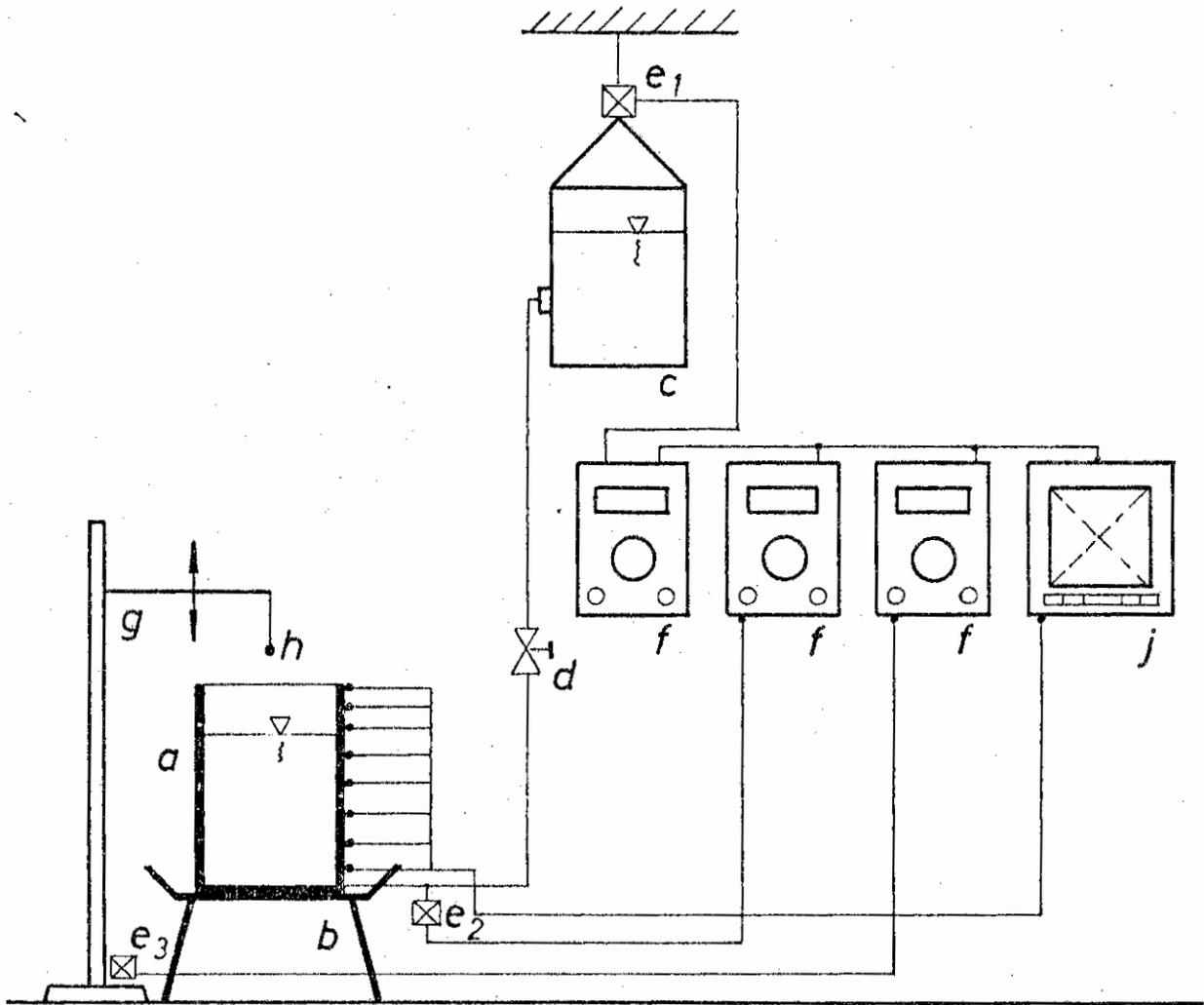


Bild 3.-3: Versuchsanlage zur Bestimmung des Wandeinflusses.

wurde nach dem Durchgang der Ebene des Flüssigkeitsspiegels durch eine Thermoelementenebene in festen Zeitabständen der Abstand der Ebenen und die Temperatur der Meßstelle festgehalten. Dies war zulässig, da in Vorversuchen die Konstanz des Gradienten bis mindestens 20 mm über dem Flüssigkeitsspiegel nachgewiesen wurde.

### 3.3. MESSERGEBNISSE UND FOLGERUNGEN

Bild 3.-4 zeigt die Abbrandgeschwindigkeiten  $v_a$  und  $v_a'$  als Funktion der auf den Tankdurchmesser bezogenen Wanddicke.  $v_a'$  ist nach den angegebenen Methoden bestimmt. Beide Verfahren eignen sich damit zur Ermittlung der Wärmezufuhr durch die Tankwand unterhalb des Flüssigkeitsspiegels.

Der Kurvenverlauf ergibt sich aus den von der Wanddicke abhängigen Wärmetransportvorgängen zwischen Flamme und Tankwand, in der Tankwand und zwischen Tankwand und Flüssigkeit. So hängt die Wandtemperatur in der Flammen- und Flüssigkeitszone von der Wanddicke ab. Bei kleiner Wanddicke ist die Temperatur in der Flammenzone am höchsten und in der Flüssigkeitszone am niedrigsten. Auch reicht die Temperaturerhöhung bei großer Wanddicke weiter unter den Flüssigkeitsspiegel. Diese Verhältnisse wurden nicht näher untersucht.

Wichtig für die vorliegende Arbeit ist folgender Schluß: Bei einer maßstabgerechten Verkleinerung realer Tanks ergibt sich für Modelltanks ein  $s/d \rightarrow 0$ . Selbst unter ungünstigen Verhältnissen - Alkohol mit kaum strahlender Flamme und kleiner Tankdurchmesser - ist der Anteil der Wärmezufuhr durch die Tankwand unterhalb des Flüssigkeitsspiegels zu vernachlässigen.

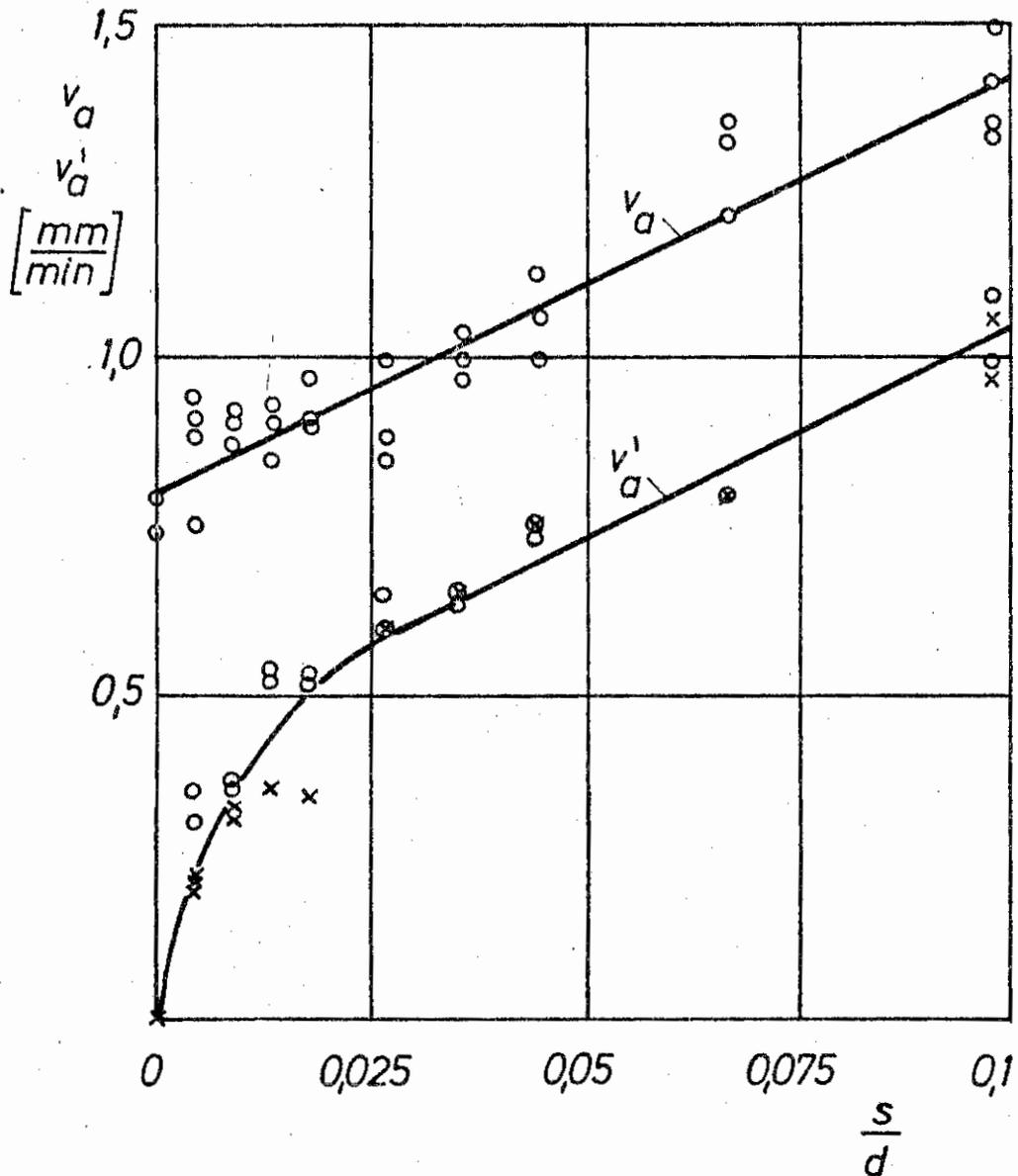


Bild 3.-4: Abbrandgeschwindigkeit  $v_a$  und Anteil  $v'_a$  durch Wärmezufuhr aus der Tankwand in Abhängigkeit von der bezogenen Wanddicke der Tanks bei einem Abstand Tankmündung - Flüssigkeitsspiegel von 140 mm.

x Ermittlung von  $v'_a$  über Temperaturgradient in der Tankwand.  
 o Ermittlung von  $v'_a$  aus Extrapolation nach Löschung der Flamme.  
 $s/d = 0$  durch Wasserkühlung des Tanks mit  $s = 1$  mm.

#### 4. VERSUCHE ÜBER DIE VERBRENNUNG IM TANKINNERN

Die Bedeutung der unteren Flammenfront für den Strahlungswärmetransport wurde bereits aufgezeigt. Nach den Literaturangaben in Abschnitt 2.2 befindet sich die untere Flammenzone im Tankraum zwischen Mündung und Flüssigkeitsspiegel. Dazu muß Umgebungsluft gegen den Dampfstrom in das Tankinnere eindringen. Dies wird durch die geringe Dampfgeschwindigkeit von etwa 1 cm/s und die großen Tankdurchmesser möglich.

Durch die Verbrennung nehmen die Verbrennungsgase auftriebsbedingt eine vergleichsweise hohe Geschwindigkeit an. Dabei entstehen Unterdruck- und Turbulenzzonen. Durch diese dringen Luftballen in das Tankinnere und vermischen sich dort mit dem Brennstoffstrom. Die Zündenergie wird durch Mischung mit heißem Abgas geliefert. Bei der Verbrennung eines zündfähigen Ballens treten leichte Überdrücke im Tankinneren auf. Die Annahme periodischer Druckschwankungen für wärmebezogene Schwingungen wurde bereits von RAYLEIGH [32] eingeführt. Sie wird durch die Literatur über Flammen mit Ablösung gestützt [33, 34].

Bei kleinen Tankdurchmessern müßte die Flamme der Strömung nach vom laminaren Typ sein. Sie zeigt aber durch die pulsierende Verbrennung grobbleibige Struktur mit starken Aufwältungen und keine geschlossene Flammenfront.

##### 4.1. VERSUCHSPROGRAMM

Will man Abbrandgeschwindigkeiten und Wärmetransportvorgänge studieren, so liegt eine ausreichende Ähnlichkeit mit den Vorgängen bei Großtanks ab Tankdurchmessern von 1 - 2 m vor.

Die Verbrennungsvorgänge selbst können bereits bei kleineren Durchmessern untersucht werden. Wichtig ist nur eine vergleichbare Größenordnung der Einflußgrößen.

Als eine dieser Kenngrößen wird die Archimedes-Zahl (Auftriebskraft/Trägheitskraft) angesehen. Sie ist ein Maß für die Auftrieb Wirkung in der Flamme. Der Auftrieb gewinnt seine Bedeutung bei Tankbränden durch den Impuls, den er den Gasen in der Flammenzone erteilt. Dagegen ist der Anfangsimpuls des Dampfstromes vernachlässigbar. Die Archimedes-Zahlen realer Tanks von 10 - 100 m Durchmesser liegen in der Größe von  $10^6$  bis  $10^7$ . Bei den untersuchten Modelltanks bis 0,25 m Durchmesser reichen sie von  $10^4$  bis  $10^5$ .

Eine weitere Kenngröße ist die Geschwindigkeit des Dampfstromes im Tank. Sie liegt bei Erdölprodukten und größeren Tankdurchmessern bei ca. 1 cm/s. Dies entspricht einer Abbrandgeschwindigkeit von etwa 4 mm/min bei Benzin.

Bei Flüssigkeitsbränden stellt sich die Dampfgeschwindigkeit entsprechend der jeweiligen Wärmebilanz ein. Bei den Versuchen wurde Propan als Brennstoff gewählt, um die Gasgeschwindigkeit nach Bedarf einzuregulieren. Dieser Übergang von Flüssigkeiten auf verbrennungstechnisch ähnliche Gase findet sich bereits in der Literatur [20]. Im Vergleich zu Benzin beispielsweise hat Propan pro kg den gleichen Heizwert und den gleichen theoretischen Luftbedarf. Auch die Dichte liegt bei beiden über der der Umgebungsluft.

Die Versuche sollten Aufschluß über folgende Vorgänge geben:

1. Eindringtiefe der Umgebungsluft in das Tankinnere in Abhängigkeit von Tankdurchmesser und Gasgeschwindigkeit.

2. Mechanismus des Eindringens von Luft und des Vermischens mit Brennstoff.

3. Bezogene Flammenlänge in Abhängigkeit von der Froude-Zahl.

Dazu wurden Konzentrationen und Temperaturen im Tankraum zwischen Frischgaszone und Tankmündung gemessen und Flammenfotografien aufgenommen.

#### 4.2. VERSUCHSANLAGE UND VERSUCHSBEDINGUNGEN

Die Versuchsanlage zeigt Bild 4.-1. Sie war in zwei Räumen untergebracht, die eine Tür mit Schauglas F trennte. Diese Trennung zwischen Flamme und Meßgeräten hielt Störungen von der Flamme fern und schützte die Geräte vor der z.T. erheblichen Rußbildung. Der Beobachter betrat den Raum mit den Tanks während der Messung nur zum Verschieben der Sonde.

Im Meßgeräteraum wurde eine Temperatur von 20 °C gehalten, im Brennerraum stellten sich 30 - 35 °C ein. Das Propan wurde einer 33 kg-Flasche a über den Druckminderer b entnommen und im Bad c auf 20 °C gebracht. Die Badtemperatur wurde mit dem Thermofühler d kontrolliert. Hinter dem Druckkonstanthalter e wurde 900 mm Hg Gasdruck eingestellt und mit dem U-Rohrmanometer f überwacht. Über einen Absperrschieber g floß der Propanstrom in die untere Sammelschiene der drei Strömungsmesser i. Die waren 1:10:100 abgestuft und konnten über Absperrhähne j eingeschaltet werden. Ein Thermometer h überwachte die Gas-temperatur. Von den Strömungsmessern gelangte der Gasstrom über die obere Sammelschiene zu den ebenfalls abgestuften



Durchflußreglern  $k$  und durch die Leitung 1 zu den Modell-tanks (Bild 4.-2). Tafel 4.-1 zeigt die wichtigsten Abmes-sungen der Tanks und Tafel 4.-2 den auf  $40^{\circ}\text{C}$  (Temperatur im Kiesbett) und  $760\text{ mm Hg}$  Luftdruck bezogenen Gasdurchsatz der Tanks bei den verwendeten Gasgeschwindigkeiten von  $0,75$ ,  $1,0$ ,  $1,25$  und  $1,5\text{ cm/s}$ .

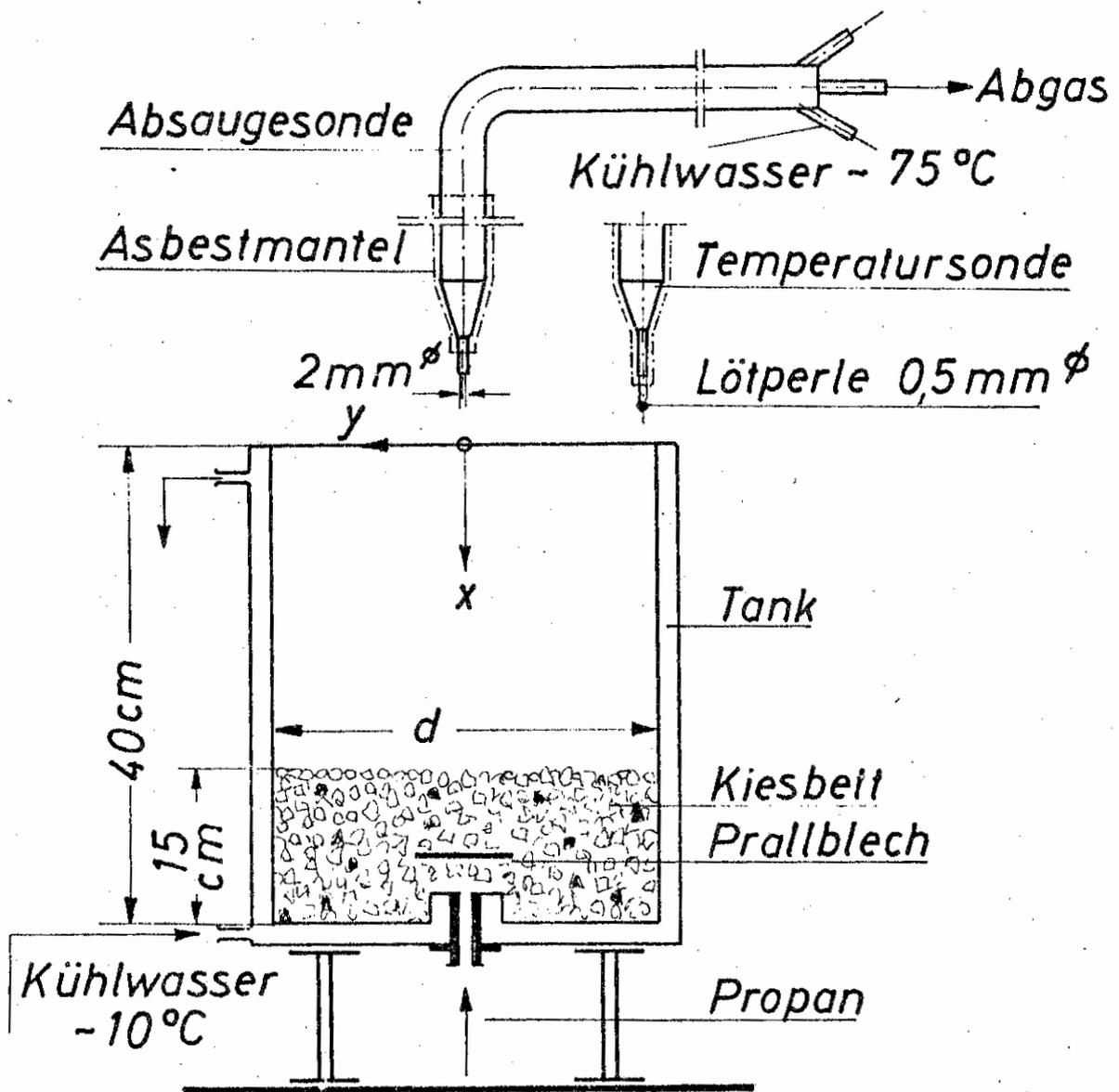


Bild 4.-2: Modelltank und Meßsonde.

Tafel 4.-1 Wichtigste Abmessungen der Modelltanks

Tank Nr.	1	2	3	4
Innendurchmesser [cm]	25,8	17,9	12,9	8,6
Querschnittsfläche [cm <sup>2</sup> ]	523	252	131	58
Abstand zwischen Kiesbett und Tankmündung [cm]	25	25	25	25
Gesamthöhe [cm]	40	40	40	40

Tafel 4.-2 Gasdurchsatz der Tanks in l/h bezogen auf die Temperatur von 40 °C im Kiesbett

Tank Nr.	Gasgeschwindigkeit			
	0,75 cm/s	1,0 cm/s	1,25 cm/s	1,5 cm/s
1 (d = 25,8 cm)	1410 l/h	1880 l/h	2350 l/h	2820 l/h
2 (d = 17,9 cm)	678 l/h	904 l/h	1130 l/h	1356 l/h
3 (d = 12,9 cm)	351 l/h	468 l/h	585 l/h	702 l/h
4 (d = 8,6 cm)	unstabile Flamme	212 l/h	265 l/h	318 l/h

Die doppelwandigen Tanks wurden mit Kühlwasser auf  $10^{\circ}\text{C}$  gehalten. Eine gleichmäßige Gasgeschwindigkeit im Tankraum wurde durch eine 15 cm hohe Kiesschicht der Körnung 2 - 6 mm auf dem Tankboden und ein Prallblech über dem Zufluß sichergestellt.

Im kleinsten Tank ( $d = 8,6\text{ cm}$ ) brannte die Flamme bei  $u = 0,75\text{ cm/s}$  unstabil, wenn die Sonde eingeführt wurde.

Über die Sonde n (Bild 4.-2) wurden kontinuierlich Gasproben entnommen. Mit dem Koordinatengerät o wurde die Sonde verschoben. Die Sonde wurde durch Kühlwasser von  $75^{\circ}\text{C}$  weitgehend über dem Taupunkt gehalten. Die Sondenspitze war mit einer 2 mm dicken Asbestwicklung isoliert. Dies verhinderte ein Auskondensieren von Wasser. Zusammen mit der starken Rußentwicklung hatte dies zu Klumpen geführt, die die Sondenöffnung verstopften.

In einem Kühler p wurde das Gas stark abgekühlt. Der entstehende Schlamm aus Ruß und Wasser floß in ein Sammelgefäß ab. Ein Membranfilter r in der Leitung q entfernte letzte Rußspuren. Vom Membranfilter führte die Leitung mit nur 2 mm Innendurchmesser in den Meßgeräteraum. Dort wurde der Mengenstrom über den Strömungsmesser s bestimmt und mit dem Nadelventil v hinter der Membranpumpe n eingestellt. Die Drossel t hielt Schwingungen der Pumpe vom Strömungsmesser fern.

Das Gas strömte nacheinander durch die Infrarot-Gasanalytoren w und x (URAS der Fa. Hartmann & Braun). Im Gerät w konnte der Propangehalt zwischen 0 und 100 Vol% bestimmt werden, im Gerät x der  $\text{CO}_2$ -Gehalt zwischen 0 und 10 Vol%. Danach wurde das Gas durch eine Perlflasche als Flammenrückschlagsicherung geleitet und in dem Brenner z verbrannt. Die Anzeigen der Gasanalytoren wurden mit einem Kompensations-Mehrfach-Punkt-drucker S aufgezeichnet.

Bei den Temperaturmessungen wurde in die Sonde ein Thermoelement eingeführt. Die freien Drahtenden waren mit Asbestschnur isoliert. Die Thermospannung wurde mit einem Kompensationslinienschreiber aufgezeichnet.

Die Rauchgase wurden aus dem Versuchsraum mit einem Gebläse abgesaugt. Die Frischluft strömte durch geöffnete Fenster ein. Die Tanks waren gegen Störungen durch den Luftwechsel abgeschirmt.

#### 4.3. MESSMETHODEN

##### 4.3.1. KONZENTRATIONSMESSUNG

Die Konzentration von Propan und Kohlendioxid wurde auf der Tankachse in Schritten von 0,1 d gemessen. Die Messung erfolgte ab 0,1 d über der Tankmündung stromaufwärts, bis sich keine merkliche Änderung der letzten Meßwerte mehr ergab.

Die isokinetische Absaugung bei 2 mm Sondeninnendurchmesser und 0,75 - 1,5 cm/s Gasgeschwindigkeit ergab für die kontinuierlich arbeitenden Gasanalysatoren zu geringe Durchsätze. Ein Absaugedurchmesser von 0,1 d wurde daher als gerade noch zulässig angesehen, um als örtlich zu bezeichnende Analysenwerte zu erhalten. Maximal wurden dann 3 l/h abgesaugt. Mit diesem Gasstrom wurden die Analysatoren geeicht. Dabei wurde die Quersensitivität des CO<sub>2</sub>-Analysators gegenüber Propan berücksichtigt. Der Absaugestrom wurde aus den jeweiligen Versuchsbedingungen ermittelt und mit einem Strömungsmesser überwacht.

#### 4.3.2. TEMPERATURMESSUNG

Vorversuche zeigten, daß die Verbrennung bei dem Tank mit  $d = 25,8$  cm Durchmesser am weitesten in das Tankinnere vordringt. Die Temperaturmessungen wurden daher ausschließlich an diesem Tank mit den Gasgeschwindigkeiten  $0,75$  cm/s,  $1,0$  cm/s und  $1,5$  cm/s vorgenommen. Entsprechend den Konzentrationsmessungen wurde in Schritten von  $0,1 \cdot d$  Abstand gemessen, beginnend  $0,1 \cdot d$  oberhalb der Tankmündung, bis sich stromaufwärts keine merkliche Änderung der letzten Meßwerte mehr ergab.

Die Konzentrationsmessung wurde, wegen ihres durch die geringe Absaugeschwindigkeit bedingten Zeitaufwandes, auf die Tankachse beschränkt. Die einfachere Temperaturmessung gestattete die Erfassung eines Punktfeldes im gesamten interessierenden Tankraum.

Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Temperatur über einen längeren Zeitraum wurden außer der zeitlich mittleren Temperatur am Meßort noch die Temperaturschwankungen nach Amplitude und Frequenz sichtbar.

#### 4.3.3. FLAMMENLÄNGENMESSUNG

Fotografische Aufnahmen eignen sich zur Flammenlängenbestimmung. Da die Flammenspitze ständig schwankte, wurde in Vorversuchen geklärt, daß eine Verlängerung der Belichtungszeit über  $20$  s keine Steigerung der Flammenlänge brachte. Mit dieser Belichtungszeit wurde gearbeitet.

Um einen möglichst großen Froudezahlen-Bereich bei den Messungen zu überstreichen, wurde die Gasgeschwindigkeit bei den Tanks mit 8,6 cm und 12,9 cm Durchmesser auf 7 cm/s bzw. 6 cm/s gesteigert. Die beiden größeren Tanks wurden im Bereich von 0,75 cm/s bis 1,5 cm/s untersucht.

#### 4.4. MESSERGEBNISSE

##### 4.4.1. KONZENTRATIONSMESSUNG

Die Bilder 4.-3 bis 4.-6 zeigen den Verlauf der zeitlichen Mittelwerte der Konzentrationen auf der Tankachse. Dabei ergibt sich, daß auch in Nähe des Tankbodens die Konzentrationen von Propan und Kohlendioxid nicht ganz zu 100 Vol% bzw. 0 Vol% werden. In diesem Bereich kommen vereinzelte Reaktionen vor, wie die späteren Temperaturmessungen zeigen. Der Anteil kann mit höchstens 3 % des maximalen Meßwertes für diese ersten Messungen zunächst vernachlässigt werden. Der Kurvenverlauf erschwert aber die gewünschte Aussage über den Flammenanfang im Tank.

Als Ort der ersten stromauf eintretenden Verbrennung wird daher der Schnittpunkt der Verlängerung des geraden Kurventeils mit der Linie 100 Vol% Propan bzw. 0 Vol% Kohlendioxid erklärt. Diese Punkte sind eingezeichnet. Innerhalb der Meßgenauigkeit stimmen die extrapolierten Punkte für beide Gase überein.

Weiter fällt auf, daß die geraden Kurventeile für jeden Tankdurchmesser unabhängig von der Gasgeschwindigkeit eine bestimmte Steigung aufweisen. Eine Erhöhung der Gasgeschwindigkeit bewirkt

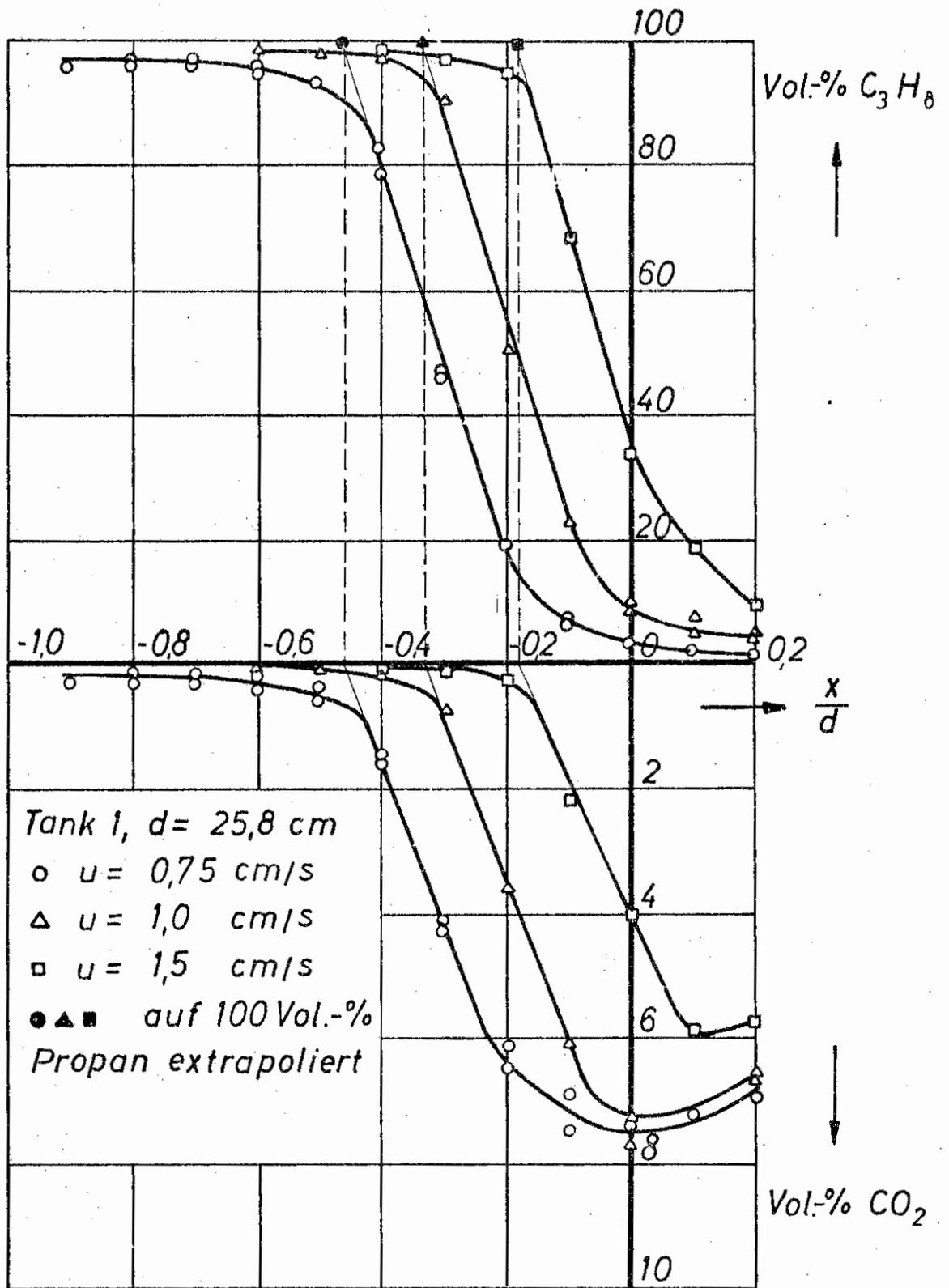


Bild 4.-3: Propan- und Kohlendioxid-Konzentration in dem Tank mit 25,8 cm Innendurchmesser. Extrapolation auf 100 Vol-% Propan und 0 Vol-%  $CO_2$ . Übereinstimmung der Ergebnisse der Extrapolationen (gestrichelt).

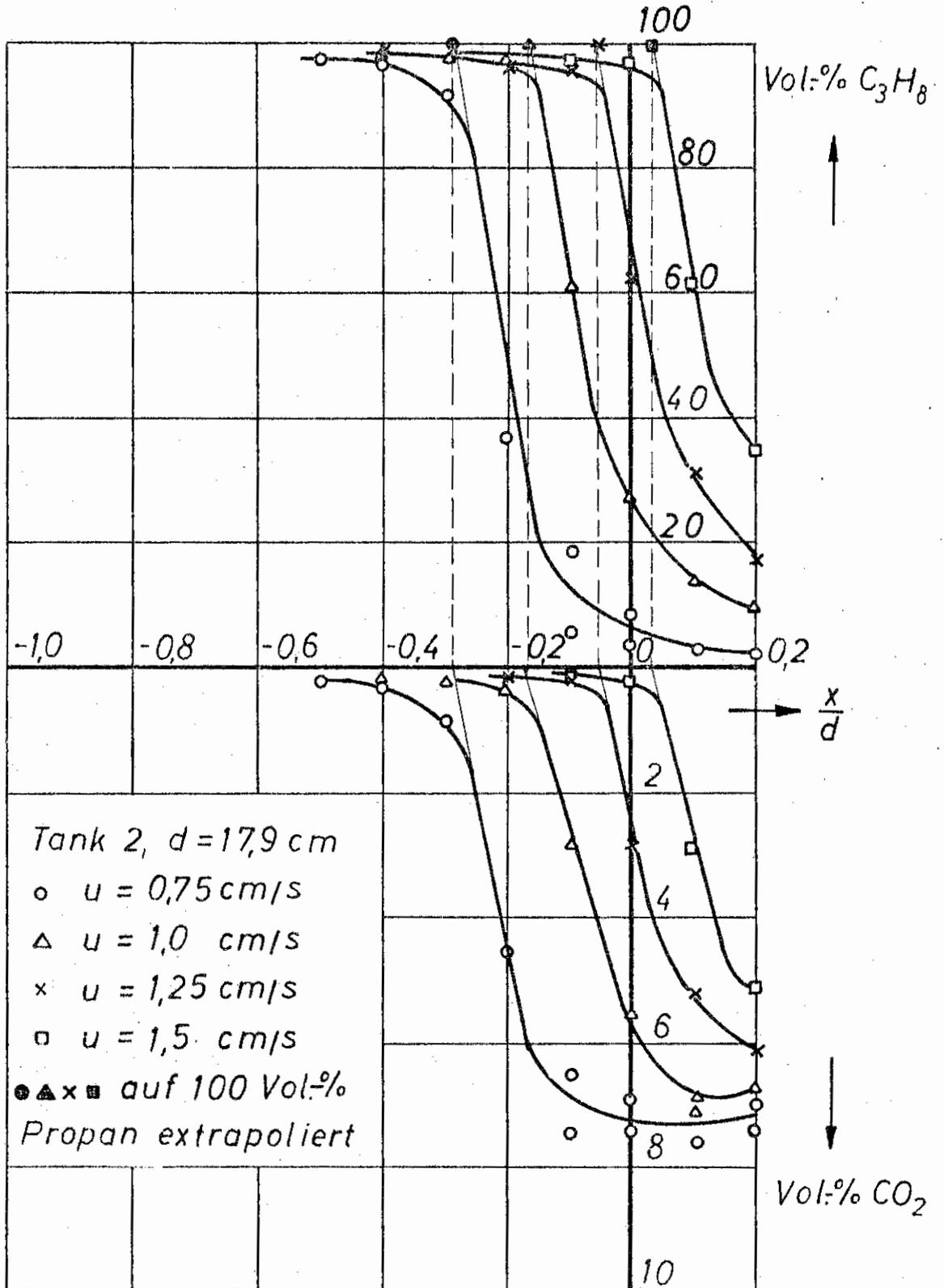


Bild 4.-4: Propan- und Kohlendioxid-Konzentration in dem Tank mit 17,9 cm Innendurchmesser. Extrapolation auf 100 Vol-% Propan und 0 Vol-%  $\text{CO}_2$ . Übereinstimmung der Ergebnisse der Extrapolationen (gestrichelt).

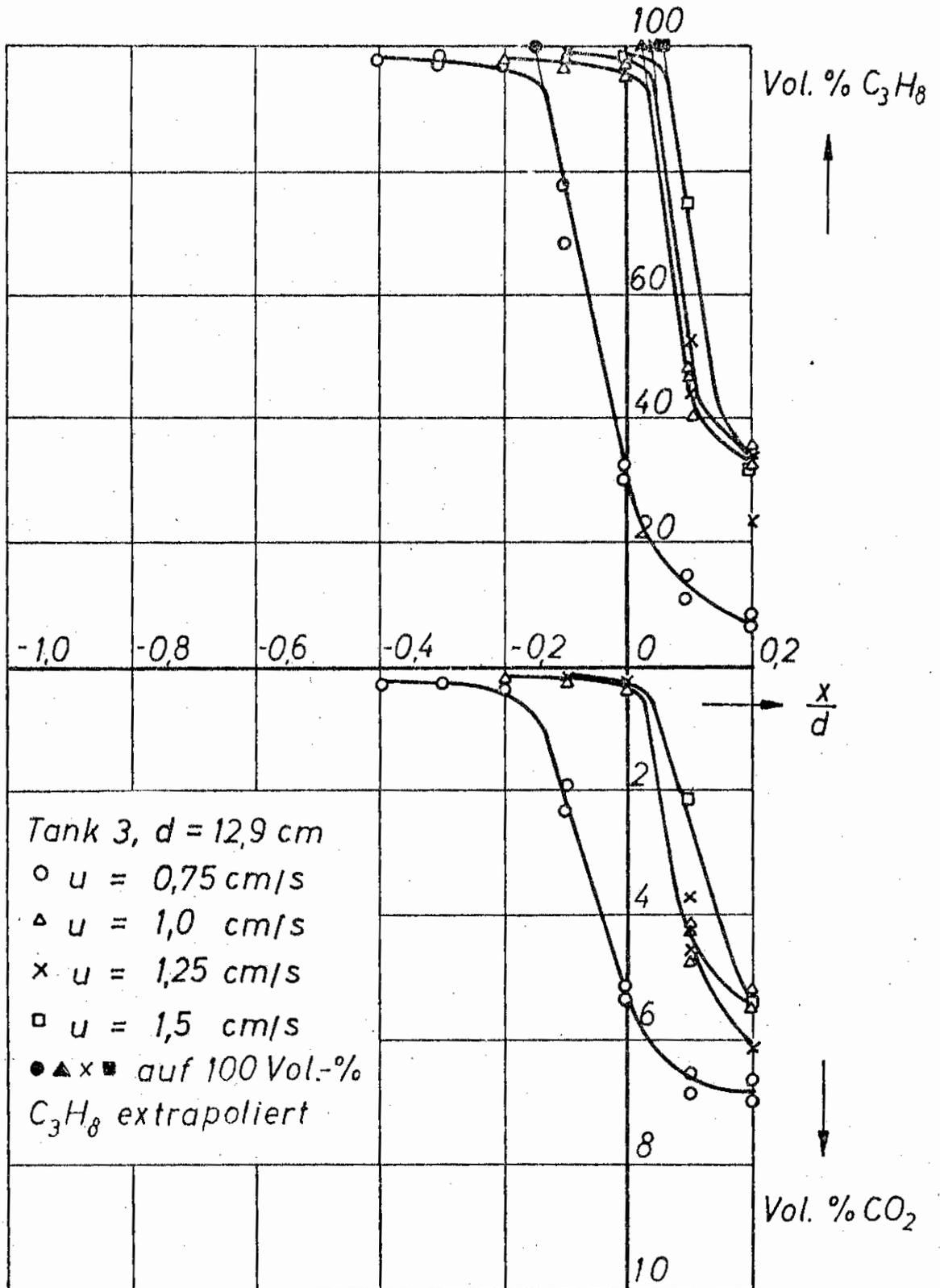


Bild 4.-5: Propan- und Kohlendioxid-Konzentration in dem Tank mit 12,9 cm Innendurchmesser. Extrapolation auf 100 Vol.-% Propan. Sichtbares Zusammenrücken der Meßkurven im positiven  $x/d$ -Bereich.

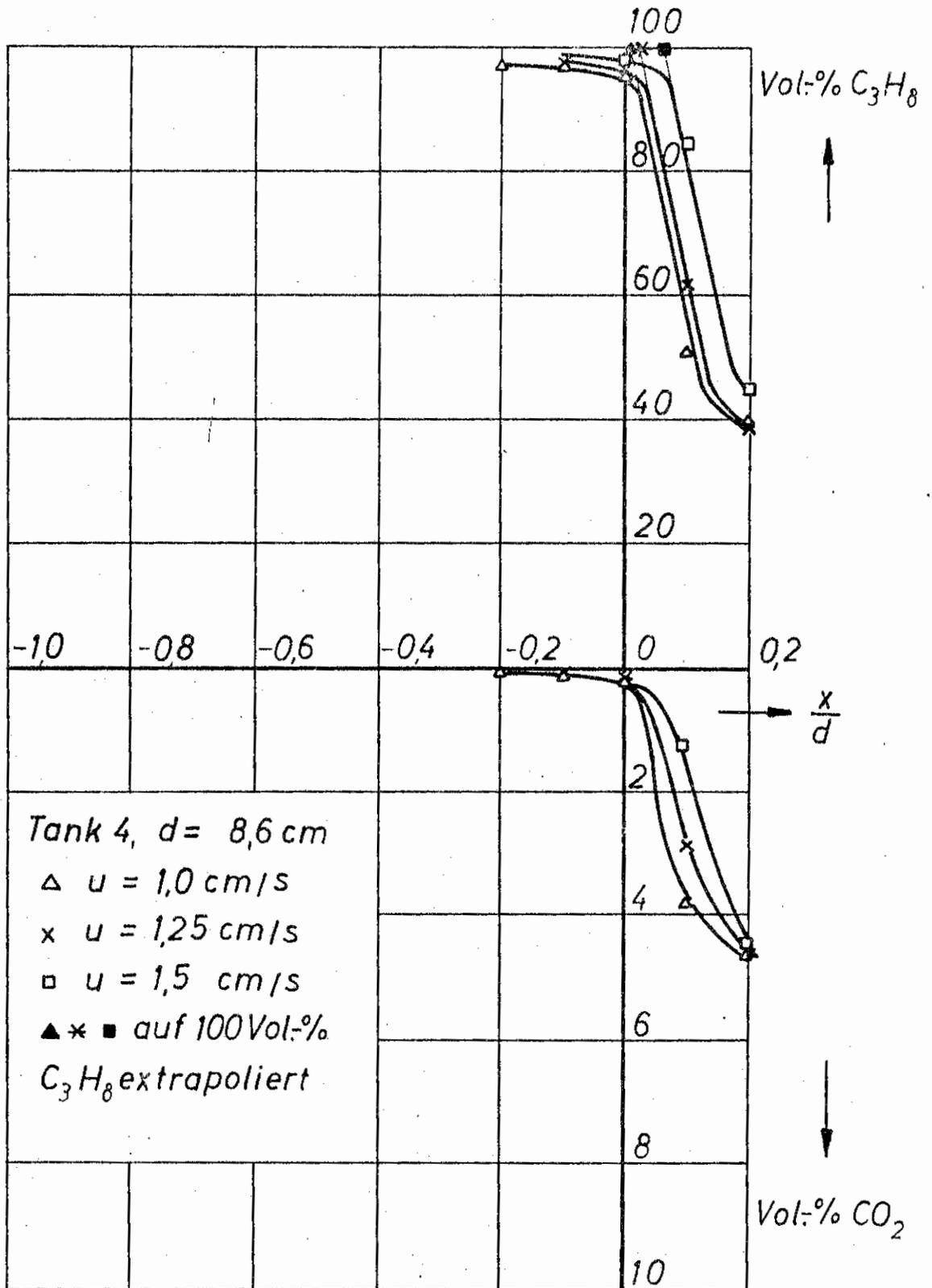


Bild 4.-6: Propan- und Kohlendioxid-Konzentration in dem Tank mit 8,6 cm Innendurchmesser. Extrapolation auf 100 Vol-% Propan. Geradliniger Teil der Meßkurven ausschließlich im positiven  $x/d$ -Bereich und stark zusammengedrängt.

lediglich eine Verschiebung der Meßkurven zu größeren  $x/d$ -Werten hin, also eine Verschiebung der unteren Verbrennungszone in Richtung Tankmündung. Beim kleinsten Tank brannten alle Flammen oberhalb der Tanköffnung, ebenso bei den mittleren Tanks bei höheren Gasgeschwindigkeiten.

Oberhalb der Tankmündung (positiver  $x/d$ -Bereich) ist der Abstand der Kurven kleiner als im Tankinneren (negativer  $x/d$ -Bereich). Dies folgt aus der besseren Mischung der Brenngase mit Luft oberhalb der Tanköffnung.

In Tafel 4.-3 sind die Ergebnisse der Konzentrationsmessung von Propan zusammengefaßt.

Bild 4.-7 zeigt den Ort der einsetzenden Verbrennung im Tankinneren in Abhängigkeit von Tankdurchmesser und Gasgeschwindigkeit. Die Meßpunkte ordnen sich für  $x/d < 0$  nach Gasgeschwindigkeiten auf Geraden. Es zeigt sich eine Abhängigkeit der unteren Flammenzone von Tankdurchmesser und Gasgeschwindigkeit. Mit zunehmendem Tankdurchmesser nimmt die Auftriebskraft der Flamme zu, und die Luftansaugung steigt. Bei konstanter Gasgeschwindigkeit dringt dann die Flamme tiefer in den Tank. Bei konstantem Tankdurchmesser und steigender Gasgeschwindigkeit wächst die Auftriebskraft ebenfalls. Der zunehmenden Luftansaugung steht dann aber ein größerer Brennstoffstrom entgegen, und die Flamme brennt näher an der Tankmündung aus.

Bild 4.-8 zeigt diese Abhängigkeit der bezogenen Eindringtiefe von Gasgeschwindigkeit und Tankdurchmesser. Die der Darstellung zugrunde liegende physikalische Gesetzmäßigkeit ist im einzelnen noch unbekannt. Das Bild ist daher nur für die vorliegenden Messungen gültig. Gleiches gilt für die daraus abgeleitete Gleichung

$$\frac{x}{d} = E_1 \frac{u}{d} - E_2 \quad (4.-1)$$

Tafel 4.-3: Zusammenstellung der wichtigsten Daten der Konzentrationsmessung (Propan)

d	u	Erste Verbrennung stromab	x/d	x	Steigung der Propankurven im geradlinigen Teil $dc_p/d(x/d)$	Re	Fr	Ar
[cm]	[cm/s]	-	-	[mm]	[Vol-%]	-	-	-
					[Vol-%/mm]			
25,8	0,75	-0,45	-116	320	1,25	521	$2,22 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^5$
25,8	1,0	-0,33	-85	320	1,25	696	$4 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^4$
25,8	1,5	-0,19	-49	320	1,25	1045	$9 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^4$
17,9	0,75	-0,29	-52	570	3,2	362	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^4$
17,9	1,0	-0,16	-28,6	570	3,2	484	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^4$
17,9	1,25	-0,05	-9	570	3,2	604	$8,9 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^4$
17,9	1,5	+0,04	+7,2	570	3,2	725	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^4$
12,9	0,75	-0,14	-18	450	3,5	361	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^4$
12,9	1,0	+0,03	+3,9	710	5,5	348	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^4$
12,9	1,25	+0,04	+5,2	710	5,5	435	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$2,13 \cdot 10^4$
12,9	1,5	+0,06	+7,7	710	5,5	522	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^4$
8,6	1,0	+0,015	+1,3	465	5,4	232	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^4$
8,6	1,25	+0,02	+1,7	465	5,4	290	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^4$
8,6	1,5	+0,07	+6,2	465	5,4	348	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^3$

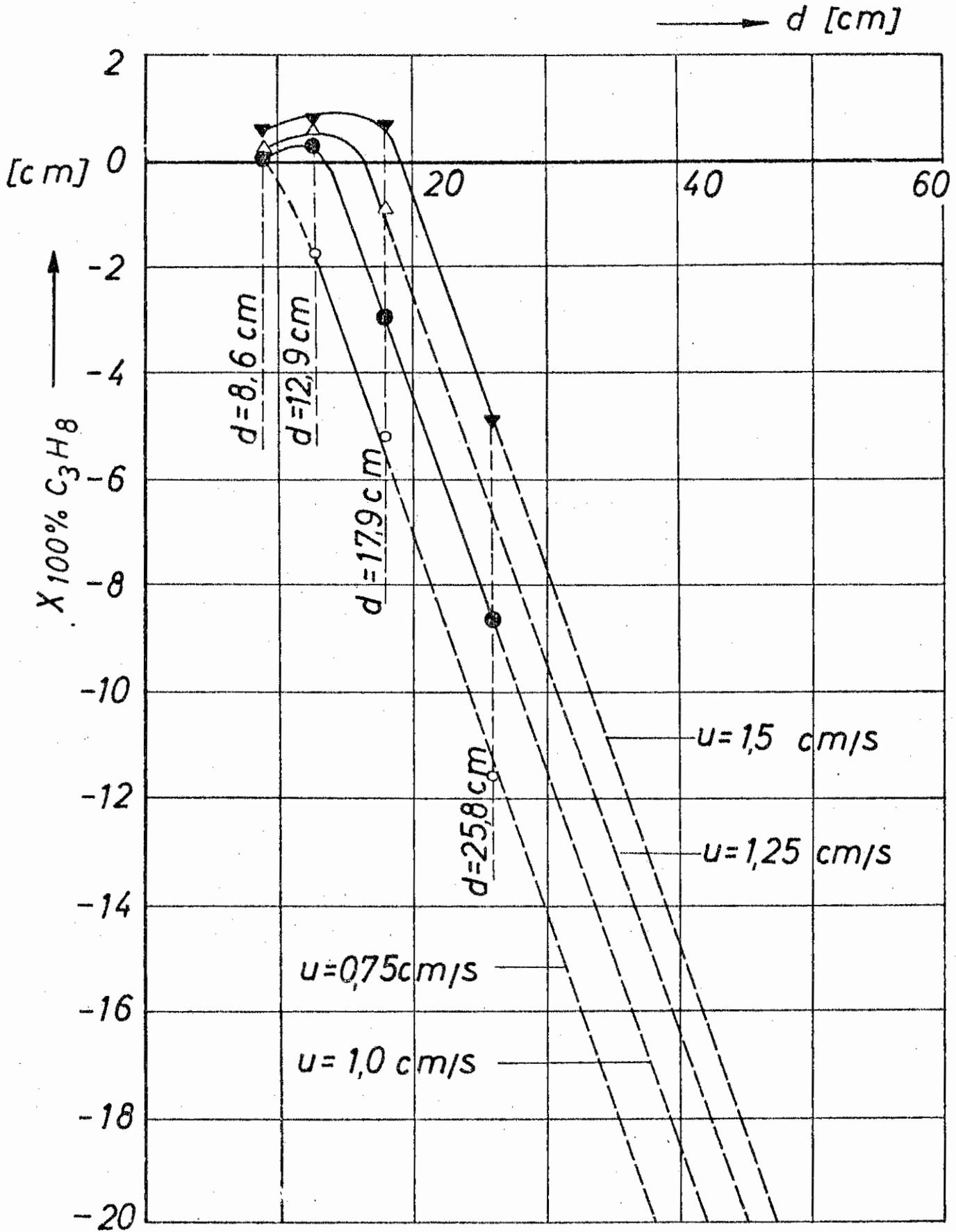


Bild 4.-7: Orte der einsetzenden Verbrennung, aufgetragen über Tankdurchmesser und Abstand von der Tankmündung. Die aus der Konzentrationsverteilung von Propan (extrapolierte Punkte) gewonnenen Werte ordnen sich unterhalb der Tankmündung nach Gasgeschwindigkeiten auf Geraden.

mit  $E_1 = 9,863 \text{ s}$  und  $E_2 = 0,72$ . Die Dimension von  $E_1$  zeigt deutlich die Einflußnahme noch unbekannter Größen.

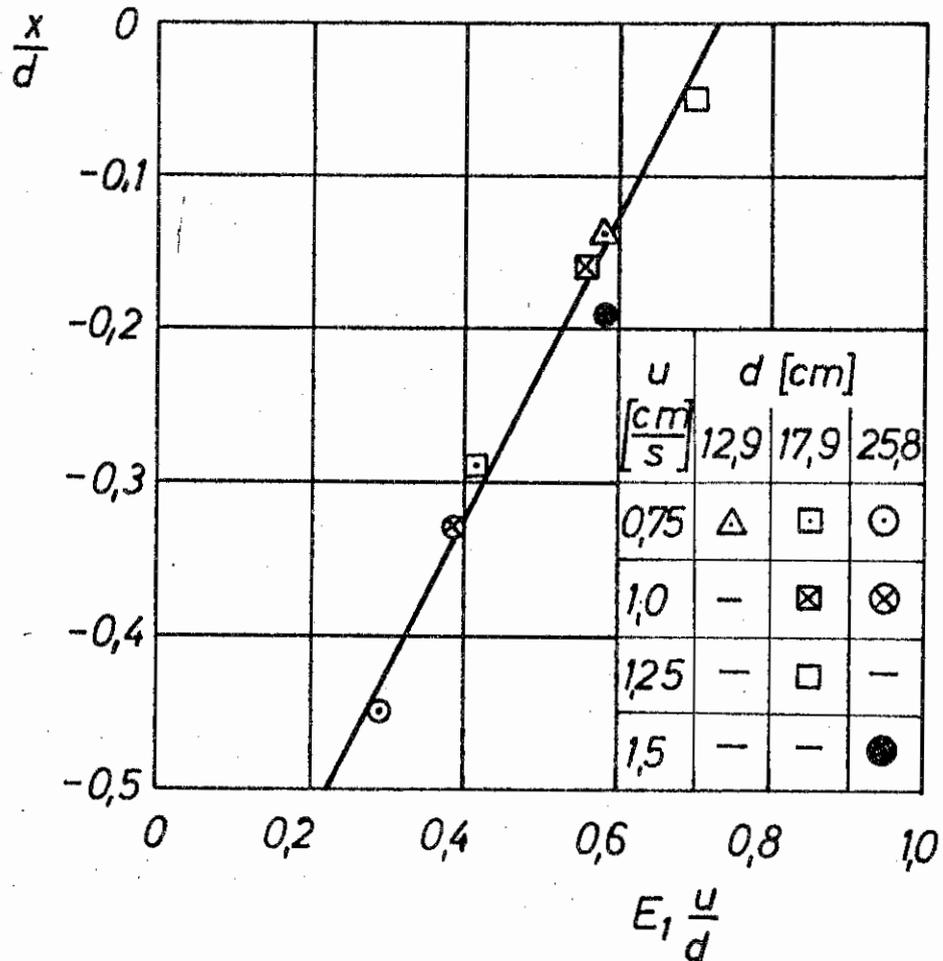


Bild 4.-8: Die in Bild 4.-7 gezeigten Meßwerte für 100 Vol-% Propan (Extrapoliert) unterhalb der Tankmündung lassen sich bei der dargestellten Wahl der Koordinaten unabhängig von Tankdurchmesser und Gasgeschwindigkeit auf einer Geraden ordnen.

In Bild 4.-9 ist die bezogene Eindringtiefe der Flamme über der Archimedes-Zahl für die beiden Tankdurchmesser mit wesentlicher Verbrennung im Inneren aufgetragen. Mit steigendem Verhältnis Auftriebskraft/Trägheitskraft wächst die Luftansaugung in das Tankinnere.

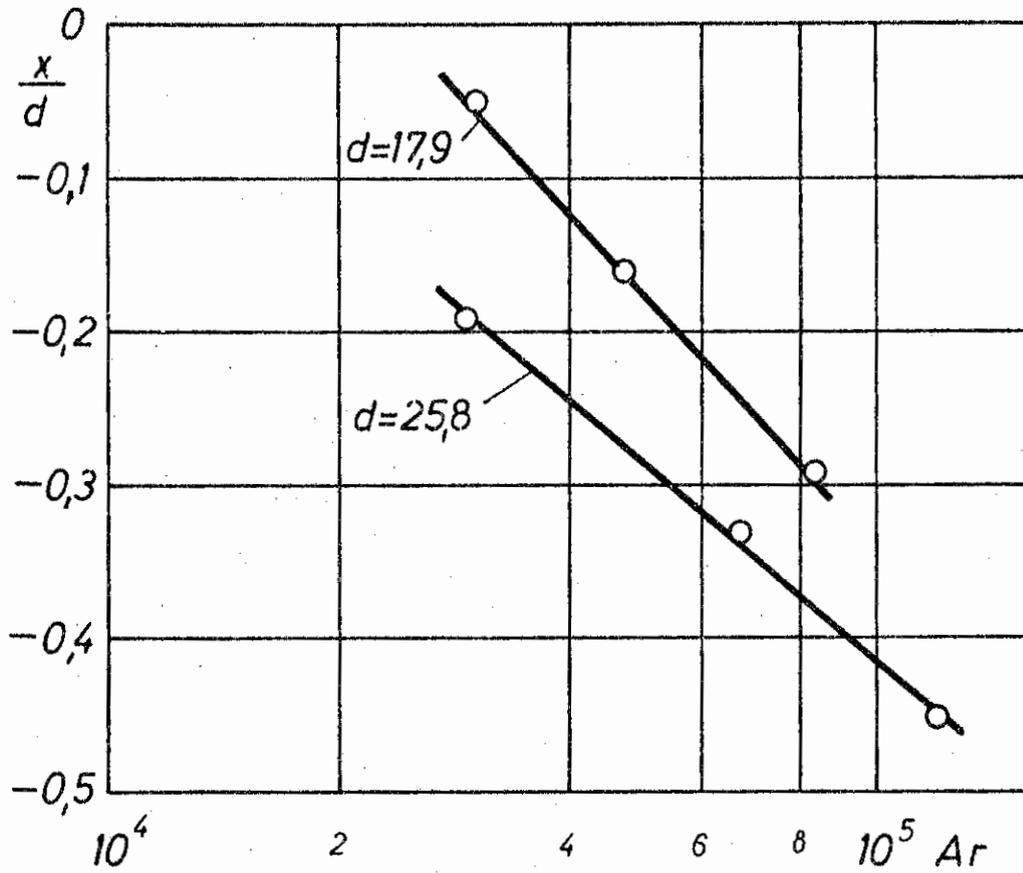


Bild 4.-9: Untere Flammenfront als Funktion der Archimedes-Zahl

#### 4.4.2 TEMPERATURMESSUNG

Für jeden Meßpunkt wurde der Temperaturverlauf über durchschnittlich 5 min aufgezeichnet. So ergaben sich Werte für die erste Reaktion im Tank, über die mittlere zeitliche Temperatur und die Temperaturschwankungen nach Amplitude und Frequenz.

#### 4.4.2.1 UNTERE FLAMMENZONE IM TANK

Beim Übergang des Thermoelementes von der kalten Gaszone über dem Tankboden in die Verbrennungszone zeigte sich ein deutlicher Temperaturanstieg. Ebenfalls zeigten sich in der kalten Gaszone in längeren Zeitabständen einzelne Temperaturspitzen. Auf diese Einzelreaktionen wurde schon der Kurvenverlauf der Konzentrationsmessung in der Frischgaszone zurückgeführt. Diese Sonderfälle wurden dadurch ausgeschaltet, daß als Flammenboden der Bereich festgelegt wurde, in dem während 20 - 30 % der Meßdauer Temperaturspitzen über dem Grundpegel lagen.

Bild 4.-10 zeigt den so definierten Verbrennungsbeginn über dem Tankquerschnitt. Gleichfalls eingetragen sind die aus den Propanmessungen extrapolierten Punkte. Wegen ihrer Herleitung aus dem geraden Kurventeil liegen sie näher zur Tankmündung.

Die Kurven sind für die einzelnen Gasgeschwindigkeiten ähnlich. Die über den Tankrand einströmende Umgebungsluft dringt auf der Tankachse am weitesten vor. Dies ist die Folge der Ansaugung durch die aus dem Tank aufsteigende Konvektionssäule von etwa halben Tankdurchmesser (Bild 4.-21 bis 4.-23).

Zu der in Abschnitt 4.4.1 aufgezeigten Abhängigkeit der Eindringtiefe von Tankdurchmesser und Gasgeschwindigkeit kommt daher noch die Veränderung mit dem Abstand von der Tankachse. Allerdings ist die Wölbung des Flammenbodens nicht groß.

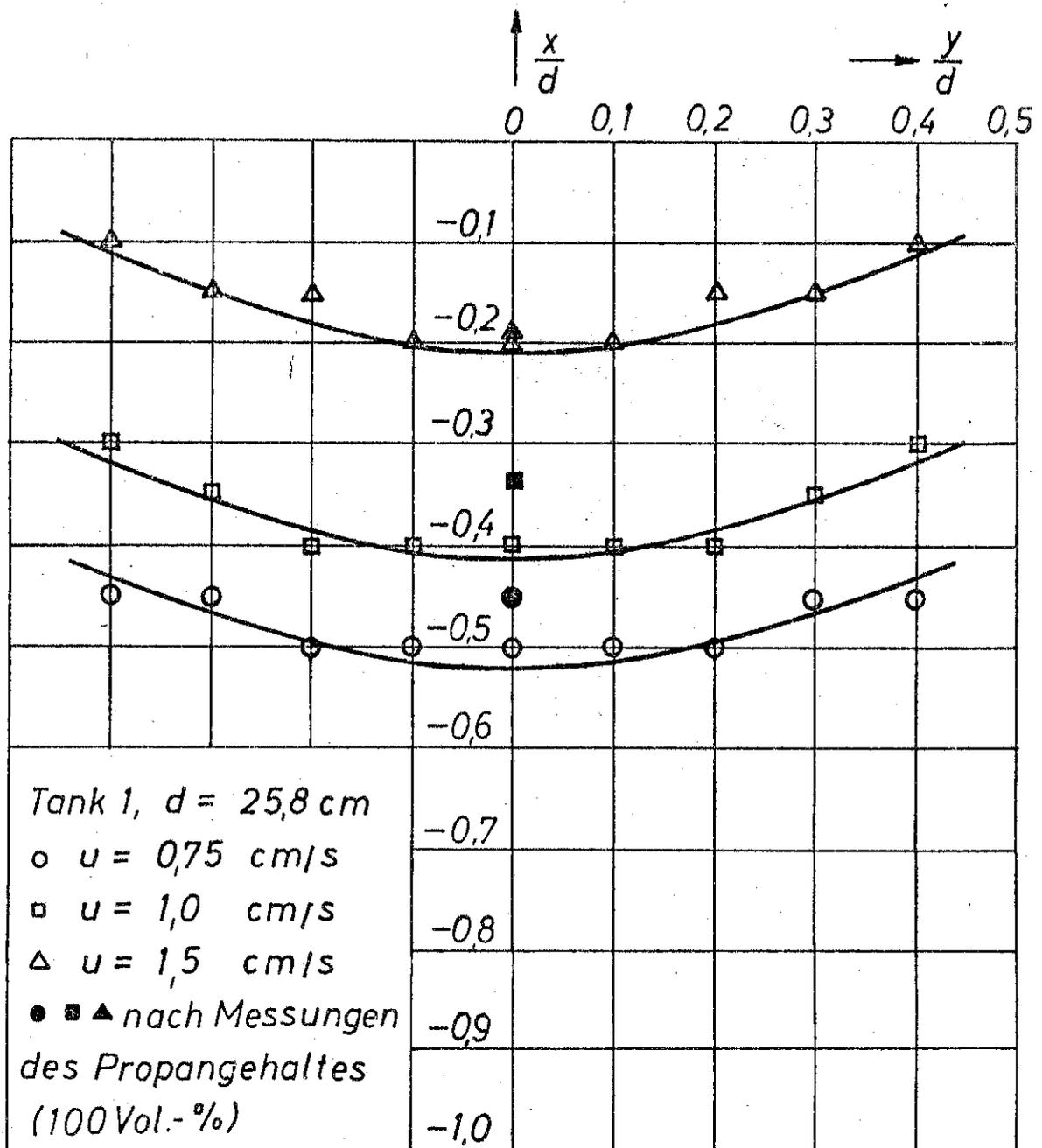


Bild 4.-10: Durch Temperaturmessung ermittelte untere Verbrennungsfront im Tank von 25,8 cm Innendurchmesser. Eingezeichnet sind ferner die aus der Konzentrationsmessung extrapolierten Punkte für 100 Vol.-% Propan auf der Tankachse.

#### 4.4.2.2 TEMPERATUREN IM ZEITLICHEN MITTEL

Aus den aufgezeichneten Temperaturschwankungen wurde ein zeitlicher Mittelwert abgeschätzt und in Bild 4.-11 über dem Tankradius aufgetragen. Wegen der schwierigen Abschätzung bei den z.T. erheblichen Schwankungen sind die angegebenen Werte unsicher und gelten mit Vorbehalt. Typische Erscheinungen lassen sich aber ableiten.

Bis auf eine Ausnahme ( $u = 0,75$  cm/s,  $x/d = 0$  bzw.  $x/d = +0,1$ ) ordnen sich die mittleren Temperaturen so, daß die am weitesten stromab liegende Meßebene das höchste Temperaturniveau aufweist. Die Gasgeschwindigkeit beeinflusst das Temperaturniveau derart, daß bei niedrigster Gasgeschwindigkeit die höchsten Temperaturen auftreten. Hier macht sich die mit niedriger Gasgeschwindigkeit weiter in den Tank verlagerte Verbrennung bemerkbar, indem sie das Temperaturniveau der darüberliegenden Ebenen anhebt.

Allgemein zeigt sich in der Verbrennungszone ein Temperaturabfall zum Tankrand hin. Dieser Temperaturabfall kann auf geringeren Luftanteil und schlechtere Mischung zwischen Luft und Brennstoff in der Randzone zurückgeführt werden, da die Konvektionssäule die einströmende Luft zur Tankmitte hin ansaugt.

Die Konvektionssäule auf der Tankachse (Abschnitt 4.4.2.1) bewirkt in ihrem Bereich eine höhere Luftansaugung und bessere Mischung. In ihr sind daher die mittleren Temperaturen am höchsten und etwa konstant.

Unterhalb des Flammenbodens ist die Temperaturanzeige größtenteils auf Einstrahlung aus der Flamme zurückzuführen.

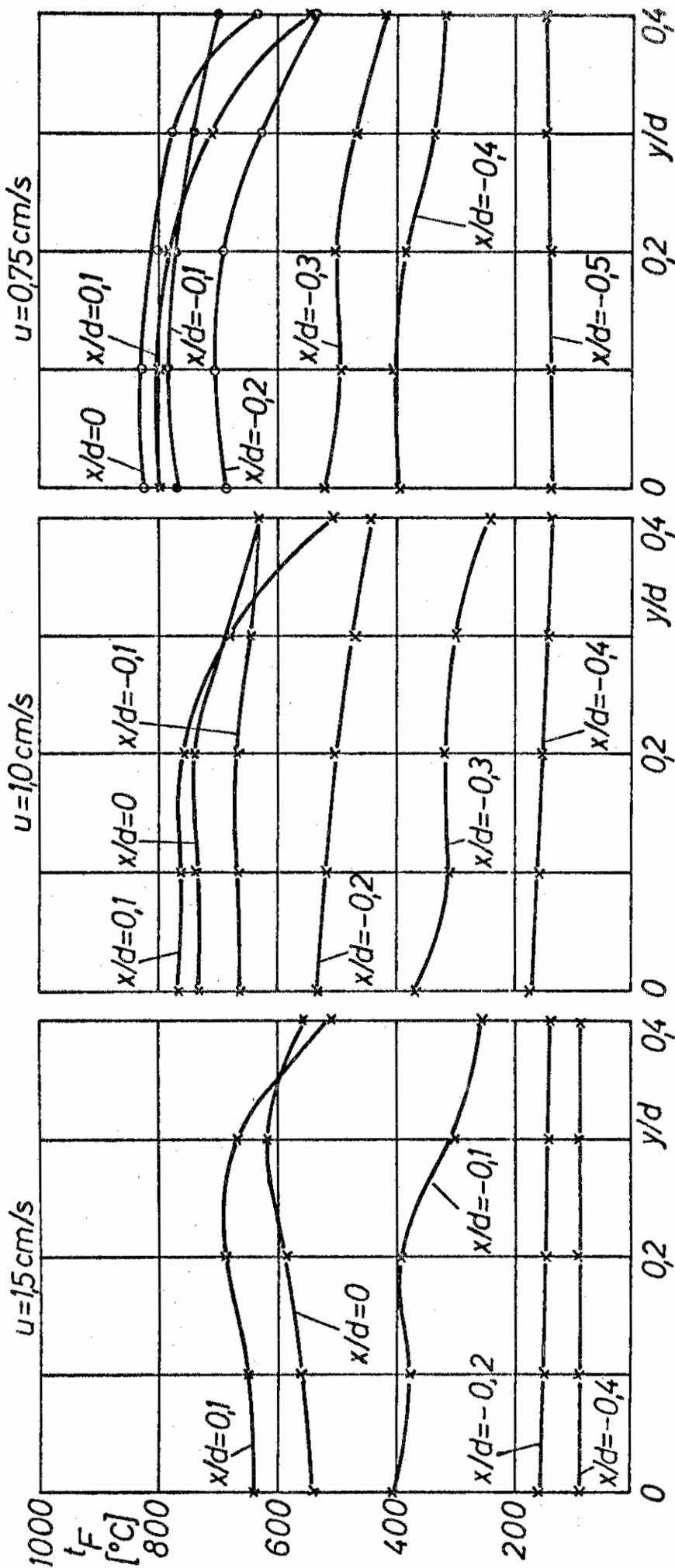


Bild 4.-11: Zeitliche Mittelwerte der Flammentemperatur aufgetragen über der dimensionslosen Querkoordinate. Parameter ist die jeweilige Mezebene. Tankdurchmesser 25,8 cm.

#### 4.4.2.3 SCHWINGUNGSBREITE DER TEMPERATURSCHWANKUNGEN

Die kontinuierlich aufgezeichneten Temperaturen zeigten im Bereich der Verbrennungszone rasch aufeinanderfolgende Schwankungen. Die Schwankungen bewegten sich bis auf einige Meßwerte zwischen zwei Temperaturniveaus, die jeweils vom Meßort abhängig waren.

Diese seltenen Einzelreaktionen wurden berücksichtigt, indem das obere bzw. untere Temperaturniveau nicht durch die äußersten Spitzen gelegt wurde. Jeweils 2 Spitzen oben und unten blieben unberücksichtigt (Bild 4.-12). Diese zunächst willkürliche Festlegung zeigte im Laufe der Auswertung ihre volle Berechtigung, da eine große Zahl weiterer Spitzen ganz in der Nähe der so gewonnenen Temperaturniveaus lag.

Bild 4.-13 zeigt das Ergebnis der Auswertung. Auch hier zeigen sich für die einzelnen Gasgeschwindigkeiten gemeinsame Merkmale:

Im Bereich der Tanköffnung finden sich die niedrigsten Schwingungsbreiten auf der Tankachse, die größten am Tankrand. Für die unteren Meßebenen kehrt sich die Erscheinung um. In einem mittleren Bereich ergeben sich konstante Schwingungsbreiten über den gesamten Tankdurchmesser.

Für die Meßebenen, in denen die Geraden gleichsinnig laufen, läßt sich für jeden Ort auf der Querkoordinate die größte Schwingungsbreite der kleinsten Gasgeschwindigkeit zuordnen und umgekehrt.

Die Kurven erklären sich aus dem Mischungsverlauf:

Die kalte Umgebungsluft strömt durch örtliche Turbulenzonen über den Tankrand in das Tankinnere. Das zeitliche Mittel der Temperatur liegt in dieser Zone bei etwa  $600^{\circ}\text{C}$ . Daher werden

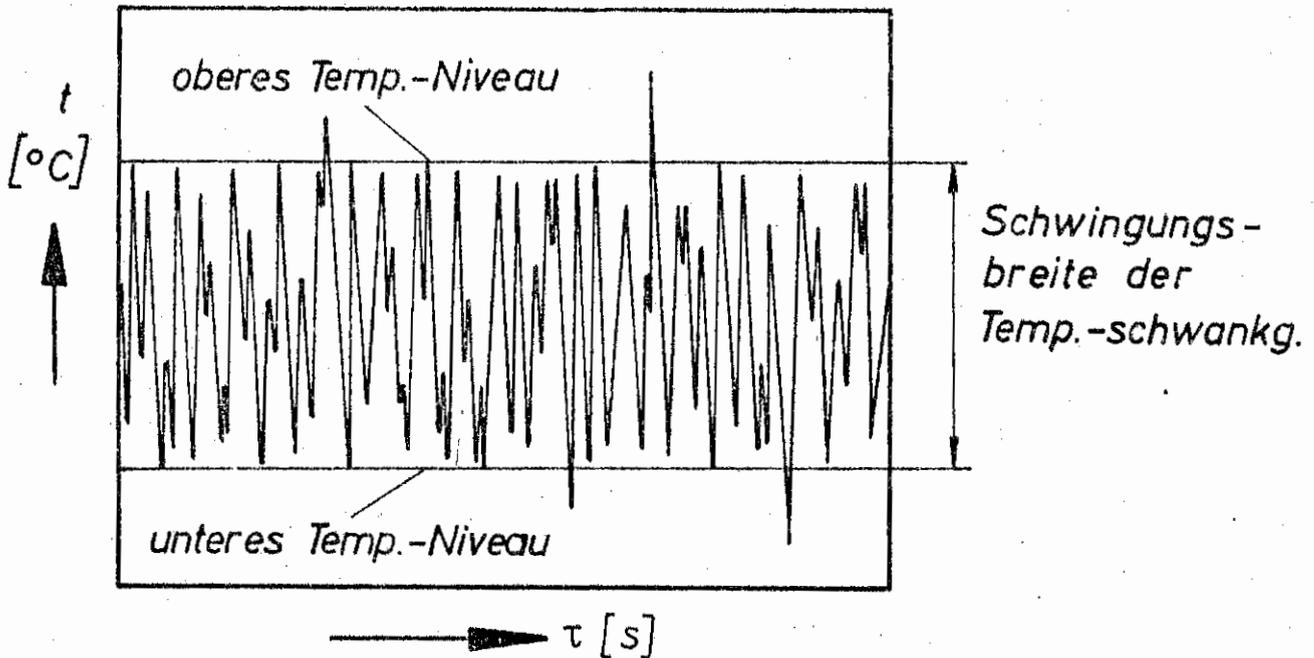


Bild 4.-12: Typische Temperaturlaufzeichnung. Für oberes und unteres Temperaturniveau wurden je zwei Spitzen, die zu seltenen Einzelreaktionen gehörten, nicht berücksichtigt. Die Frequenz wurde durch Auszählen der zum oberen Temperaturniveau weisenden Spitzen im Zeitraum von 1 Minute bestimmt.

die Temperaturabsenkungen hier durch eindringende kalte Luftballen verursacht.

Zu dem Flammenboden gelangt nur noch ein Bruchteil der eingedrungenen Luft. Das Temperaturmittel liegt hier bei  $180^{\circ}\text{C}$ . In dieser Zone bewirkt der aufsteigende, kalte Brennstoffstrom das Absinken der Temperaturen.

Die über den Tankrand einströmenden Luftballen mischen sich auf dem Wege zum Tankinneren mit Brennstoff und Rauchgas und wärmen sich dabei auf. Die größten Temperaturunterschiede liegen im Bereich der Tankmündung daher am Tankrand. Im Bereich des Flammenbodens sind die größten Schwingungsbreiten auf der Tankachse. Hier ist die größte Luftkonzentration also

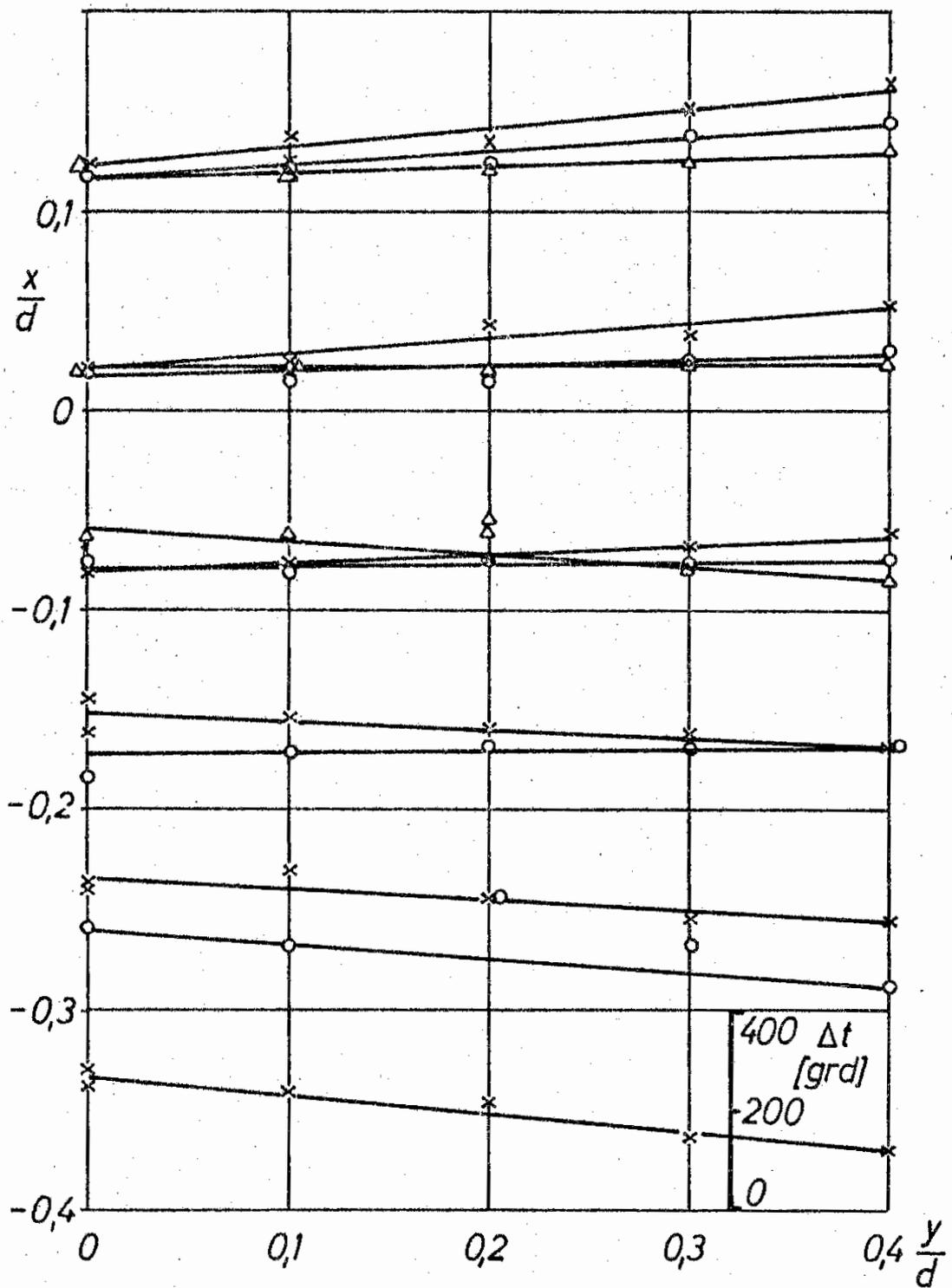


Bild 4.-13: Schwingungsbreiten der Temperaturschwankung.

Die Schwingungsbreiten sind für jede Meßebene über der dimensionslosen Querkoordinate aufgetragen.

$x = 0,75$  cm/s,  $o = 1,0$  cm/s,  $\Delta = 1,5$  cm/s Gasgeschwindigkeit.

auf der Tankachse. Dies zeigt bereits Bild 4.-10. Der Flammenboden reicht dort bei jeder Gasgeschwindigkeit auf der Tankachse am tiefsten in den Tank.

#### 4.4.2.4. FREQUENZ DER TEMPERATURSCHWANKUNG

Die aufgezeichneten Temperaturschwankungen zeigen einen gewissen regelmäßigen zeitlichen Verlauf. Daher wurde die Zahl der zu höheren Temperaturen zeigenden Temperaturspitzen in dem Zeitraum von einer Minute erfaßt (Bild 4.-12). Die Zählung erfolgte mindestens zweimal für jeden Feldpunkt. Die mit einem Papiervorschub von 40 mm/min registrierten Temperaturschwankungen ließen sich bei schneller Folge und kleiner Amplitude nicht immer gut auflösen. Aus einem Kontrollstreifen mit dem Vorschub 160 mm/min wurde durch Messung bei  $u = 1,0$  cm/s auf der Tankachse der Fehler der langsameren Aufzeichnung ermittelt. Es ergab sich, daß lediglich Schwingungsbreiten mit weniger als 10 grd Spitzenabstand unberücksichtigt bleiben.

Bild 4.-14 zeigt die Frequenz der Temperaturschwankung. Allen Gasgeschwindigkeiten und Meßebenen gemeinsam ist ein konstanter Frequenzverlauf im Bereich um die Tankachse. Eine Ausnahme ist der Flammenboden, wo die niedrigeren Frequenzen Folge des Reaktionsbeginns sind. Zum Tankrand fallen die Frequenzen ab. Übereinstimmend ist ferner für jede einzelne Gasgeschwindigkeit die zahlenmäßige Größe der Frequenz im waagerechten Kurventeil bis auf die Ebene  $x/d = +0,1$  bei  $u = 1,0$  cm/s.

Dagegen unterscheiden sich die Frequenzen deutlich für die einzelnen Gasgeschwindigkeiten. Es gehören die niedrigsten Frequenzen zu den größten Gasgeschwindigkeiten und umgekehrt.

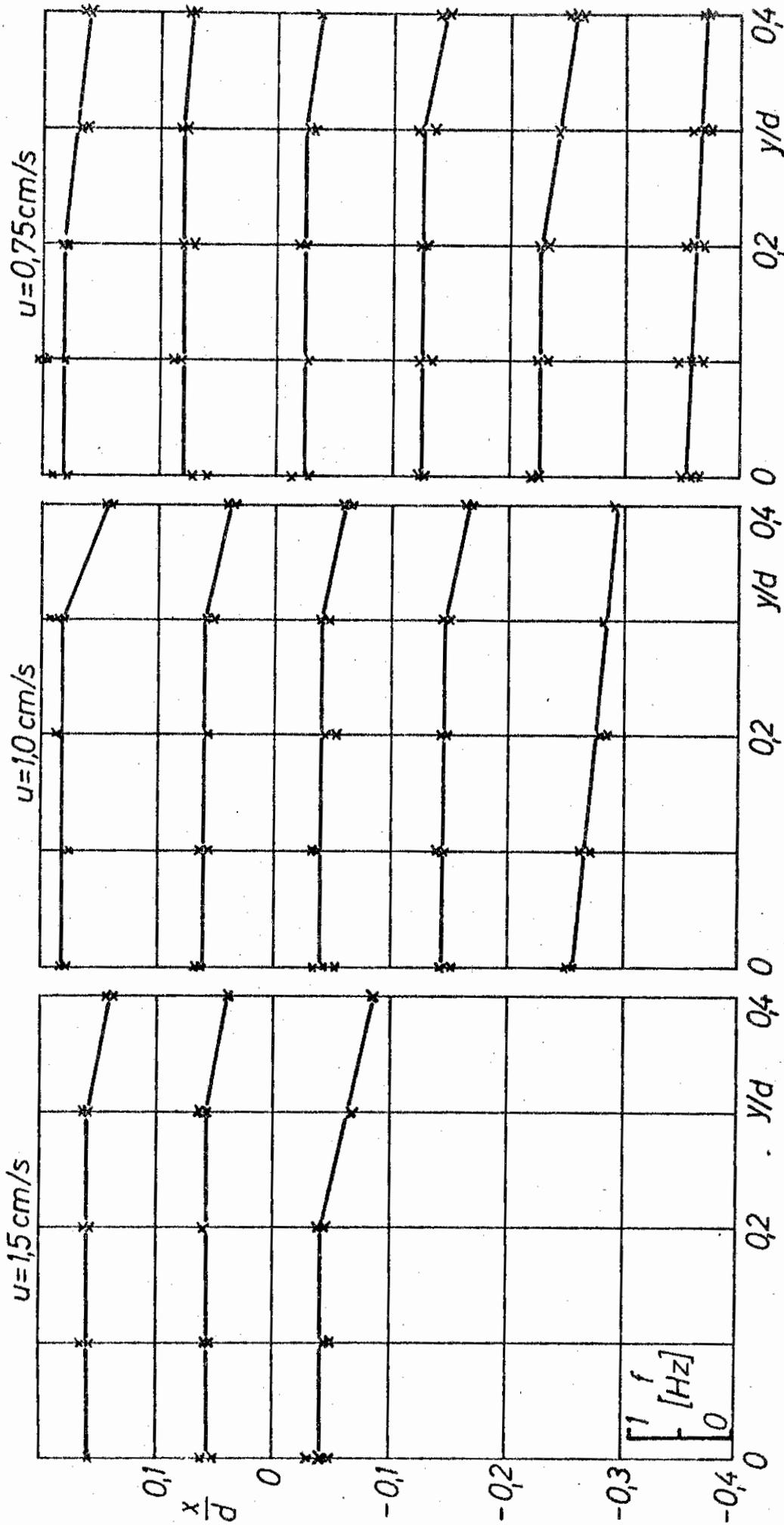


Bild 4.-14: Durchschnittliche Frequenz  $f$  der Temperaturschwankung. Die Frequenzen sind für jede Melebene über der dimensionslosen Querkoordinate aufgetragen. Tankdurchmesser 25,8 cm.

Die annähernde Übereinstimmung der radialen Ausdehnung der Konvektionssäule mit dem waagerechten Kurvenabschnitt scheint auf Zusammenhänge hinzudeuten.

Im einzelnen hängen die Frequenzen von Ballengröße, Ballengeschwindigkeit, Mischungs- und Ausbrandverlauf ab. Eine Deutung der Frequenzen ist noch nicht möglich. Als Ergebnis dieser Messungen kann der Nachweis der äußerst langsamen Mischung im Tankinneren angesehen werden.

#### 4.4.2.5. ERSCHEINUNGSBILD DER FLAMMEN

Bei sehr niedrigen Gasgeschwindigkeiten - kaum meßbarer Durchfluß - brannten die Flammen 25 cm unter der Tankoberkante auf dem Kiesbett. Es waren kleine Einzelflammen, die wahllos über dem Kiesbett verteilt waren und dort unregelmäßig ihre Stellung wechselten (Bild 4.-15).

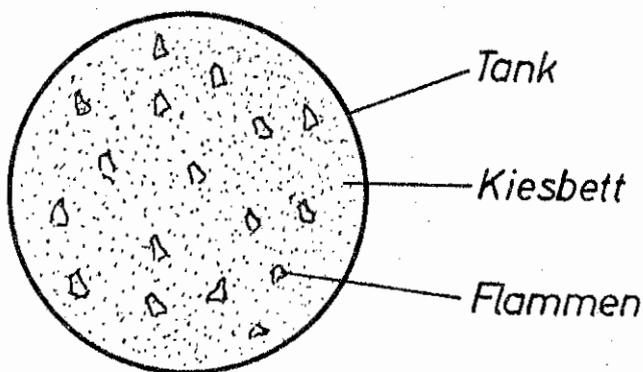


Bild 4.-15: Flammen auf dem Kiesbett bei sehr geringen Gasgeschwindigkeiten. Zahl und Lage der Flammen änderte sich regellos.

Bei einer Steigerung der Gaszufuhr wurden diese Flammen größer, vereinigten sich und erhoben sich vom Kiesbett. Sie füllten

den Tankquerschnitt aber nicht aus, sondern sammelten sich in einem Teil des Tanks und ließen den anderen fast völlig frei. So bildete sich innerhalb des Tanks ein Kamin für Rauchgase und ein weiterer für die Frischluftzufuhr (Bild 4.-16). Diese Anordnung rotierte regellos um die Tankachse.

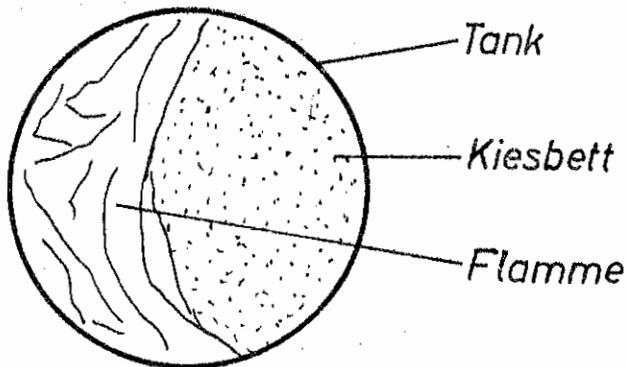


Bild 4.-16: Füllte die Flamme wegen zu geringer Gaszufuhr den Tank nicht aus, so bildete sich eine sichelförmige Flamme, die sich regellos um die Tankachse drehte.

Erst kurz unterhalb der Gasgeschwindigkeit  $0,75 \text{ cm/s}$  füllte die Flamme den Tankquerschnitt aus. Dabei stellten sich abhängig von Gasgeschwindigkeit und Tankdurchmesser charakteristische Erscheinungen im Bereich der Tankmündung ein. Da die Übergänge zwischen den Tanks fließend waren, genügt die Beschreibung für den kleinsten und größten Tankdurchmesser.

Der Tank von  $8,6 \text{ cm}$  Durchmesser zeigte bei allen Gasgeschwindigkeiten eine laminare Flammenfront, die am Tankrand begann. Bei der niedrigsten Gasgeschwindigkeit hatte die Flamme einen sternförmigen Querschnitt mit leuchtenden Wellenbergen. Diese Kontur ging mit höherer Gasgeschwindigkeit zunehmend verloren.

Die Flammenfront hatte bei niedrigen Gasgeschwindigkeiten Kegelform mit nach innen gekrümmter Mantellinie. Mit steigender Gasgeschwindigkeit wurde die Mantellinie gerade und wölbte sich dann nach außen. Bei der höchsten erreichbaren Gasgeschwindigkeit bildete die Flammenfront über dem Tankrand einen Zylindermantel. Er hatte die Länge von etwa  $1 d$  und war eine Verlängerung des Tankmantels.

Bei dem 25,6 cm Tank bildete sich bei keiner Gasgeschwindigkeit eine geschlossene Flammenfront. Vielmehr strebten vom Tankrand "Flammenfäden" der Tankmitte zu und bildeten dort eine Konvektionssäule. Deren Durchmesser wurde mit zunehmender Gasgeschwindigkeit kleiner. Mit sinkender Gasgeschwindigkeit reichten die Flammenfäden tiefer ins Tankinnere. Bei jeder Gasgeschwindigkeit zeigten sich zwischen den Flammenfäden deutlich Zonen ohne Verbrennungerscheinung.

Bei höheren Gasgeschwindigkeiten bildete sich am Tankrand ein "Flammenkragen". Er stellt den Beginn des laminaren Flammenkegels dar. Dieser konnte nicht eingestellt werden, da die Anlage bei dem größten Tank nur eine Gasgeschwindigkeit von 2 cm/s zuließ. Das Ende des Flammenkragens war deutlich nach innen gekrümmt, ein Zeichen für die Ansaugung der Konvektionssäule.

Oberhalb  $1 \cdot d$  bis  $2 \cdot d$  von der Tankmündung zeigte sich bei allen Gasgeschwindigkeiten und Tankdurchmessern ein gemeinsames Flammenbild. Es kam zu sichtbarer Turbulenz im gesamten Gasstrom. Dabei lösten sich brennende Ballen ab und "Tropfen" strömten aus der Flamme abwärts. Diese kleineren Brennstoffballen verlieren außerhalb der Strahlmitte ihre ohnehin geringe Geschwindigkeit, da der Auftrieb von der Erwärmung abhängt und nicht immer größer als das Gewicht ist.

Die folgenden fotografischen Aufnahmen (Bild 4.-17 bis 4.-24) geben ein anschauliches Bild der Erscheinung.

#### 4.4.2.6 FLAMMENLÄNGE

Bild 4.-25 zeigt die mit dem Tankdurchmesser  $d$  dimensionslos gemachte Flammenlänge  $L$  aufgetragen über der Froudezahl. Eingetragen ist ferner noch die Verlängerung der von HESS [29]

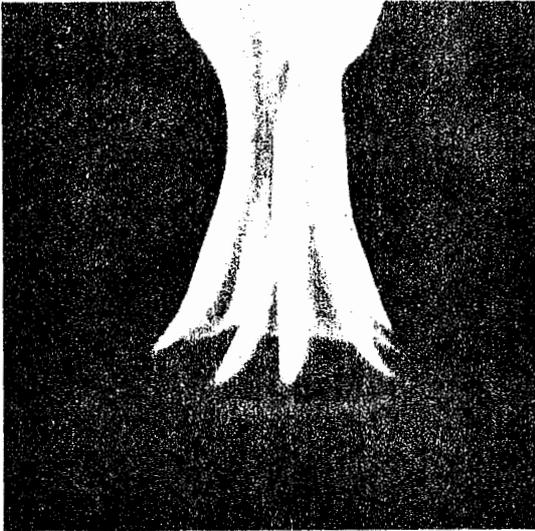


Bild 4.-17: Ausgeprägte Wellenberge und -täler, sternförmiger Querschnitt der Flamme. Nichtleuchtende Flammezone reicht bis Tankrand.  $d = 8,6$  cm,  $u = 0,75$  cm/s.

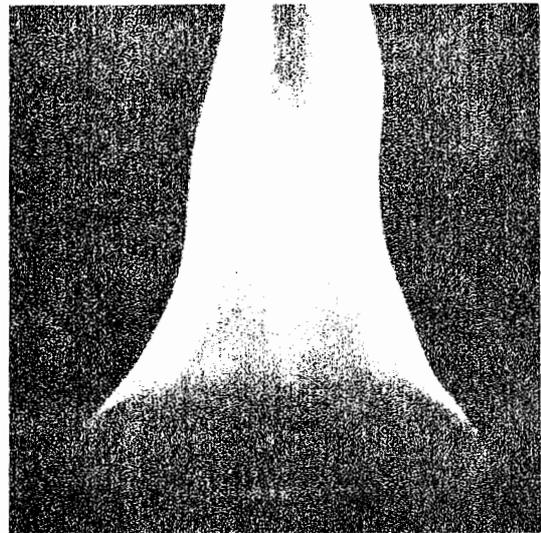


Bild 4.-18: Bei höherer Gasgeschwindigkeit kaum noch Wellenstruktur.  $d = 8,6$  cm,  $u = 1,5$  cm/s.



Bild 4.-19: Flammenfront über dem Tankrand weist kaum Wellenstruktur auf, bildet Kegel mit stark nach außen gekrümmter Mantellinie.  $d = 8,6$  cm,  $u = 5,0$  cm/s.



Bild 4.-20: Flammenfront über dem Tankrand zylindrisch. Ab etwa  $1d$  über dem Tankrand einsetzende Turbulenz.  $d = 8,6$  cm,  $u = 7,0$  cm/s.

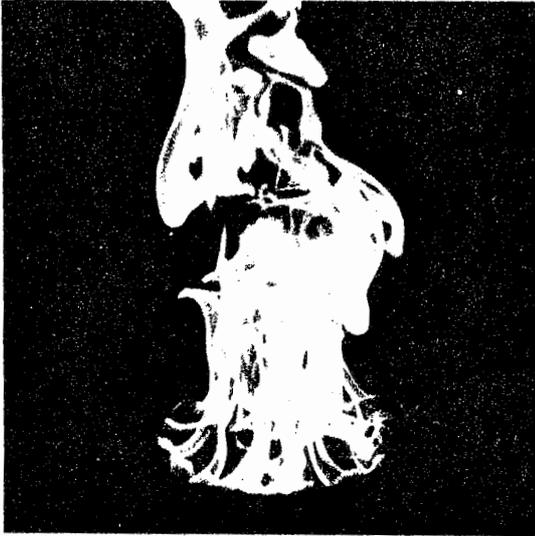


Bild 4.-21: "Flammenfäden" vom Tankrand streben zur Tankmitte und bilden Konvektionssäule. Verbrennung setzt unterhalb der Tankmündung ein. Aufgerissene Flammenfront.  $d = 25,8 \text{ cm}$ ,  $u = 0,75 \text{ cm/s}$ .

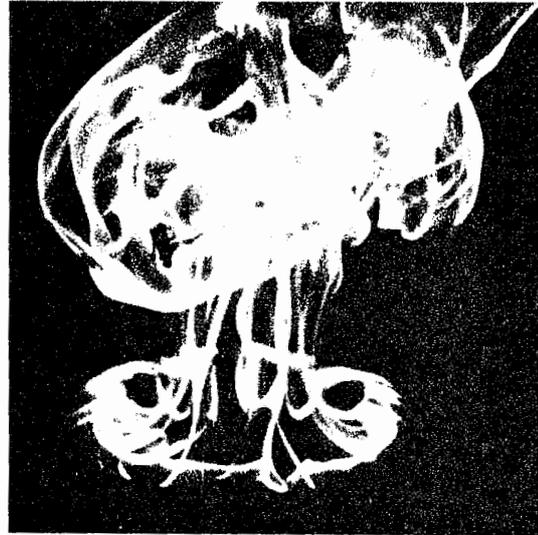


Bild 4.-22: Flammenfäden schließen sich am Tankrand zum "Flammenkragen", dem Beginn eines Flammenkegels zusammen. Einschnürung (Konvektionssäule) dicht oberhalb der Tankmündung auf  $1/2d$ . Zonen ohne Verbrennung in der Tankmündung.  $d = 25,8 \text{ cm}$ ,  $u = 1,0 \text{ cm/s}$ . Krümmung des Flammenkragens durch Ansaugung der Konvektionssäule.

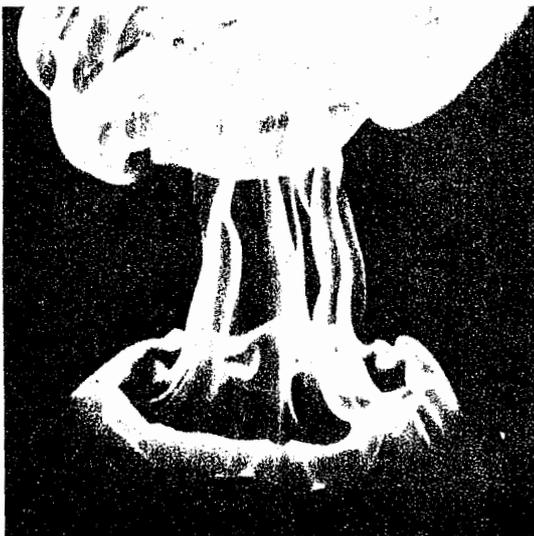


Bild 4.-23: Deutliches Bild des Flammenkragens, der Flammenfäden, der starken Einschnürung (Konvektionssäule) und der nachfolgenden Aufweitung.  $d = 25,8 \text{ cm}$ ,  $u = 1,5 \text{ cm/s}$ .

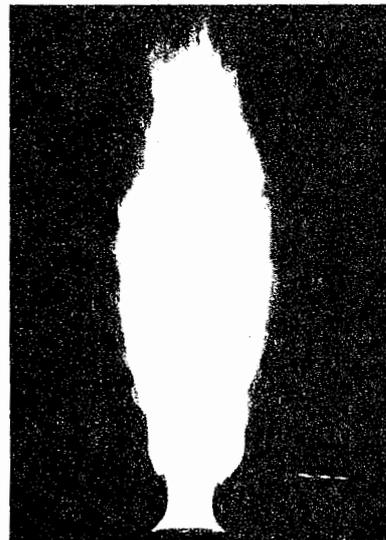


Bild 4.-24: Langzeitaufnahme (20 s) der aus dem  $8,6 \text{ cm}$ -Tank brennenden Flamme bei  $1,0 \text{ cm/s}$  Gasgeschwindigkeit. Deutlich getrennt sind laminarer und turbulenter Teil der Flamme. Die Flammenkontur im turbulenten Teil stellt die Hüllkurve der kurzfristigen Flammenschwankungen dar.

gefundenen Geraden (a) für Propanflammen mit Ballenablösung. Die Meßwerte liegen insgesamt etwas über der von HESS festgelegten Geraden. Hier kann ein gewisser Auswertungsfehler vorliegen, da auch HESS fotografisch gemessen hat, und das Flammenende auf einem Film nur schwer zu erkennen ist.

In Abschnitt 6.5 werden die Meßergebnisse mit denen weiterer Autoren zusammengestellt und für eine Aussage über die Flammenlänge brennender Tanks benutzt.

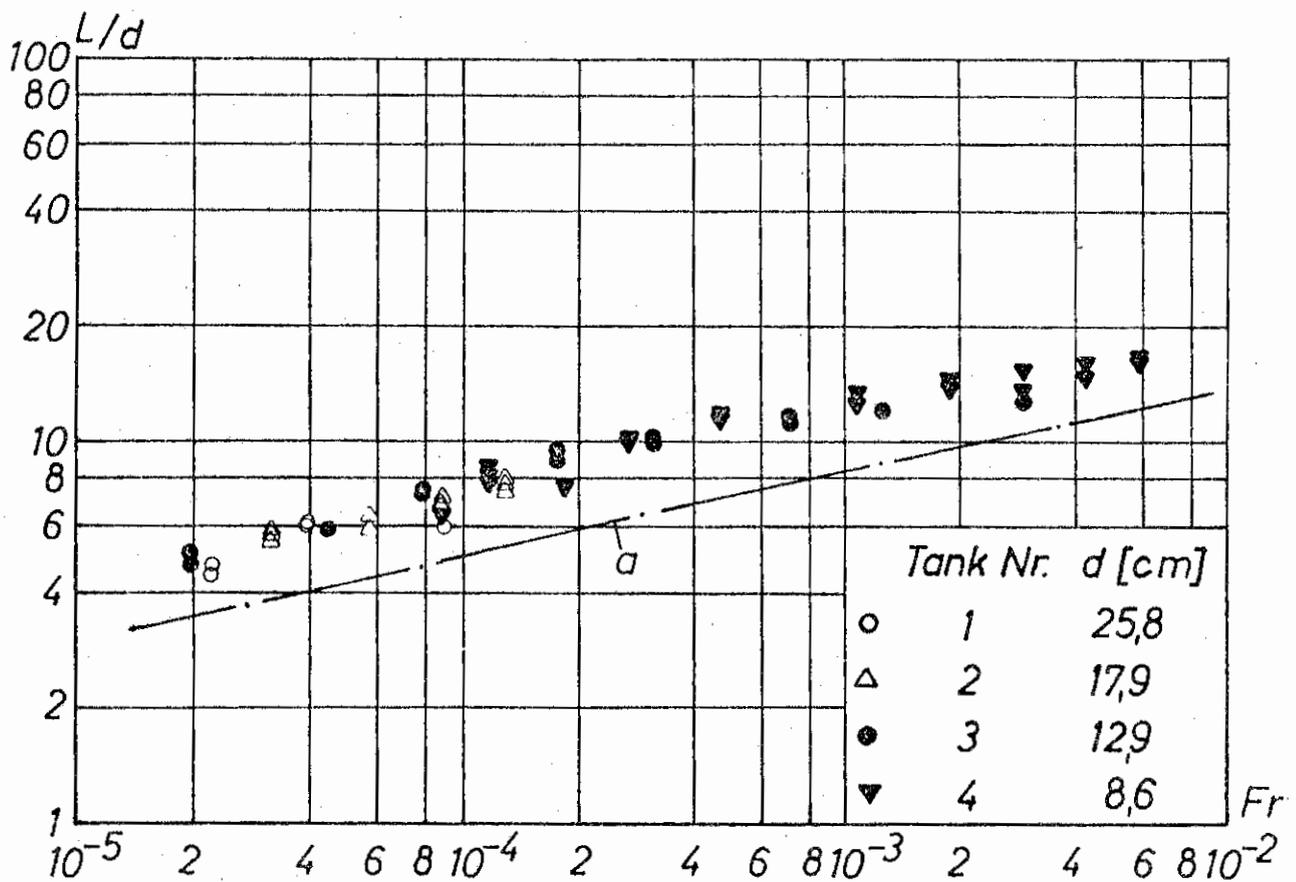


Bild 4.-25: Dimensionslose Flammenlänge  $L/d$  in Abhängigkeit von der Froude-Zahl für die untersuchten Modelltanks. Ein-gezeichnet die Verlängerung der von HESS [29] an Propanbrennern bis 2,2 cm Durchmesser gefundenen Gerade (strich-punktiert).

#### 4.5. MESSFEHLER

Es wird ein Überblick über die im einzelnen aufgetretenen Meßfehler gegeben, damit eine richtige Einordnung der gefundenen Ergebnisse möglich ist.

Über die mit den normalen Fehlern behaftete Bestimmung der Gasgeschwindigkeit in den Tanks über Strömungsmesser nach dem Schwebekörperprinzip soll nur angemerkt werden, daß die für die Umrechnung erforderliche Temperatur des Kiesbettes im Tank, wegen der großen Wärmekapazität des Kiesbettes, ausreichend genau  $40^{\circ} \text{C}$  betrug.

Das Hauptinteresse konzentriert sich auf die unter unüblichen Bedingungen durchgeführte Konzentrationsmessung. Die verwendeten automatischen Gasanalysatoren sind für Durchsätze von 60 l/h gebaut. Aus Gründen der isokinetischen Absaugung mußte wegen der niedrigen Gasgeschwindigkeit mit einem Absaugestrom von maximal 3 l/h gearbeitet werden, um als örtlich zu bezeichnende Konzentrationswerte zu gewinnen. Wegen der Wärme- und Rußentwicklung wurden die Analysatoren dabei in einem von den Tanks getrennten Raum untergebracht. Hatten die Absaugesonde und die 6 m lange Leitung zu den Analysatoren auch nur 2 mm Innendurchmesser, und konnte darin Kolbenströmung erwartet werden, so stellten Gaskühler, Rußfilter und die Meßkammer der Analysatoren demgegenüber großvolumige Räume dar. In diesen änderte sich die Gaskonzentration durch fortlaufenden geringen Ab- und Zufluß, so daß eine Mischung der jeweils ankommenden Konzentration mit der in diesen Räumen vorhandenen auftrat. Infolge der geringen Absaugemenge stellten sich daher neue Gemische bei geänderter Probenzusammensetzung nur äußerst langsam ein. Erst nach Meßzeiten von ca. 5 - 10 Minuten an einem Ort ergaben sich feste Konzentrationswerte. War die notwendige Zwischenschaltung von als Mischkammern wirkenden Räumen also einerseits ungünstig, so bewirkte sie doch eine Mittelwertbildung der angesaugten Probe und damit im wesentlichen einen zeitlich unabhängigen Wert der gemessenen Konzentration. So wurden die mit der Temperatursonde nachgewie-

senen kurzfristigen Schwankungen völlig unterdrückt, und lediglich längerdauernde Konzentrationsänderungen kamen zum Tragen. Diesen wurde auf dem Schreibstreifen ein Mittelwert zugeordnet. Der durch die Mittelwertbildung verursachte Meßfehler kann mit  $\pm 2,5\%$  vom jeweiligen Endwert (100 Vol.% Propan, 10 Vol.%  $\text{CO}_2$ ) angesetzt werden. Unbekannt sind dagegen die durch Mischung in den großvolumigen Räumen von Gaskühler, Rußfilter und Meßküvette aufgetretenen Fehler, da sich ein Endzustand der Konzentration nur asymptotisch einstellte. Ein mit nur noch geringem Fehler behafteter Wert ergab sich jedoch schon nach vertretbarer Meßdauer und ließ sich auf Grund der aufgezeichneten Kurve leicht ermitteln. Allerdings ist ungewiß, ob eine evtl. Gasaufnahme bzw. -abgabe des in allen Leitungen befindlichen Ruß-Wassergemisches bei einer Änderung der Gaszusammensetzung einen Einfluß nahm.

Durch ständige Nacheichung wurde eine langfristige Fehlerzunahme der Geräte ausgeschaltet, wie auch die Querempfindlichkeit des  $\text{CO}_2$ -Analysators gegenüber Propan berücksichtigt wurde.

Die Temperaturmessung mit einem Thermoelement ist einmal mit dem prinzipiellen Fehler behaftet, den eine Lötperle mit endlichem Durchmesser (hier 0,5 mm) in Bezug auf die angezeigte Temperatur hat. Die Lötperle hat zum anderen durch ihre Wärmekapazität Einfluß auf die Aufzeichnung von Temperaturschwankungen, die teilweise unterdrückt werden können. Dadurch bedingt sind in den Temperaturmessungen nur größere Zonen unterschiedlicher Temperatur zum Tragen gekommen, was für eine Aussage über die Luftzufuhr in das Tankinnere aber als ausreichend angesehen werden kann.

Die durch den Kompensografen verursachten Fehler der Temperatureaufzeichnung betragen insgesamt in dem verwendeten Meßbereich etwa  $\pm 3$  grad und sind damit unbedeutend.

#### 4.6. ZUSAMMENFASSUNG ÜBER LUFTZUFUHR UND VERBRENNUNG UNTERHALB DER TANKMÜNDUNG

Wegen der Bedeutung der Verbrennungserscheinung im Tank werden die bisher gewonnenen Kenntnisse zusammengefaßt.

Bei der extrem niedrigen Frischgasgeschwindigkeit von etwa 1 cm/s bewirkt der Auftrieb der heißen Verbrennungsgase eine wesentliche Geschwindigkeitssteigerung in der Flammenzone. Dadurch entsteht unter der Tankmündung ein leichter Unterdruck und Luft strömt ein. Die Verbrennung beginnt so bereits unterhalb der Tanköffnung. Hier entsteht eine Konvektionssäule von etwa halbem Tankdurchmesser. Die vom Tank eingeschlossene Konvektionssäule saugt durch Rückströmung von der Tanköffnung u.a. Umgebungsluft an, die wegen des geringen Durchmessers der Konvektionssäule oberhalb der Tankmündung weit zur Tankachse reicht. So stellt sich nach der Zündung eine stabile Verbrennung im Tank ein.

Die im Frischgasstrom laminare Strömung wird wegen der erhöhten Geschwindigkeit in der Verbrennungszone turbulent. Turbulenzonen reichen bis ins Tankinnere und fördern dort die Mischung zwischen Brennstoff- und Luftballen. Die Mischung mit heißen Rauchgasballen aus der Rückströmung liefert örtlich die Zündenergie. Die Mischung ist sehr langsam, wie die Frequenzen der Temperaturschwankung im Tankinneren zeigen.

Unabhängig von Tankdurchmesser und Gasgeschwindigkeit dringt die über den Tankrand einströmende Umgebungsluft auf der Tankachse am weitesten vor. Innerhalb der Konvektionssäule resultieren aus der besseren Mischung höhere zeitliche Temperaturmittel und geringere Temperaturschwankungen. Lediglich am Flammenboden bewirkt die höhere Luftkonzentration auf der Achse dort die größeren Temperaturschwankungen. Am Tankrand werden die größeren Temperaturamplituden durch die einströmenden kalten Luftballen verursacht.

Gasgeschwindigkeit und Tankdurchmesser beeinflussen die Luftansaugung im Tankinneren. Bei höheren Gasgeschwindigkeiten und konstantem Tankdurchmesser steht der Ansaugung der Konvektions säule ein wachsendes Frischgasangebot gegenüber; die Verbrennung beginnt weiter stromab. Bei wachsendem Tankdurchmesser und konstanter Gasgeschwindigkeit reicht die Verbrennung tiefer in den Tank.

## 5. MÖGLICHKEITEN ZUM AUFBAU EINES RECHENMODELLS ÜBER TANKBRÄNDE

Für Flüssigkeiten mit stark leuchtenden Flammen wurde in Versuchen gezeigt (Abschnitt 2.3), daß der Wärmetransport zur Flüssigkeit fast ausschließlich auf Strahlung beruht.

Versuche des Verfassers (Abschnitt 3) bestätigen die allgemeine Vernachlässigbarkeit des Wärmetransportes aus der Tankwand unterhalb des Flüssigkeitsspiegels bereits für kleine Tankdurchmesser.

Der Konvektionsanteil ist in der Literatur immer nur indirekt bestimmt bzw. abgeschätzt.

Nimmt man eine Wärmeübergangszahl von  $\alpha = 10 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{grd})$  und einen Temperaturunterschied von 100 grd an, so kommt man für Benzin und  $v_a = 4 \text{ mm}/\text{min}$  auf einen Konvektionsanteil von 2,7 %. Die Bilder in Abschnitt 2.-2 geben keine klare Vorstellung von dem wirksamen Temperaturunterschied. Der Konvektionsanteil kann aber sicher mit weniger als 10 % angenommen werden. Eine Kompensation ist in der Vernachlässigung der Absorption der durchstrahlten Dampfschicht zu sehen.

Ein Rechenmodell kann somit ausschließlich auf Strahlungswärmetransport aufgebaut werden. Die Beschränkung auf Erdölprodukte und Tankdurchmesser ab etwa 2 m bedeutet für die Praxis keine ernstliche Einschränkung.

Über die in Abschnitt 1 angeführten Einflußgrößen auf die Wärmobilanz liegen anhand der Literaturangaben und der Versuche des Verfassers folgende Kenntnisse vor:

Ab Tanks von etwa 2 m Durchmesser ist die Flamme, vom Flüssigkeitsspiegel her gesehen, optisch dicht. Ihr Emissionsgrad liegt wegen der starken Rußentwicklung nahe 1. Für eine Rechnung kann  $\epsilon_p = 0,9$  bis 0,95 eingesetzt werden. Die für eine Strahlungsrechnung geeignete mittlere Flammentemperatur liegt bei 1100 bis 1200 °K

Die Lage der unteren Flammenfront in bezug auf den Flüssigkeitsspiegel ist noch offen. Trotz der klaren Meßwerte aus den Versuchen (Abschnitt 4) wurde eine Extrapolation auf Durchmesser von 10 bis 100 m nicht für möglich gehalten. Aus dem flachen Verlauf des Flammenbodens kann aber für das Rechenmodell als erste Näherung ein ebener Flammenboden abgeleitet werden.

Für die Flammenlänge liegt ein gesicherter Verlauf bis 22 m Tankdurchmesser vor. Eine weitergehende Gültigkeit der Beziehung ist anzunehmen.

Die Wärmeaufnahme der Flüssigkeit hängt von ihrem Absorptionskoeffizienten ab. In der Tankbrandliteratur liegen Werte nicht vor.

Allgemein absorbieren Flüssigkeiten stark. Für die siedende und damit rauhe Oberfläche der hier betrachteten Produkte kann  $\epsilon_B = 0,90$  bis  $0,95$  angenommen werden.

Die Verdampfungsrate der Flüssigkeit hängt damit weitgehend von ihrer Wärmezonenbildung ab.

Bei Flüssigkeiten ohne Wärmezone ist die Oberfläche auf dem oberen Siedepunkt des Produktes, und es stellt sich in der Gleichgewichtsperiode bei konstanter Abbrandgeschwindigkeit ein fester Temperaturverlauf unterhalb der Oberfläche ein. Die aufgenommene Wärme dient dann zum Erwärmen und Verdampfen einer bestimmten Flüssigkeitsmenge in der Zeiteinheit (Gleichung 3.-3).

Bei einer Änderung der Abbrandgeschwindigkeit stellt sich eine neue Temperaturkurve ein (Gleichung 2.-3). Die damit bedingte geringfügige Wärmeaufnahme bei der langsamen Verminderung der Abbrandgeschwindigkeit bei absinkendem Flüssigkeitsspiegel ist aber vernachlässigbar.

Gleichung 2.-3 und 3.-3 werden ungültig, wenn die erwärmte Zone unterhalb der Oberfläche den Tankboden erreicht. Im Verhältnis zur Tankhöhe ist die Ausdehnung dieser Zone jedoch sehr gering.

Flüssigkeiten mit Wärmezonenebildung zeigen dagegen ein verwickeltes Verhalten. Es findet eine fraktionierte Destillation in der Schicht zwischen Wärmezone und unbeeinflusster Flüssigkeit statt. Ein Verdampfen des Wärmezonenproduktes an der Oberfläche ist noch unsicher.

Damit steht auch die Temperatur der Oberfläche nicht fest. Ferner nimmt die Wärmezone im Laufe des Brandes zu und kann dabei ihre Zusammensetzung ändern. Erreicht die Wärmezone den Tankboden, setzt das Überkochen des Tanks ein, das sich mehrmals wiederholen kann. Je nach der Geschwindigkeit, mit der sich die Wärmezone ausdehnt, kann der Tank dann noch erheblich gefüllt sein. Wärmezonenebildung und Überkochen des Tanks sind daher nicht vernachlässigbar. Da die Vorgänge bisher aber nur qualitativ bekannt sind, können Flüssigkeiten mit Wärmezonenebildung nicht in das Rechenmodell einbezogen werden.

Für den Strahlungstransport aus der Tankwand kann deren Emissionsgrad mit 0,90 angenommen werden. Er stellt sich wegen der Oxydationsschicht für alle Stahllarten ab 300 bis 400 ° C in dieser Größe ein [35]. Über die Tankwandtemperatur liegen nur die Messungen von DROTSCHMANN [9] vor. Die Werte überstreichen einen Temperaturbereich von 500 bis 900 ° C und sind nur grob auf die Brandbedingungen bezogen. Für das Rechenmodell bleibt die Tankwandtemperatur daher offen.

## 6. RECHENMODELL EINES TANKBRANDES

### 6.1. STRAHLUNGSAUSTAUSCH ZWISCHEN FLAMME UND FLÜSSIGKEIT UND ZWISCHEN TANKWAND UND FLÜSSIGKEIT

Es werden folgende Voraussetzungen getroffen:

1. Der Tankdurchmesser ist genügend groß, damit die Flamme während des gesamten Brandes optisch dicht ist.
2. Flammentemperatur und Emissionsgrad ändern sich im Laufe des Brandes nicht.
3. Die untere Flammenzone kann durch einen ebenen, optisch dichten Flammenboden im Abstand  $h_{FB}$  von der Flüssigkeitsoberfläche ersetzt werden.
4. Brennstoffe ohne Wärmezonenbildung können wie Einkomponentenflüssigkeiten behandelt werden.
5. Die Tankwandtemperatur über der Flüssigkeit ist überall gleich groß und konstant, ebenso der Emissionsgrad der Wand.
6. Es findet keine Wiederabsorption reflektierter Strahlung statt.
7. Die Dampfschicht zwischen Flammenboden und Flüssigkeit ist strahlungsdurchlässig.
8. Im Verhältnis zur Branddauer eines gefüllten Tanks sind die An- und Auslaufvorgänge des Brandes sehr kurz und werden vernachlässigt.
9. Der Tank ist im Querschnitt kreisrund und oben offen.

Die Aufgabe ist damit auf den Strahlungsaustausch zwischen zwei räumlich begrenzten Flächen zurückgeführt [35, 36].

Für zwei beliebig im Raum liegende Flächen  $F_1$  und  $F_2$  mit den Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  und den Emissionsvermögen  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  ergibt sich der Wärmestrom von  $F_1$  nach  $F_2$  zu

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\pi} C_S \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \iint_{F_1} \iint_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{s^2} dF_1 dF_2 \quad (6-1)$$

Die Bedeutung von  $\beta$ ,  $s$ ,  $F_1$  und  $F_2$  geht aus Bild 6.-1 hervor. Der Index 1 bezeichnet die wärmere, der Index 2 die kältere Fläche. Eine Wiederabsorption reflektierter Energie ist in Gleichung 6.-1 ausgeschlossen.

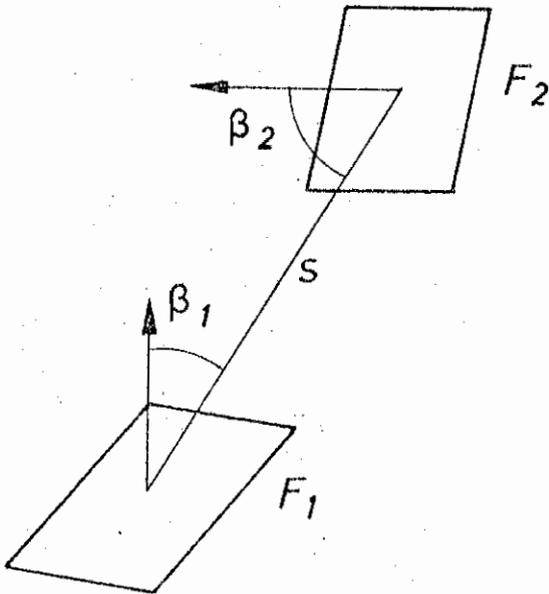


Bild 6.-1: Lage der Flächen  $F_1$  und  $F_2$  im Raum

Das Doppelintegral, das nur die räumliche Anordnung der Flächen wiedergibt, kann durch das mittlere Winkelverhältnis  $\bar{\varphi}$  ( $\bar{\varphi} \leq 1$ ) ersetzt werden.

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\pi F_1} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{s^2} dF_1 dF_2 \quad (6.-2)$$

$\bar{\varphi}$  gibt den Bruchteil der von der ersten Fläche ausgehenden Strahlungsenergie an, der auf die zweite Fläche auftrifft. Flammenboden und Flüssigkeitsoberfläche stellen zwei gleich große parallele Kreisscheiben des Durchmessers  $d$  dar, die eine gemeinsame Mittelpunktsenkrechte besitzen. Ist ihr Abstand  $h_{\text{FB}}$ , so ergibt sich das mittlere Winkelverhältnis zwischen beiden zu

$$\bar{\varphi}_{FB} = 2 \left( \frac{h_{FB}}{d} \right)^2 \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h_{FB}}{d} \right)^{-2} - \sqrt{1 + \left( \frac{h_{FB}}{d} \right)^{-2}} \right] \quad (6.-3)$$

Der Wärmestrom von der Flamme zur Flüssigkeit ist dann

$$\dot{Q}_{FB} = \epsilon_F \epsilon_B C_S \cdot \left[ \left( \frac{T_F}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right] F_F \bar{\varphi}_{FB} \quad (6.-4)$$

Wegen der vorausgesetzten Konstanz der Rechenwerte in Gleichung 6.-4 kann

$$V = \epsilon_F \epsilon_B C_S \left[ \left( \frac{T_F}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right] \quad (6.-5)$$

mit  $V = \text{konst}$  gesetzt werden.

Gleichung 6.-4 wird dann zu

$$\dot{Q}_{FB} = V F_F \bar{\varphi}_{FB} \quad (6.-6)$$

Wegen  $F_F = F_B$  ist damit das Winkelverhältnis  $\bar{\varphi}_{FB}$  proportional dem Wärmestrom zur Einheit der brennenden Flüssigkeitsoberfläche

$$\bar{\varphi}_{FB} \sim \frac{\dot{Q}_{FB}}{F_B} \quad (6.-7)$$

Nach Gleichung 6.-6 tritt für  $F_F = \text{konst}$  die maximale Wärmezufuhr  $\dot{Q}_{FB\text{max}}$  bei  $\bar{\varphi}_{FB\text{max}} = 1$  auf. Damit gibt  $\bar{\varphi}_{FB}$  ebenfalls das Verhältnis der augenblicklich zugeführten Wärme zur maximal möglichen an.

$$\bar{\varphi}_{FB} = \frac{\dot{Q}_{FB}}{\dot{Q}_{FB\text{max}}} \quad (6.-8)$$

Die Kurve  $m = 0$  in Bild 6.-2 zeigt den Verlauf von  $\bar{\varphi}_{FB}$  bzw.  $\dot{Q}_{FB}/\dot{Q}_{FB\text{max}}$  als Funktion von  $h_{FB}/d$ .

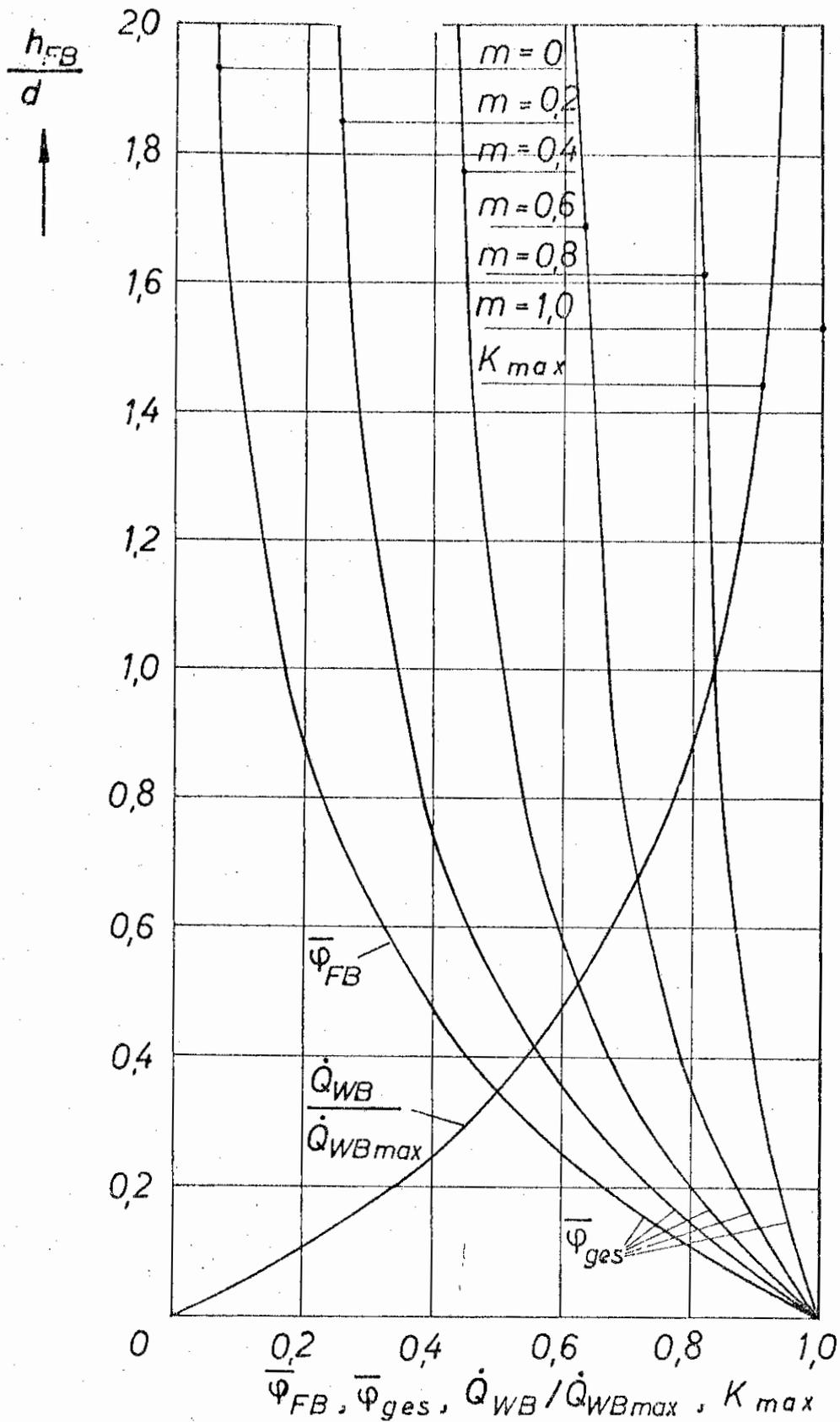


Bild 6.-2: Abhängigkeit der verschiedenen Rechengrößen von dem Abstand Flammenboden - Flüssigkeit.

$\bar{\varphi}_{FB}$  = Winkelverhältnis zwischen Flammenboden und Flüssigkeit.

$\bar{\varphi}_{ges}$  = Winkelverhältnis von Flammenboden und Tankwand zur Flüssigkeit.

$\frac{\dot{Q}_{WB}}{\dot{Q}_{WBmax}}$  = Strahlung aus endlich hoher Tankwand zu Strahlung bei unendlich hoher Tankwand.

$K_{max}$  = maximale Abnahme der Wärmezufuhr zur Flüssigkeit durch Kühlung der Tankwand (in Prozent).

Der Strahlungstransport des Tankwandabschnittes zwischen Flüssigkeit und Flammenboden zur Flüssigkeit ergibt sich entsprechend. Bild 6.-3 zeigt ein Flächenteilchen  $dF_W$  der Tankwand in seiner Lage zur Flüssigkeitsoberfläche. Die Integration von Gleichung 6.-2 ergibt das mittlere Winkelverhältnis  $\bar{\varphi}_{WB}$  des Flächenteilchens  $dF_W$  in Bezug auf  $F_B$ .

$$\bar{\varphi}_{WB} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\left(2 \frac{h}{d}\right)^2 + 2}{\sqrt{\left(2 \frac{h}{d}\right)^2 + 4}} - 2 \frac{h}{d} \right] \quad (6.-9)$$

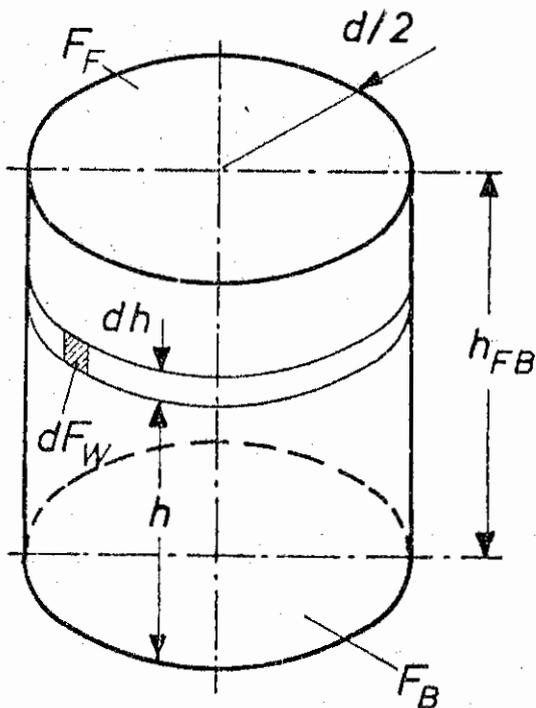


Bild 6.-3: Lage des Flächenteilchens  $dF_W$  der Tankwand in Bezug auf die Flüssigkeitsoberfläche

Durch Integration über die gesamte wirksame Tankwandfläche  $F_W$  kann der Wärmefluß durch Strahlung von der Wand auf die Flüssigkeitsoberfläche berechnet werden.

$$\dot{Q}_{WB} = \int_{F_W} \epsilon_W \epsilon_B C_S \left[ \left(\frac{T_W}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_S}{100}\right)^4 \right] \bar{\varphi}_{WB} dF_W \quad (6.-10)$$

Wegen der Voraussetzung  $\epsilon_W = \text{konst}$  und  $T_W = \text{konst}$  über die gesamte Wandfläche vereinfacht sich Gleichung 6.-10 zu

$$\dot{Q}_{WB} = \epsilon_W \epsilon_B C_S \left[ \left( \frac{T_W}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right] \int_{F_W} \bar{\varphi}'_{WB} dF_W \quad (6.-11)$$

Aus Bild 6.-3 erkennt man, daß für alle Flächenteilchen  $dF_W$  mit gleichem Abstand  $h$  vom Flüssigkeitsspiegel das Winkelverhältnis  $\bar{\varphi}'_{WB}$  denselben Zahlenwert hat.

Aus Gleichung 6.-11 wird daher

$$\dot{Q}_{WB} = \epsilon_W \epsilon_B C_S \left[ \left( \frac{T_W}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right] d\pi \int_0^{h_{FB}} \bar{\varphi}'_{WB} dh \quad (6.-12)$$

Die Integration vereinfacht sich, wenn  $dh$  durch  $d$  ( $h/d$ ) substituiert wird.

$$\dot{Q}_{WB} = \epsilon_W \epsilon_B C_S \left[ \left( \frac{T_W}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right] d^2 \pi \int_0^{h_{FB}/d} \bar{\varphi}'_{WB} d\left(\frac{h}{d}\right) \quad (6.-13)$$

Das Integral in Gleichung 6.-13 ist das gesamte mittlere Winkelverhältnis  $\bar{\varphi}_{WB}$  der Tankwand zwischen Brennstoffspiegel und Flammenboden in Bezug auf die Flüssigkeitsoberfläche.

$$\bar{\varphi}_{WB} = \int_0^{h_{FB}/d} \bar{\varphi}'_{WB} d\left(\frac{h}{d}\right) \quad (6.-14)$$

Nach der Integration erhält man

$$\bar{\varphi}_{WB} = \frac{1}{8} \left[ \left( \frac{h_{FB}}{d} + \sqrt{\left( \frac{h_{FB}}{d} \right)^2 + 1} \right)^2 - \left( \frac{h_{FB}}{d} + \sqrt{\left( \frac{h_{FB}}{d} \right)^2 + 1} \right)^{-2} - 4 \left( \frac{h_{FB}}{d} \right)^2 \right] \quad (6.-15)$$

Auch in Gleichung 6.-13 lassen sich die konstanten Rechengrößen zusammenfassen. Man erhält

$$W = \epsilon_W \epsilon_B C_S \left[ \left( \frac{T_W}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right] \quad (6.-16)$$

Mit  $d^2\pi/4 = F_B$  erhält man aus Gleichung 6.-13, Gleichung 6.-14 und Gleichung 6.-16

$$\dot{Q}_{WB} = 4 W F_B \bar{\varphi}_{WB} \quad (6.-17)$$

Entsprechend Gleichung 6.-7 ist damit das Winkelverhältnis  $\bar{\varphi}_{WB}$  proportional dem Wärmestrom aus der Tankwand zur Flächeneinheit der Flüssigkeitsoberfläche.

$$\bar{\varphi}_{WB} \sim \frac{\dot{Q}_{WB}}{F_B} \quad (6.-18)$$

Damit ist es gelungen, den Strahlungswärmestrom aus der Tankwand in die Flüssigkeit unabhängig von der Tankwandfläche darzustellen. Einzige Variable ist bei festem Tankdurchmesser nur noch  $h_{FB}/d$ .

Den Einfluß verschieden hoher Tankwände auf den Wärmestrom zur Flüssigkeit erhält man durch den Quotienten

$$\frac{\dot{Q}_{WB}}{\dot{Q}_{WBmax}} = \frac{\bar{\varphi}_{WB}}{\bar{\varphi}_{WBmax}} \quad (6.-19)$$

$\dot{Q}_{WBmax}$  und  $\bar{\varphi}_{WBmax}$  gelten für unendliche hohe Tankwand.

Dabei zeigt sich, daß für  $h_{FB}/d \rightarrow \infty$  das Winkelverhältnis  $\bar{\varphi}_{WBmax} \rightarrow 0,25$  geht. Ein Zuwachs an Tankwandhöhe wirkt sich daher ab einer gewissen Grenze kaum noch aus.

Der Kurvenzug  $\dot{Q}_{WB}/\dot{Q}_{WBmax}$  in Bild 6.-2 zeigt dieses Verhalten.

In realen Fällen wird die Wärme von der Flamme und der Tankwand gleichzeitig zur Flüssigkeit geliefert. Unter den genannten Voraussetzungen erhält man daher die gesamte Wärmezufuhr durch Addition der beiden Komponenten.

$$\dot{Q}_z = \dot{Q}_{FB} + \dot{Q}_{WB} \quad (6.-20)$$

Nach Einsetzen von Gleichung 6.-6 und Gleichung 6.-17 ergibt sich

$$\dot{Q}_z = V F_B \bar{\varphi}_{FB} + 4 W F_B \bar{\varphi}_{WB} . \quad (6.-21)$$

In Abschnitt 5 wurde  $\epsilon_F$  und  $\epsilon_W$  mit etwa 0,90 bis 0,95 nachgewiesen. Man setzt also

$$\epsilon_F \epsilon_B = \epsilon_W \epsilon_B = \epsilon_{ges} . \quad (6.-22)$$

Für die Tankwandtemperatur im Bereich der Höhe  $h_{FB}$  gelten folgende Grenzen:

1. Die Tankwandtemperatur kann höchstens die Flammentemperatur erreichen.
2. Die untere Tankwandtemperatur entspricht der Siedetemperatur der brennenden Flüssigkeit.

Also

$$T_S \leq T_W \leq T_F . \quad (6.-23)$$

Durch Einführen von  $\epsilon_{ges}$  aus Gleichung 6.-22 in Gleichungen 6.-5 und 6.-16 und unter Beachtung von Gleichung 6.-23 ergibt sich

$$W \leq V \quad (6.-24)$$

Es wird nun

$$W = mV \quad (6.-25)$$

gesetzt, mit

$$0 \leq m \leq 1$$

Gleichung 6.-21 geht dann über in

$$\dot{Q}_z = V F_B (\bar{\varphi}_{FB} + 4 m \bar{\varphi}_{WB}) \quad (6.-26)$$

Der Klammerausdruck von Gleichung 6.-26 wird als gesamtes mittleres Winkelverhältnis  $\bar{\varphi}_{ges}$  für Strahlung aus der Flamme und Strahlung aus der Tankwand bezeichnet.

$$\bar{\varphi}_{ges} = \bar{\varphi}_{FB} + 4 m \bar{\varphi}_{WB} \quad (6.-27)$$

Man erkennt aus Gleichung 6.-26, daß entsprechend Gleichung 6.-7 und Gleichung 6.-18 die Wärmeaufnahme der Flüssigkeit bei gegebenem Tankdurchmesser proportional  $\bar{\varphi}_{ges}$  ist.

$$\bar{\varphi}_{ges} = \frac{\dot{Q}_z}{F_B} \quad (6.-28)$$

Bild 6.-2 zeigt den Verlauf von  $\bar{\varphi}_{ges}$  als Funktion von  $h_{FB}/d$  für verschiedene Werte von  $m$ .

Als Ergebnis der Strahlungsrechnung erhält man also den der Flüssigkeit zugeführten Wärmestrom zu

$$\dot{Q}_z = V F_B \bar{\varphi}_{ges} \quad (6.-29)$$

Statt dieser Herleitung des Strahlungseinflusses von Flamme und Tankwand auf die Flüssigkeit hätte man auch ansetzen können

$$\dot{Q}_z = \epsilon_F \epsilon_B C_S \left[ \left( \frac{T_F}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right] F_B \bar{\varphi}_{FB} + \epsilon_W \epsilon_B C_S \left[ \left( \frac{T_W}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right] F_B (1 - \bar{\varphi}_{FB}), \quad (6-30)$$

da von der Flüssigkeit her gesehen die Summe der Winkelverhältnisse 1 sein muß.

Wie man zeigen kann, sind die Gleichungen 6.-29 und 6.-30 identische Lösungen. Der hier beschrittene Weg der Integration über die Tankwand hat aber den Vorzug universellerer Anwendungsmöglichkeit. So läßt sich später bei bekanntem Temperaturverlauf in der Tankwand jedem Flächenteilchen  $dF_W$  vor der Integration von Gleichung 6.-10 die zugehörige Temperatur zuordnen.

## 6.2. DER EINFLUSS DER TANKWAND AUF DAS BRANDVERHALTEN

Hat der Flammenboden die reduzierte Entfernung  $h_{FB}/d$  von der Flüssigkeitsoberfläche, so gibt die dazwischenliegende Tankwand je nach ihrer Temperatur eine bestimmte Wärmemenge an die Flüssigkeit ab. Dabei überwiegt, wie Bild 6.-2 zeigt, der Wärmezustrom aus der Tankwand je nach Wandtemperatur den aus der Flamme bald. Für  $m = 1$ , also Wandtemperatur gleich Flammentemperatur, ergibt Gleichung 6.-27 ein von  $h_{FB}/d$  unabhängiges konstantes Winkelverhältnis  $\bar{\varphi}_{ges}$  von 1.

$$\bar{\varphi}_{ges} = \left( \bar{\varphi}_{FB} + 4 m \bar{\varphi}_{WB} \right)_{m=1} = 1 \quad (6-31)$$

Nach Gleichung 6.-29 ist die zugeführte Gesamtwärme  $\dot{Q}_z$  für  $\bar{\varphi}_{ges} = 1$  die maximal mögliche.

$$\dot{Q}_{z(\bar{\varphi}_{ges}=1)} = \dot{Q}_{z \max} \quad (6-32)$$

Also ebenfalls

$$\dot{Q}_{z(m=1)} = \dot{Q}_{z \max} . \quad (6-33)$$

Ferner ist entsprechend Gleichung 6.-8 für  $m = 0$

$$\left( \frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_{z \max}} \right)_{m=0} = \bar{\varphi}_{FB} \quad (6.-34)$$

Kühlt man in Verbindung mit Löschmaßnahmen die Tankwand bei gleichem  $h_{FB}/d$  nun plötzlich von  $T_F$  auf die Temperatur der Flüssigkeit ab, also  $T_W = T_S$ , so gilt für das Verhältnis  $\dot{Q}_z/\dot{Q}_{z \max}$  der Kurvenzug  $m = 0$  in Bild 6.-2. Die relative Verminderung der Wärmezufuhr in die Flüssigkeit bei einer Abkühlung der Tankwand von  $m = 1$  auf  $m = 0$  bei  $h_{FB}/d = \text{konst}$  ist als maximale Abnahme  $K_{\max}$  der Wärmezufuhr durch Kühlung der Tankwand in Bild 6.-2 dargestellt.

$$K_{\max}(h_{FB}/d = \text{konst}) = \frac{\left( \frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_{z \max}} \right)_{m=1} - \left( \frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_{z \max}} \right)_{m=0}}{\left( \frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_{z \max}} \right)_{m=1}} \quad (6.-35)$$

Mit Gleichungen 6.-32, 6.-33 und 6.-34 wird aus Gleichung 6.-35

$$K_{\max} = 1 - \bar{\varphi}_{FB} \quad (6.-36)$$

Aus Bild 6.-2 erkennt man z.B., daß für  $h_{FB}/d = 0,4$  die auf den oben angegebenen Temperaturunterschied bezogene maximale Abnahme des Wärmestromes durch Kühlung der Tankwand

$$K_{\max} = 55 \%$$

wäre.

### 6.3 ABBRANDGESCHWINDIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FÜLLHÖHE DES TANKS UND DER BRANDDAUER

Für Brennstoffe ohne Wärmezonenebildung gibt Gleichung 3.-3 die Wärmeaufnahme innerhalb der Gleichgewichtsperiode an. Durch Gleichsetzen mit der Wärmezufuhr (Gleichung 6.-29) erhält man die Abbrandgeschwindigkeit dieser Brennstoffe als Funktion des Abstandes  $h_{FB}/d$  zwischen Flammenboden und Flüssigkeitsspiegel.

$$v_{a\omega} = \frac{\bar{\varphi}_{ges} V}{\rho_B [r + c(t_S - t_U)]} \quad (6.-37)$$

Addiert man zu  $h_{FB}$  noch den Abstand Flammenboden-Tankmündung  $h_{FM}$ , so läßt sich wegen

$$h_{MB} = h_{FB} + h_{FM} \quad (6.-38)$$

die Abbrandgeschwindigkeit als Funktion des Flüssigkeitsstandes im Tank darstellen.

Der zeitliche Zusammenhang zwischen Füllstand im Tank und Abbrandgeschwindigkeit ergibt sich für einen bei Brandbeginn gefüllten Tank aus

$$h_{MB} = \int_0^{\tau} v_a \, d\tau \quad (6.-39)$$

mit  $\tau$  als Branddauer.

## 6.4 ANWENDUNG DES RECHENMODELLS

### 6.4.1 KONZEPTION FÜR KÜNFTIGE VERSUCHE

Das Ziel des Rechenmodells war die Darstellung des gesamten Brandablaufs eines Tankbrandes. Hierzu wurde die Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit und der Branddauer abgeleitet. Dieser in den Gleichungen 6.-37 und 6.-39 dargestellte Zusammenhang ist aber zahlenmäßig nicht erfaßbar, da die Lage des Flammenbodens als Funktion der Abbrandgeschwindigkeit und des Tankdurchmessers noch unbekannt ist. Auch über die Tankwandtemperatur liegen keine Angaben vor.

Der gegenwärtige Nutzen des Rechenmodells liegt also darin, daß es Wissenslücken aufdeckt und damit die Richtung für weitere Versuche angibt. Bisher lag keine klare Gesamtkonzeption eines Tankbrandes vor.

Aus Gleichung 6.-37 ergibt sich nämlich wegen  $v_{a\infty \max}$  bei  $\bar{\varphi}_{ges} = 1$  und sonst konstanten Größen

$$\frac{v_{a\infty}}{v_{a\infty \max}} = \bar{\varphi}_{ges} \quad (6.-40)$$

Den Verlauf von  $\bar{\varphi}_{ges}$  als Funktion von  $h_{FB}/d$  für verschiedene Werte von  $m$  zeigt Bild 6.-2.

Bei Versuchen sind damit folgende Größen zu bestimmen:

1. Bei gefülltem Tank nach Erreichen des Wärmegleichgewichtes  $v_{a\infty \max}$ .
2. Bei absinkendem Flüssigkeitsspiegel die jeweilige Abbrandgeschwindigkeit  $v_{a\infty}$  und die Tankwandtemperatur  $T_w$  als Funktion des Abstandes  $h_{MB}$  zwischen Tankmündung und Flüssigkeitsspiegel.
3. Flammen- und Siedetemperatur des Brennstoffs.

Aus diesen Werten bildet man  $v_{a\infty}/v_{a\infty \max}$  und  $m$  und liest aus Bild 6.-2 den zugehörigen Abstand des Flammenbodens von der Flüssigkeit ab.

#### 6.4.2 BERECHNUNG DER MAXIMALEN ABBRANDGESCHWINDIGKEIT

Die maximale Abbrandgeschwindigkeit ist ein brauchbarer Anhaltspunkt für die Abschätzung des Brandverhaltens eines Erdölproduktes.

Die maximale Abbrandgeschwindigkeit ergibt sich nach Bild 6.-2 bei gefülltem Tank ( $h_{FB}/d = 0$ ) oder beliebiger Füllhöhe und  $m = 1$ . Sie läßt sich daher mit  $\bar{\varphi}_{ges} = 1$  aus Gleichung 6.-37 errechnen.

Vernachlässigt man bei Benzin die mögliche Wärmezonenbildung und setzt typische Zahlenwerte in Gleichung 6.-37 ein, so erhält man maximale Abbrandgeschwindigkeiten, die bis zum Zweifachen über den experimentell ermittelten Werten liegen.

Das hat zwei Ursachen. Einmal geht die Flammentemperatur mit der vierten Potenz in die Rechnung ein. Geringfügige Änderungen beeinflussen das Ergebnis bereits stark. Zum anderen ist der Fehler durch die Einführung des ebenen Flammenbodens bei gefülltem Tank am größten, da hier  $h_{FB}/d = 0$  gesetzt wird. Wie Bild 6.-2 zeigt, kann bei einem Abstand  $h_{FB}/d = 0,1$  bereits eine Verminderung von  $\bar{\varphi}_{ges}$  um 20 % eintreten.

Berücksichtigt man den Spielraum der weiteren Rechenwerte, so gibt Gleichung 6.-37 die maximale Abbrandgeschwindigkeit ausreichend genau wieder.

#### 6.4.3 MAXIMALER EINFLUSS EINER GEKÜHLTEN TANKWAND BEI REALEN TANKS

Setzt man die möglichen Grenzwerte von  $h_{FB}/d$  und  $T_w$  in das Rechenmodell ein, so läßt sich eine erste Abschätzung über den Einfluß der Tankwandkühlung bei realen Tanks vornehmen.

Dazu stellt sich die Frage nach dem möglichen  $h_{FB}/d$ -Bereich bei Tanklagern und Raffinerien.

Für vier deutsche Raffinerien (Esso-Karlsruhe = Eke, Esso Köln = Ekn, Esso Hamburg = EH, Esso Ingolstadt = EI) wurde daher der jeweilige Volumenanteil einer Tankgruppe mit gleicher relativer Tankhöhe  $H/d$  am Gesamtvolumen der Raffinerie ermittelt (Stand November 1964) [37\_7]. Bild 6.-4 zeigt das Ergebnis für die Esso-Raffinerie Karlsruhe.

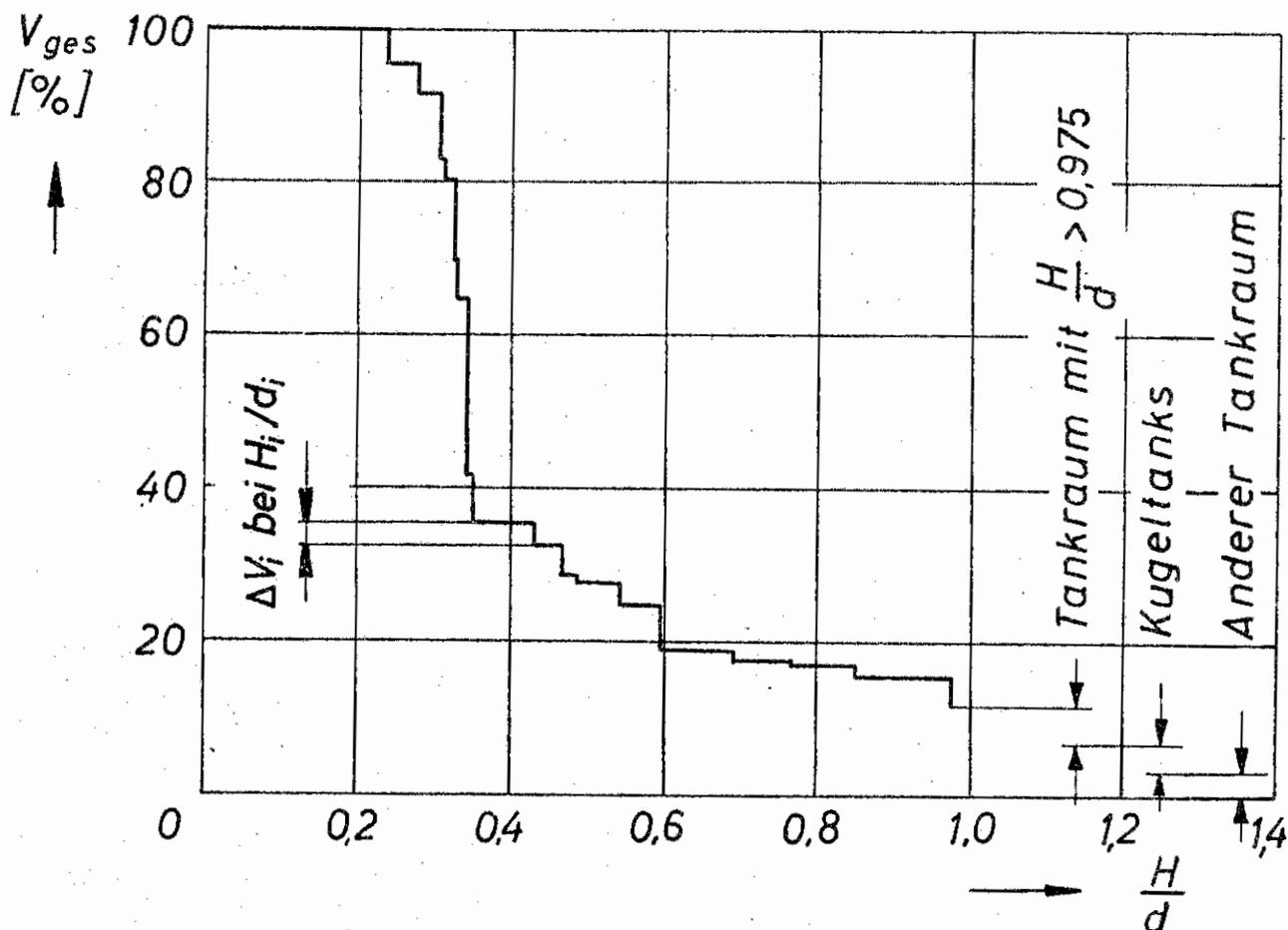


Bild 6.-4: Volumenaufteilung der Esso-Raffinerie Karlsruhe nach Tankgruppen mit gleichem Verhältnis Tankhöhe zu Tankdurchmesser [37\_7].

Zieht man bei  $H/d = 0,4$  eine Grenze, so ergibt die Auswertung, daß 64,5 % (Eke), 74 % (EI), 65,5 % (Ekn) und 63 % (EH) des gesamten Tankvolumens eine relative Tankhöhe von  $H/d = 0,4$  hat.

Daraus ergibt sich für die Brandbekämpfung:

Maximale Einwirkung der Tankwand liegt vor, wenn die brennende Flüssigkeit gerade noch den Tankboden bedeckt, während der Flammenboden mit dem oberen Tankrand abschneidet ( $H/d = h_{FB}/d$ ) und die Tankwandtemperatur gleich der Flammentemperatur ist ( $m = 1$ ).

Für alle Tanks mit  $H/d = 0,4$  könnte - wie in Abschnitt 6.2 ausgeführt - der Wärmestrom zur Flüssigkeit maximal um

$$K_{\max}(h_{FB}/d=0,4) = 55\%$$

durch Kühlung der Tankwand auf  $T_S$  gesenkt werden. Die so reduzierte Abbrandrate bedingt eine neue Gleichgewichtslage des Flammenbodens, der sich entsprechend der niedrigen Brennstoffgeschwindigkeit näher zum Flüssigkeitsspiegel einstellen wird, wodurch die Abbrandgeschwindigkeit wieder ansteigt. Der oben angegebene maximale Kühleffekt wird daher in der Praxis nicht erreicht werden können.

## 6.5 FLAMMENLÄNGE

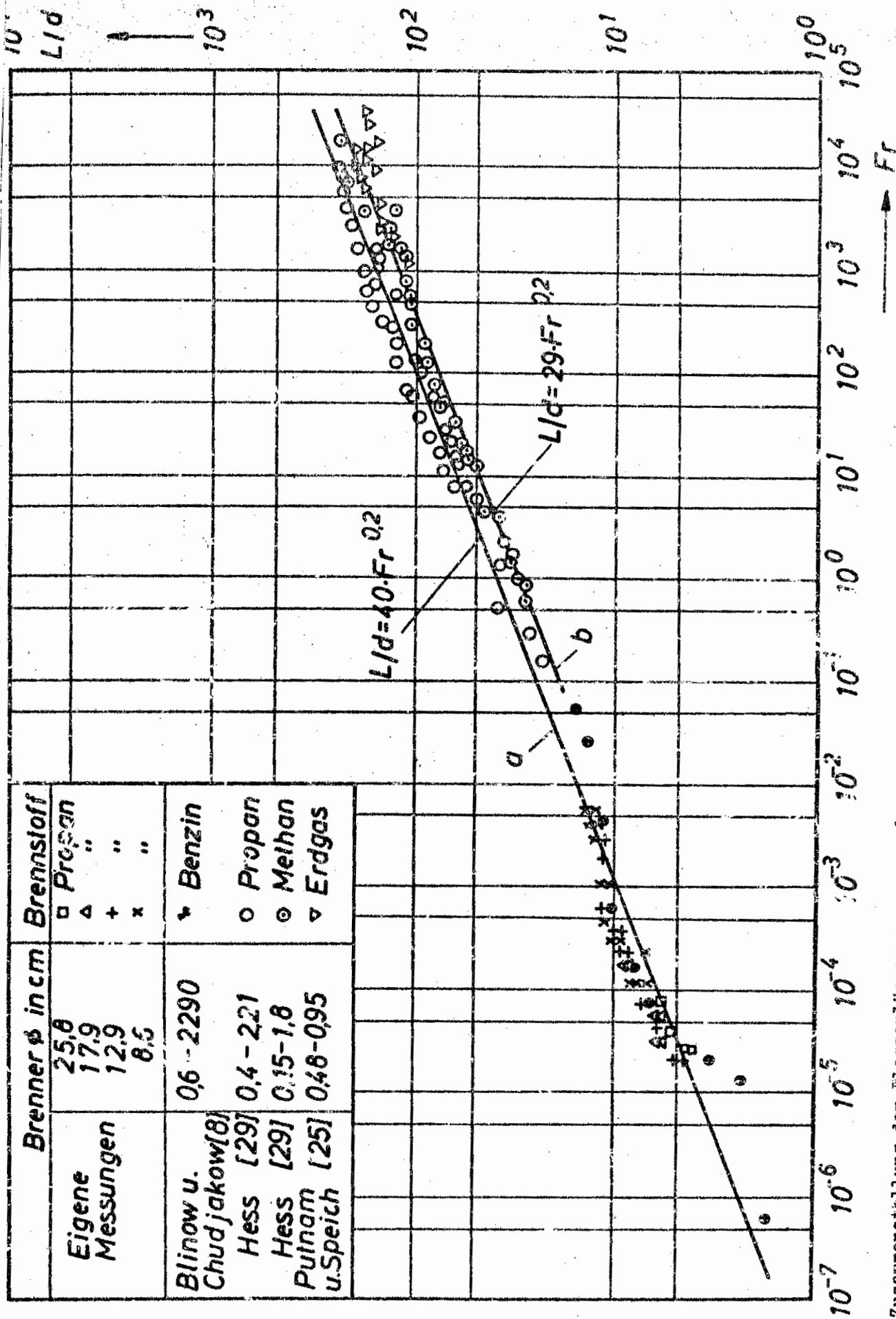
Die Messungen von HESS [29] an Propanflammen mit Ballenablösung, von BLINOV und CHUDJAKOV [8] an Benzintanks und die des Verfassers lassen sich als Funktion der Froudezahl gemeinsam durch eine Kurve darstellen. Wegen des gleichen theoretischen Luftbedarfs beider Brennstoffe ist dieses Ergebnis zu erwarten.

Die Gerade a in Bild 6.-5 zeigt damit die bezogene Länge von Benzin- und Propanflammen für Brenner- bzw. Tankdurchmesser von 0,4 cm bis 2290 cm. Sie gehorcht der Gleichung

$$\frac{L}{d} = 40 Fr^{1/5} \quad (6-41)$$

Die prinzipielle Gültigkeit dieser Darstellung zeigen die weiter eingetragenen Messungen von HESS [29] an Methanflammen und von PUTNAM und SPEICH [25] an Erdgasflammen mit hohem Methan-gehalt. Diese gruppieren sich wieder um eine gemeinsame Gerade b,

$$\frac{L}{d} = 29 Fr^{1/5},$$



Brenner $\phi$ in cm		Brennstoff
Eigene Messungen	25,8 17,9 12,9 8,5	□ Propan △ + x
Blinow u. Chudjakow[8]	0,6 - 2290	▽ Benzin
Hess [29]	0,4 - 221	○ Propan
Hess [29]	0,15 - 1,8	⊙ Methan
Pulnam u. Speich [25]	0,48 - 0,95	▽ Erdgas

Bild 6.-5: Zusammenstellung der Flammenlängenmessung an den Modelltanks mit den Werten anderer Autoren. Maßwerte von Methan- und Erdgasflammen zur Bestätigung der allgemeinen Gesetzmäßigkeit der gewählten Darstellung.

die bereits von PUTNAM und SPEICH für deren Messungen angegeben wurde.

Die in Abschnitt 2.4 mehrfach angegebene  $1/5$  - Potenz der Froudezahl ist damit für einen weiten Brennerbereich nachgewiesen.

Die gute Darstellung der Flammenlängen größerer Tanks durch die Gerade a in Bild 6.-5 läßt Zweifel an der Aussage von BLINOV und CHUDJAKOV [8, 10] aufkommen, daß die bezogene Flammenlänge ab etwa 2 m Tankdurchmesser konstant sein soll. Diese Bedenken erhalten ihr Gewicht durch die Tatsache, daß sich die Autoren dabei nur auf einen einzigen Meßpunkt stützen.

Bis zum Vorliegen weiterer Messungen an Großtanks wird daher der Gebrauch von Gleichung 6.-41 auch über den untersuchten Durchmesserbereich hinaus vorgeschlagen. Bei der praktischen Anwendung ist zu beachten, daß die Gasgeschwindigkeit bei den Tankbränden auf die obere Siedetemperatur des Produktes bezogen ist.

In Abschnitt 2.4 wurde als Ergebnis der Arbeit von SUNAVALA [30] die Beziehung

$$\frac{L}{d} = A B Fr^{1/5} \quad (2.-7)$$

mit

$$B = \left(\frac{1}{c_B}\right)^{2/5} \left(\frac{\rho_B}{\rho_F}\right)^{2/5} \left(\frac{\rho_F}{\rho_B - \rho_F}\right)^{1/5} \quad (2.-8)$$

für die bezogenen Flammenlänge auftriebsbestimmter Flammen angegeben. Hierbei variierte A in den theoretischen Ableitungen zwischen  $A = 2,45$  nach SUNAVALA [30] und  $A = 7,72$  nach STEWARD [31], so daß SUNAVALA als praktikablen Mittelwert  $A = 5,0$  angab.

In Tafel 6.-1 sind die nach Gleichung 2.-7 ermittelten Werte von  $A \cdot B$  für die angegebenen A und Propan- bzw. Methanflammen in Luft für verschiedene Flammentemperaturen zusammengestellt.

Tafel 6.-1: Werte  $A \cdot B$  nach Gleichung 2.-7 mit  $A = 2,45$ ,  $A = 5,0$  und  $A = 7,72$  für Propan- bzw. Methanflammen in Luft bei Flammentemperaturen von  $700^\circ \text{C}$ ,  $1000^\circ \text{C}$  und  $1600^\circ \text{C}$ .

Brennstoff	A · B								
	700 ° C			1000 ° C			1600 ° C		
	A =			A =			A =		
	2,45	5,0	7,72	2,45	5,0	7,72	2,45	5,0	7,72
Propan und Benzin $A \cdot B = 40$ aus Versuch (Bild 6.-5)	10,77	21,97	33,92	11,24	22,93	35,40	12,0	24,49	37,81
Methan und Erdgas $A \cdot B = 29$ aus Versuch (Bild 6.-5)	10,34	21,2	32,58	10,41	21,24	32,79	10,82	22,08	34,1

Bei der Beurteilung der in Tafel 6.-1 angegebenen Zahlenwerte ist zu berücksichtigen, daß einmal die einzusetzenden Werte für

$\rho_F$  und die Flammentemperatur über die gesamte Flamme gemittelt sind, und zum anderen Temperaturangaben der zum Vergleich herangezogenen Flammen nicht verfügbar waren.

Über letzteres kann aber hinweggesehen werden, da die Werte von  $A \cdot B$  bei konstantem A und bei einer Variation der Flammentemperatur zwischen  $700^\circ \text{C}$  und  $1600^\circ \text{C}$  nur geringfügige Veränderungen aufweisen. Bezogen auf den Wert bei  $1600^\circ \text{C}$  zeigt sich bei  $700^\circ \text{C}$  erst ein Abfall um 5 % bei Methan und Erdgas bzw. um 12 % bei Propan und Benzin.

Aus diesem Grund läßt sich aus Bild 6.-5 und Tafel 6.-1 der Schluß ableiten, daß der von STEWARD [31] angegebene Wert von  $A = 7,72$  den in Bild 6.-5 gezeigten Versuchsergebnissen verschiedener Autoren besser entspricht, als der von SUNAVALA [30] abgeleitete Wert von  $A = 2,45$  bzw.  $A = 5,0$ .

## 7. BRANDVERSUCHE AN MODELLTANKS MIT UND OHNE WASSERKÜHLUNG DES TANKMANTELS

Mit Brandversuchen an größeren Modelltanks wurden die bei den vorbergehenden Versuchen gefundenen Ergebnisse überprüft. Im einzelnen wurde dabei bestimmt:

1. Die Temperatur in der Flamme
2. Die Temperatur im Tankraum zwischen Tankmündung und Flüssigkeitsspiegel
3. Die Temperatur in der Flüssigkeit
4. Die Temperatur der Tankwand
5. Die Abbrandgeschwindigkeit bei verschieden hoch gefülltem Tank
6. Die durch Wasserkühlung des Tankmantels abführbare Wärmestromdichte
7. Die Eindringtiefe der Flamme in den Tankraum zwischen Mündung und Flüssigkeitsspiegel
8. Die Flammenlänge
9. Die Flammenstrahlung

Die Punkte 8 und 9 wurden im Rahmen des gleichzeitig durchgeführten AGF-Forschungsauftrages "Untersuchung über Temperaturfelder<sup>1)</sup>" behandelt. Über diese Versuche und ihre Ergebnisse wird daher hier nicht berichtet.

### 7.1. WAHL DER TANKABMESSUNGEN

Von der Flüssigkeit her gesehen gilt die Flamme von leuchtend verbrennenden Erdölprodukten ab etwa 1 m Tankdurchmesser als

---

1) Veröffentlichung als AGF-Forschungsbericht Nr. 22 in Vorbereitung

optisch dicht. Bei gefülltem Tank muß die Abbrandgeschwindigkeit dann unabhängig vom Tankdurchmesser sein. Der kleinste Tankdurchmesser wurde daher mit 1,28 m festgelegt. Mit zwei weiteren Tanks von 1,60 und 2,00 m Durchmesser konnte die obige Annahme überprüft werden.

Die Tankhöhe wurde einheitlich mit 2,0 m gewählt. So ergaben sich Verhältnisse von Tankhöhe zu Tankdurchmesser von 1,0 bis 1,56. Für die Untersuchung des Brandverhaltens bei verschiedenen Füllhöhen genügt dieser Bereich.

Alle Tankwände waren 3 mm dick. Bei dieser Tankdicke sind einerseits Tanks der untersuchten Größe auch bei Bränden noch ausreichend stabil, andererseits kann der Wärmewiderstand einer so dünnen Wand bei einer Wasserkühlung unberücksichtigt bleiben. Auch der Wärmetransport aus heißen Tankwandzonen in den Bereich unterhalb des Flüssigkeitsspiegels ist bei einem derartigen Verhältnis von Wanddicke zu Tankdurchmesser vernachlässigbar. Tafel 7.-1 führt die wesentlichen Tankabmessungen auf.

Für die Wasserkühlung der Tankwand waren nahe der Tankmündung und dem Tankfuß 70 mm breite Ringe angebracht. An diese Ringe ließ sich ein Blechmantel schrauben. So ergab sich ein Wassermantel um die Tankwand von 75 mm Dicke, der bis dicht unter die Tanköffnung reichte. Bild 7.-1 zeigt den Aufbau der Versuchstanks.

## 7.2. BRENNSTOFF

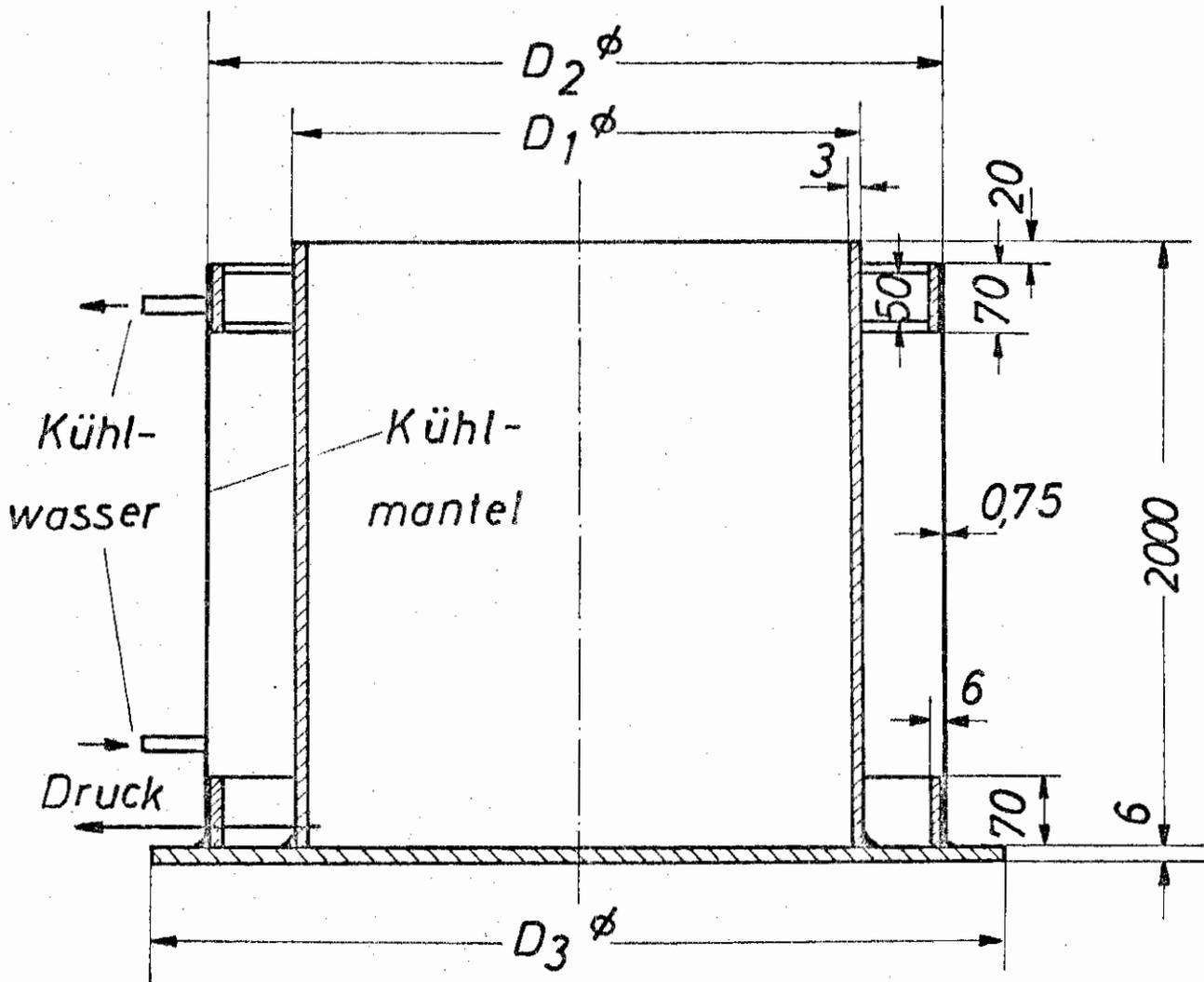
Als Brennstoff diente Gasöl III. Es hat unter Tankbrandbedingungen eine stark leuchtende Flamme, baut keine Wärmezone auf und ist sicher zu handhaben. Tafel 7.-2 zeigt die wichtigsten Daten des verwendeten Öles.

Tafel 7.-1: Tankabmessungen.

Tankaußendurchmesser [m]	1,28	1,60	2,00
Lichte Tankhöhe [m]	2,00	2,00	2,00
Wanddicke [mm]	3,0	3,0	3,0
Querschnittsfläche [m <sup>2</sup> ]	1,29	2,01	3,14
Durchmesser Verhältnis	1,00	1,25	1,56
Querschnittsverhältnis	1,00	1,56	2,44
Tankinhalt [m <sup>3</sup> ]	2,58	4,02	6,28

### 7.3. VERSUCHSAUFBAU

Bild 7.-2 zeigt den Versuchsaufbau. Der Tank (1) stand in einer Auffangwanne (2). Über ein Rohr (3) wurde der statische Druck der Flüssigkeitssäule im Tank dem elektrischen Meßwertaufnehmer (4) zugeführt. Im Meßverstärker (5) wurde daraus ein dem Flüssigkeitsdruck zugeordnetes Gleichspannungssignal gebildet, das von dem Mehrfach-Punkt drucker (6) als Funktion der Zeit aufgezeichnet wurde. Mit Chromel-Alumel-Mantelthermoelementen (7) von 1,6 mm



Tank Nr	$D_1$ mm	$D_2$ mm	$D_3$ mm
1	1280 "	1430 "	1600 "
2	1600 "	1750 "	2000 "
3	2000 "	2150 "	2500 "

Bild 7.-1: Versuchstanks.

Tafel 7.-2: Daten des verwendeten Brennstoffes  
(Mittelwerte aus zwei Lieferungen).

Bezeichnung	Gasöl III
Dichte bei 150°C [ g/cm <sup>3</sup> ]	0,842
Flammpunkt [°C]	65
unterer Heizwert (errechnet) [koal/kg]	10 225
Destillationsprobe nach ASTM	
abdestilliert [Vol-%]	bei Temperatur [°C]
5	208
10	229
20	256
30	276
40	290
50	302
60	313
70	324
80	334
90	346
95	356
Siedebeginn [°C]	167
Siedeende [°C]	367
Rückstand [Vol-%]	1,5

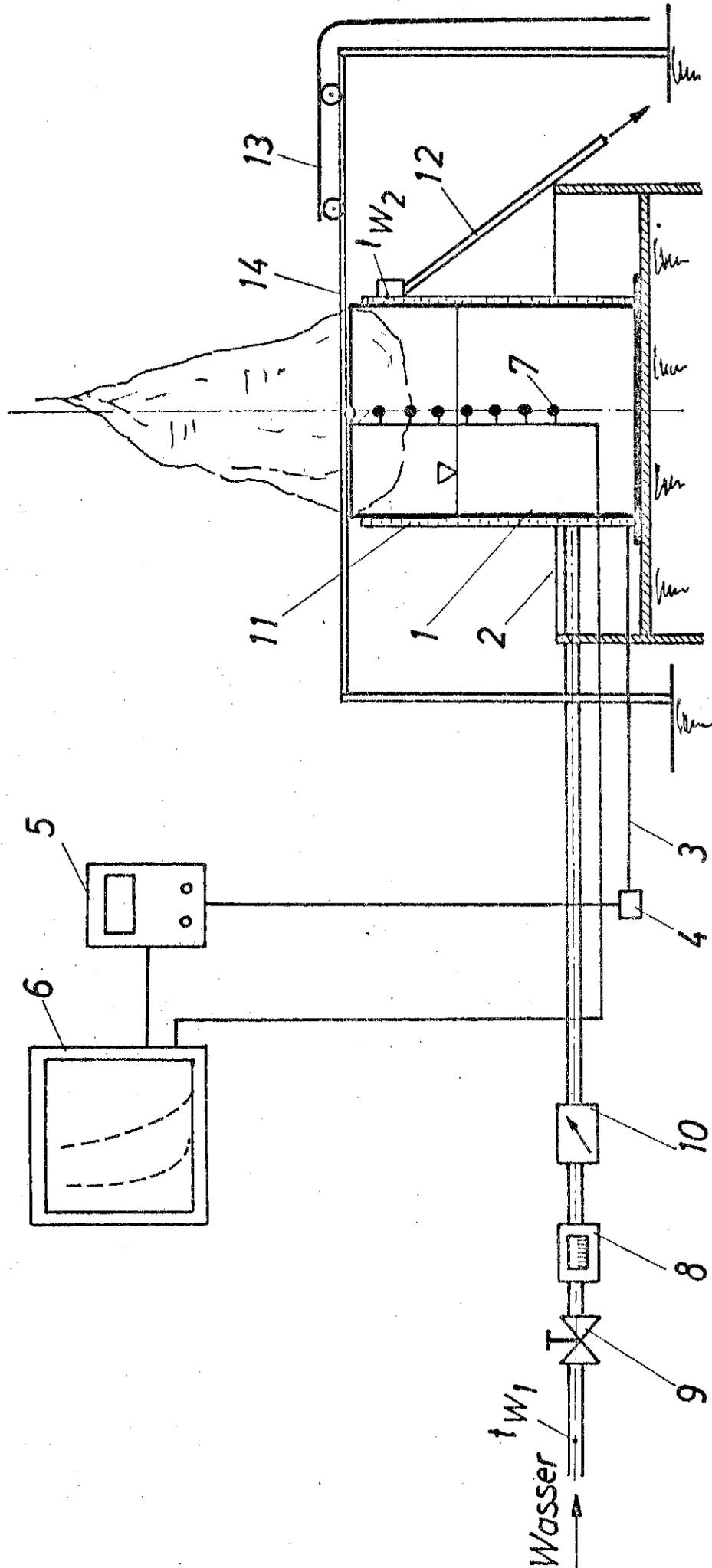


Bild 7.-2: Versuchsaufbau.

Durchmesser (hier nur im Tankinneren gezeichnet) wurden die Temperaturen im Tankinneren, in der Tankwand und im Kühlwasserzu- und -abfluß gemessen. Die Thermospannungen als Funktion der Branddauer registrierte ebenfalls der Punktdrucker (6).

Für die Aufzeichnung der Tankwandtemperatur wurden die Thermoelemente senkrecht untereinander mit 250 mm Abstand an die Tankwand geschraubt. Für die Messung im Tankinneren wurden die Thermoelemente am Tankfuß mit Klemmverschraubungen durch den Kühlmantel und die Tankwand geführt. Anschließend wurden sie zwischen zwei Vierkant-Kühlrohre von 10 mm Seitenlänge gespannt und gemeinsam mit diesen mit Asbest umwickelt. An den Meßstellen ragten die Enden der Thermoelemente etwa 100 mm aus dieser Isolierung heraus. Die Meßstellen lagen auf der Tankachse und hatten 300 mm Abstand voneinander.

Der Kühlwasserstrom wurde mit dem Volumenzähler (8) erfaßt. Mit einem Ventil (9) und einem Durchflußmesser (10) wurde der Wasserstrom konstant gehalten. Das Kühlerwasser trat am Tankfuß in den Kühlmantel (11) ein und floß über einen Überlauf in der Nähe der Tankmündung durch ein Rohr (12) wieder ab. Der Überlauf war so eingestellt, daß der Wasserspiegel 40 mm unterhalb der Tankmündung lag.

Der Tank wurde mit einer Asbestdecke (13) gelöscht, die auf einer Bahn (14) verschiebbar war.

#### 7.4. VERSUCHSBEDINGUNGEN

Nach Vorversuchen konnte mit einer maximalen Abbrandgeschwindigkeit von 2,0 bis 2,5 mm/min gerechnet werden. Bei

den gewählten Tankabmessungen reduzierten sich diese Werte bei fast leerem Tank auf 1,0 bis 1,5 mm/min. Für das vollständige Abbrennen eines gefüllten Tanks wäre somit eine Versuchszeit von ca. 20 Stunden erforderlich gewesen. Der Einfluß des absinkenden Flüssigkeitsspiegels kann aber auch ohne kontinuierliches Leerbrennen des Tanks beurteilt werden. Es genügen bereits relativ kurze Versuche mit verschiedenen Füllhöhen. Hier wurden drei Füllhöhen gewählt, die Tafel 7.-3 wiedergibt.

Tafel 7.-3: Mittlere Füllhöhen des Brennstoffes bei den Versuchen

Füllstand	voll	mittel	leer
Füllhöhe [m]	1,80	1,00	0,20
Abstand Tankmündung/ Flüssigkeit [m]	0,20	1,00	1,80

Die Bestimmung der Flammenstrahlung in verschiedenen Höhen über dem Tank und in verschiedenen Abständen vom Tank erforderte eine Versuchszeit von etwa 100 Minuten. Bei Versuchsbeginn wurde daher der Füllstand im Tank so eingestellt, daß sich die in Tafel 7.-3 genannten Mittelwerte ergaben. Die jeweiligen Füllhöhen bzw. Abstände der Tankmündung von dem Flüssigkeitsspiegel bei Versuchsbeginn und bei Versuchsende sowie die Versuchszeit zeigt Tafel 7.-4.

Der Füllstand wurde einerseits über den Druckaufnehmer (4) (Bild 7.-2) fortlaufend registriert und andererseits bei Beginn und Ende eines Versuches noch mit einem Längenmeßstab gemessen.

Für jeden Füllstand wurden bei den Tanks von 1,28 m und 1,60 m Durchmesser je zwei Versuche mit und ohne Wasserkühlung durchgeführt. Da die Meßergebnisse befriedigend übereinstimmten, wurde bei dem Tank mit 2,00 m Durchmesser nur noch je ein Versuch durchgeführt. Dies war eine wesentliche Erleichterung, da das Löschen mit der Asbestdecke bei dieser Tankgröße schon große Schwierigkeiten bereitete.

Mit Pulver oder Schaum konnten die Tanks nicht gelöscht werden, da sich sonst Löschmittelreste im verbleibenden Öl angesammelt hätten und mit Wasser konnte nicht gelöscht werden, da sich sonst ein Wasserpelster von einer unkontrollierbaren Höhe auf dem Tankboden gebildet hätte. Das nach dem Löschen im Tank verbleibende Öl wurde wieder für die nächsten Versuche verwendet. Die neue Füllhöhe wurde durch Zu- oder Abpumpen aus Vorratsbehältern eingestellt. Dies war zulässig, da das Öl keine Wärmezone aufbaut, d.h., bis auf eine sehr dünne Schicht an der Flüssigkeitsoberfläche verändert es sich durch den Brand nicht.

Da die Temperatur im Tankinnern und die Tankwandtemperatur nicht gleichzeitig gemessen werden konnten, wurde im allgemeinen die Temperatur auf der Tankachse bei den Versuchen mit Wasserkühlung der Tankwand und die Tankwandtemperatur bei den Versuchen ohne Wasserkühlung der Tankwand bestimmt. Zur Kontrolle wurde allerdings die Tankinnentemperatur bei zwei Versuchen (Tank 1,28 m und 1,60 m Durchmesser, leer) ohne Wasserkühlung der Tankwand ermittelt.

Bei den Versuchen mit Wasserkühlung wurde der Kühlwasserstrom während der Versuchszeit konstant gehalten. Er wurde so eingestellt, daß das Wasser nicht zum Sieden kam.

Um Witterungseinflüsse möglichst klein zu halten, wurde

nur bei Windgeschwindigkeiten unter 4,0 m/s (Windstärke 3) und bei niederschlagsfreiem Wetter gemessen.

## 7.5. MESSERGESBNISSSE

### 7.5.1. ABBRANDGESCHWINDIGKEIT

Tafel 7.-4 zeigt die unter verschiedenen Bedingungen ermittelten Abbrandgeschwindigkeiten. Die Werte sind aus dem Füllhöhenunterschied und der Branddauer errechnet. Ein Vergleich mit den Werten aus der fortlaufenden Druckmessung berechtigt zu diesem einfachen Verfahren. Wie man Tafel 7.-4 entnimmt, ändert sich die Füllhöhe während der Brennzeit nur relativ gering. Die maximale Änderung betrug in der Einstellung "voll" 40 cm, in der Einstellung "mittel" 20 cm und in der Einstellung "leer" 15 cm. Während dieser verhältnismäßig geringfügigen Füllstandsänderung bei halbvollen bzw. leerem Tank ändert sich die Abbrandgeschwindigkeit während der Branddauer nicht meßbar. Aber auch bei gefülltem Tank mit größeren Füllhöheänderungen zeigt die fortlaufende Druckmessung eine gleichmäßige Absenkung, d.h. eine konstante Abbrandgeschwindigkeit, an. Auch die geringfügig niedrigere Abbrandgeschwindigkeit in der Anfangsphase des Brandes kann bei allen drei Füllhöhen unberücksichtigt bleiben.

Die zweifach ausgeführten Versuche mit den Tanks von 1,28 m und 1,60 m Durchmesser zeigen ferner die ausreichende Reproduzierbarkeit der Abbrandgeschwindigkeiten.

### 7.5.2. TEMPERATUREN IM TANKINNEREN UND IN DER TANKWAND

Die Bilder 7.-4 bis 7.-33 (siehe Anhang) zeigen die Temperaturen auf der Tankachse und in der Tankwand als Funktion der

Tafel 7.-4: Tankdurchmesser, Füllstand, Brennzeit und Abbrandgeschwindigkeit bei den einzelnen Versuchen.

Ver- such Nr.	Tank- durch- messer [cm]	Wasser- kühlung	Temperatur- messung	Abstand Beginn [cm]	Tanköff- Ende [cm]	Brand- dauer [min]	Abbrandge- schwindigkeit [mm/min]
1	128	ja	innen	9,0	49,0	199,0	2,01
2	128	ja	innen	9,0	28,5	95,0	2,05
3	128	ja	innen	95,5	108,0	101,5	1,23
4	128	ja	innen	88,0	102,0	94,0	1,49
5	128	ja	innen	175,5	184,5	88,0	1,02
6	128	ja	innen	174,0	182,5	82,0	1,04
7	128	nein	außen	10,5	34,0	108,0	2,18
8	128	nein	außen	11,0	33,0	90,0	2,44
9	128	nein	außen	94,0	108,0	110,0	1,27
10	128	nein	außen	96,0	111,5	105,5	1,47
11	128	nein	innen	172,5	182,5	103,5	0,97
12	128	nein	außen	174,5	183,0	105,5	0,81
13	160	ja	innen	10,0	27,5	93,0	1,88
14	160	ja	innen	10,5	32,0	98,0	2,19
15	160	ja	innen	95,0	109,5	109,5	1,32
16	160	ja	innen	95,0	114,5	121,0	1,61
17	160	ja	innen	174,5	185,5	108,0	1,02
18	160	ja	innen	175,0	185,5	107,5	0,98
19	160	nein	außen	9,0	35,1	117,0	2,23
20	160	nein	außen	15,5	44,5	114,0	2,54
21	160	nein	außen	91,5	111,0	106,0	1,84
22	160	nein	außen	91,5	108,0	100,0	1,65
23	160	nein	außen	177,5	188,0	95,0	1,11
24	160	nein	innen	175,0	189,5	113,0	1,28
25	200	ja	innen	10,5	29,5	83,0	2,29
26	200	ja	innen	95,0	113,5	91,0	2,03
27	200	ja	innen	169,5	181,5	75,0	1,60
28	200	nein	außen	13,5	44,0	130,0	2,35
29	200	nein	außen	93,5	111,0	97,0	1,80
30	200	nein	außen	173,0	188,0	91,0	1,65

Branddauer. Auf den Bildern ist neben der Ordinate jeweils der Tank mit der Lage der Thermoelemente, der Füllhöhe und der verbrannten Ölschicht skizziert. Die den jeweiligen Abstand der einzelnen Thermoelemente von der Tanköffnung kennzeichnenden Symbole können aus Bild 7.-3 (siehe Anhang) entnommen werden. Auf den Bildern 7.-4 bis 7.-33 sind diese Symbole ebenfalls neben der Tankachse bzw. der Tankwand eingezeichnet.

Auf den Bildern sind ferner die mit Tafel 7.-4 übereinstimmenden Versuchsnummern und der Tankdurchmesser angegeben. Durch den Zusatz m.W. bzw. o.W. hinter dem Tankdurchmesser wird auf Versuche mit Wasserkühlung (m.W.) bzw. ohne Wasserkühlung (o.W.) hingewiesen.

#### 7.5.3. DURCH KÜHLUNG ABGEFÜHRTER WÄRMESTROM

Aus der der Tankwand zugeführten Wassermenge und der Kühlwassertemperatur am Ein- bzw. Austritt wurde der durch Kühlung der Tankwand abgeführte Wärmestrom berechnet. Dieser Wärmestrom wurde auf die Tankwandfläche zwischen Tankmündung und Flüssigkeitsspiegel bezogen. Dabei wurde die Zunahme der Wandfläche durch den mit der Abbrandgeschwindigkeit absinkenden Flüssigkeitsspiegel berücksichtigt. Die Bilder 7.-34 bis 7.-36 geben die Stromdichten der durch Kühlung der Tankwand über dem Flüssigkeitsspiegel abgeführten Wärme als Funktion der Branddauer wieder.

#### 7.5.4. TEMPERATURVERLAUF IN DER FLÜSSIGKEIT

Bild 7.-37 zeigt für den verwendeten Brennstoff den Temperaturverlauf unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche. Man erkennt deutlich, daß die Erwärmung nur unwesentlich in das Öl ein-

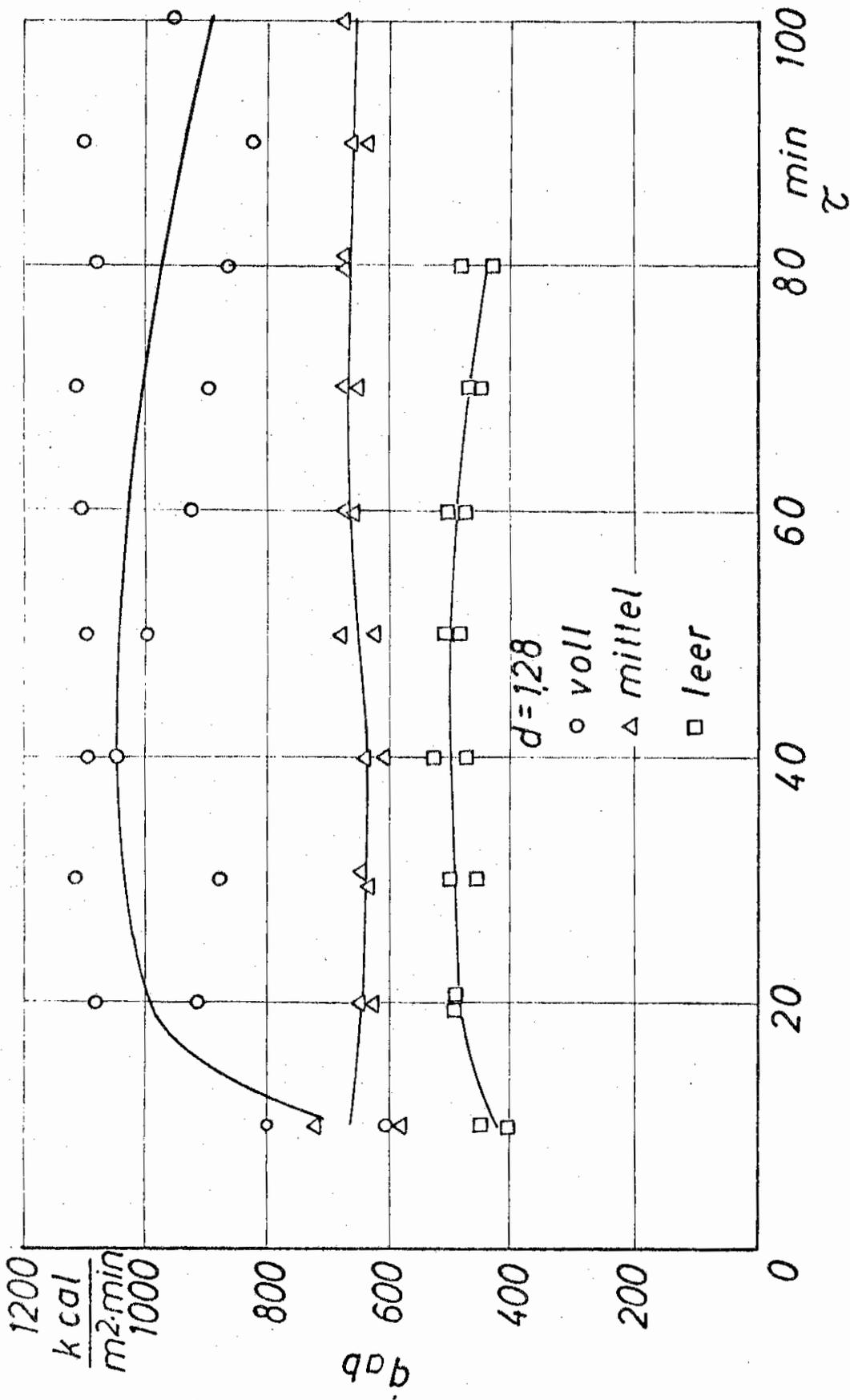


Bild 7.-34: Zeitlicher Verlauf der Stromdichten der durch Wasserkühlung der Tankwand abgeführten Wärme.

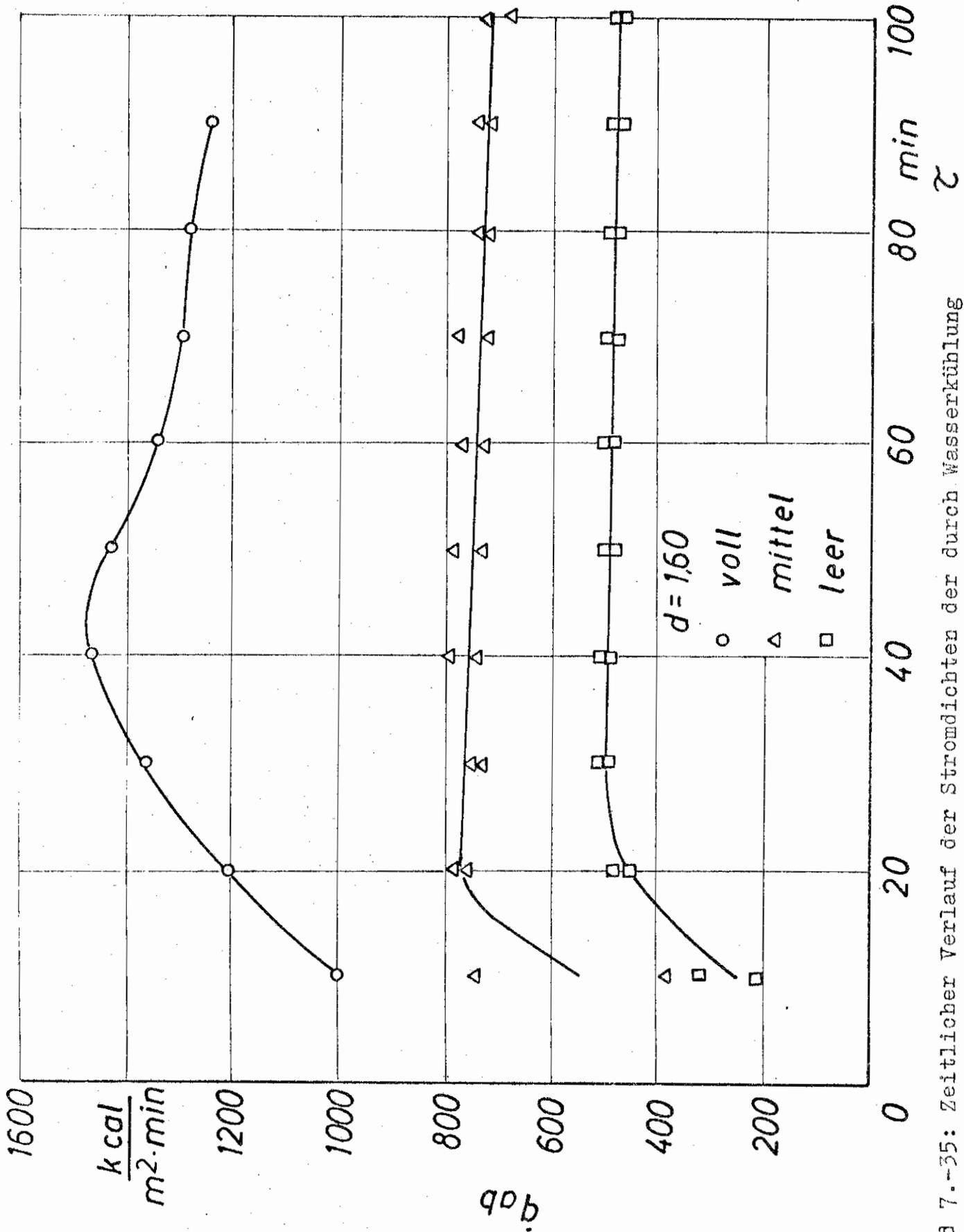


Bild 7.-35: Zeitlicher Verlauf der Stromdichten der durch Wasserkühlung der Tankwand abgeführten Wärme.

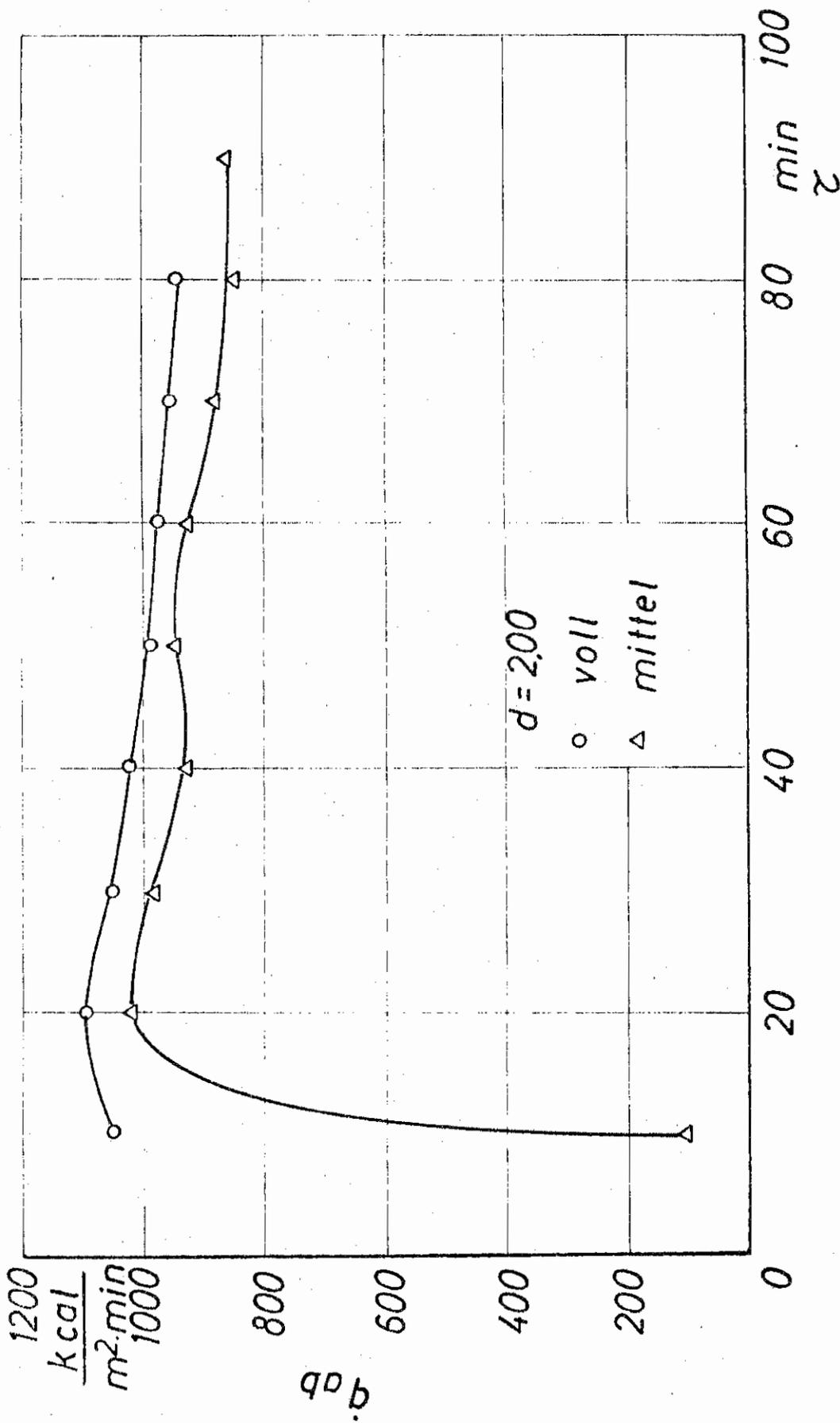


Bild 7.-36: Zeitlicher Verlauf der Stromdichten der durch Wasserkühlung der Tankwand abgeführten Wärme.

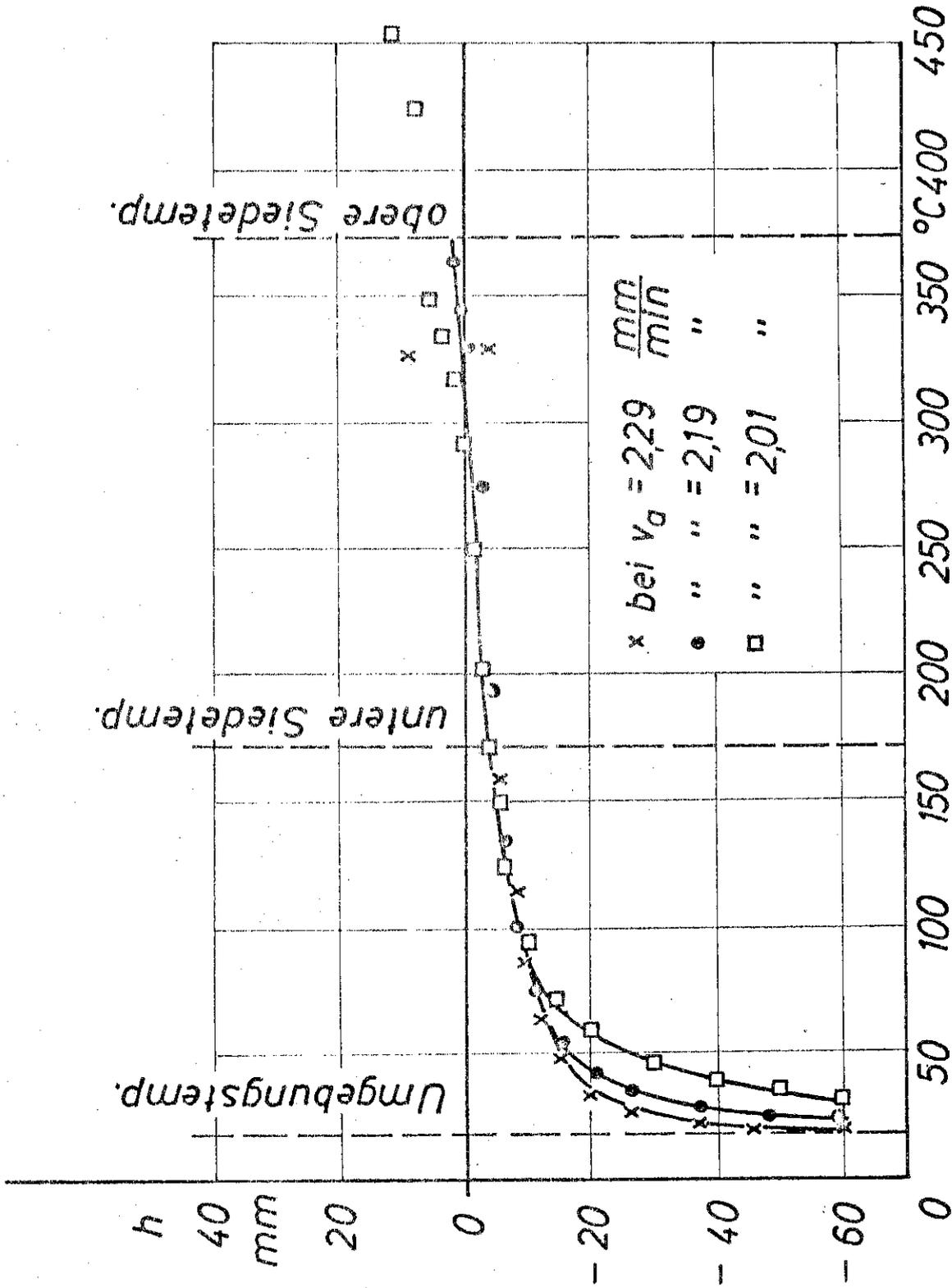


Bild 7.-37: Temperaturverlauf unterhalb der Oberfläche der brennenden Flüssigkeit bei verschiedenen Abbrandgeschwindigkeiten.

dringt. Der Abstand der Ebene, in der der Brennstoff die Temperatur des Siedebeginns aufweist, von der Flüssigkeitsoberfläche, die sich auf der oberen Siedetemperatur befindet, beträgt etwa 5 mm. Bereits 2 bis 3 cm unter dem Flüssigkeitsspiegel ist die Temperatur auf 50°C, d.h. nahezu auf Umgebungstemperatur, abgefallen.

Unterhalb der Ebene mit einer Öltemperatur von 100°C verlaufen die bei verschiedenen Abbrandgeschwindigkeiten aufgenommenen Kurven getrennt. So dringt die Erwärmung bei der kleinsten Abbrandgeschwindigkeit am tiefsten in die Flüssigkeit. Auf diese Erscheinung wurde schon in den Abschnitten 2 und 5 hingewiesen. Ebenso wurde dort schon erwähnt, daß dieser Effekt gering ist. Dies wird durch Bild 7.-37 bestätigt.

## 7.6. FOLGERUNGEN AUS DEN VERSUCHEN

### 7.6.1. FLAMMENTEMPÉRATUR

Die Temperaturen auf der Tankachse wurden nur bis zur Höhe der Tankmündung gemessen. Die Anzeige der mündungsnahen Thermoelemente wurde daher in einigen Fällen mit der durch ein Gesamtstrahlungs-pyrometer bestimmten Flammentemperatur oberhalb der Tankmündung verglichen. Beide Messungen stimmten gut überein. Die Flammentemperatur kann daher den entsprechenden Kurven der Bilder 7.-4 bis 7.-9, 7.-14, 7.-16 bis 7.-21 und 7.-27 bis 7.-30 entnommen werden. Es ergibt sich:

Bei den Füllhöhen "voll" und "mittel" zeigen die mündungsnahen Thermoelemente bei allen Tankdurchmessern eine Temperatur von 800 bis 900°C an. Lediglich in Bild 7.-29 ergeben sich etwa 1000°C. Diese Werte stimmen mit den Angaben in Abschnitt 2.2 gut überein. Die beiden Versuche ohne Wasserkühlung der Tankwand (Bild 7.-14 und 7.-27) zeigen ebenfalls

die genannten Werte. Bei diesen Füllhöhen hat die Tankwandtemperatur also keinen Einfluß. Ebenso zeigt sich auch kein Einfluß der Windgeschwindigkeit auf diese Temperaturen.

Bei dem Füllstand "leer" wird in der oberen Tankzone bei den beiden kleineren Tanks aber eine deutlich niedrigere Temperatur bei gekühlter Tankwand gemessen (Bild 7.-8, 7.-9, 7.-20 und 7.-21). Die Temperatur in der Nähe der Tankmündung liegt in diesen Fällen bei ca.  $700^{\circ}\text{C}$ . Das kann auf folgende Ursache zurückgeführt werden: In der Stellung "leer" atmeten beide Tanks stark. Dieses Pulsieren riß die Flammenfront stellenweise auf. Dadurch traten die Thermolemente auf der Tankachse kurzzeitig mit der kalten Tankwand in Strahlungsaustausch und zeigten so eine scheinbar niedrigere Flammentemperatur an.

#### 7.6.2. TEMPERATUR IM TANKRAUM ZWISCHEN FLAMME UND FLÜSSIGKEIT

Der Bereich zwischen Flamme und Flüssigkeit kann nicht eindeutig abgegrenzt werden. Für die Bestimmung der Temperatur in diesem Bereich werden daher die dicht über dem Flüssigkeitsspiegel auf der Tankachse angeordneten Thermolemente herangezogen. Deren Temperaturangaben liegen aber in allen Fällen nur um etwa  $100^{\circ}\text{C}$  niedriger als die der mündungsnahen Thermolemente. Im Tankraum zwischen Mündung und Flüssigkeitsspiegel herrscht also annähernd die gleiche Temperatur.

#### 7.6.3. TEMPERATUR DER TANKWAND

Im Gegensatz zur Flammentemperatur ist die Temperatur der Tankwand oberhalb des Flüssigkeitsspiegels außerordentlich stark von der Windgeschwindigkeit abhängig. Die auf einer

einzigsten Tankmantellinie gemessenen Temperaturen sind daher eine Funktion von Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

Die höchsten Tankwandtemperaturen wurden dicht unterhalb der Tankmündung gemessen. Sie liegen zwischen 750 und 800°C. Diese hohen Temperaturen fallen jeweils in Zeitspannen, in denen Windstille herrschte. Sonst sind die Tankwandtemperaturen deutlich niedriger. Die Tanks überstanden daher die zahlreichen Versuche ohne wesentliche Verformungen. Da bei Bränden von Großtanks erhebliche Deformationen bei ungekühlter Tankwand auftreten, liegt der Schluß nahe, daß bei den hier untersuchten Tankgrößen die normalerweise möglichen Wandtemperaturen noch nicht erreicht werden.

In erster Linie wird man die niedrigen Wandtemperaturen auf eine nicht ausreichende optische Dichte der Flamme im Tankinneren in radialer Richtung zurückführen müssen. Um praxisnahe Wandtemperaturen zu erhalten, sollten daher noch größere Modelltanks untersucht werden. Um den Windeinfluß berücksichtigen zu können, sollten außerdem die Temperaturmeßstellen über den gesamten Tankumfang verteilt werden, wenn die Versuche nicht in einem geschlossenen Raum durchgeführt werden können.

Zum Flüssigkeitsspiegel hin fallen die Tankwandtemperaturen deutlich ab. Im allgemeinen beträgt der Temperaturunterschied in der Wand zwischen Mündung und Flüssigkeit etwa 200 grd. Dies ist u.a. auch eine Folge der sehr dünnen Wanddicke, die Wärmeausgleichsvorgänge behindert.

Unterhalb des Flüssigkeitsspiegels sinkt die Wandtemperatur innerhalb weniger Zentimeter auf die Umgebungstemperatur ab. Der Temperaturverlauf entspricht etwa dem in der Flüssigkeit.

#### 7.6.4. EINDRINGTIEFE DER FLAMME IN DEN TANK

In Abschnitt 4.4.1 wurde für Modelltanks bis 25,8 cm Durchmesser eine Beziehung zwischen der Eindringtiefe der Flamme in den Tankraum, der Gasgeschwindigkeit und dem Tankdurchmesser gefunden, die in Bild 4.-8 wiedergegeben ist. Wenn es sich bei dieser Darstellung um eine allgemeingültige Gesetzmäßigkeit handelt, die das Eindringen der Umgebungsluft in das Tankinnere beschreibt, müßte sich ein ähnliches Bild auch bei den größeren Tanks ergeben.

Da die Eindringtiefe der Flamme in das Tankinnere bei den größeren Tanks nicht direkt gemessen wurde, mußte die Lage des Flammenbodens mit dem in Abschnitt 6.4.1 beschriebenen Verfahren ermittelt werden. Dazu wurde wie folgt vorgegangen:

1. Die Abbrandgeschwindigkeit bei der Füllhöhe "voll" wurde gleich  $v_{a0max}$  gesetzt.
2. Mit der Abbrandgeschwindigkeit  $v_{a0}$  bei den anderen Füllhöhen wurde  $\bar{\varphi}_{ges}$  entsprechend Gleichung 6.-40

$$\frac{v_{a0}}{v_{a0max}} = \bar{\varphi}_{ges}$$

bestimmt.

3. Aus den Bildern 7.-4 bis 7.-33 wurden die mittlere Temperatur  $t_F$  und die mittlere Tankwandtemperatur  $t_W$  im unteren Teil der freien Tankwand abgeschätzt. Bei den Versuchen ohne Wasserkühlung wurden die Flammentemperaturen aus den Versuchen mit Wasserkühlung übernommen.
4. Mit  $t_F$  und  $T_W$  sowie mit der oberen Siedetemperatur  $t_S$  des Öles wurde  $m$  nach der sich aus Gleichung 6.-25 ergebenden Beziehung

$$m = \frac{T_W^4 - T_S^4}{T_F^4 - T_S^4} \quad (7.-1)$$

ermittelt.

5. Mit  $\bar{\varphi}_{ges}$  nach Gleichung 6.-40 und  $m$  nach Gleichung 7.-1 wurde aus Bild 6.-2 der auf den Tankdurchmesser bezogene Abstand des Flammenbodens von der Flüssigkeitsoberfläche  $h_{FB}/d$  bestimmt.
6. Bei allen Tanks wurde von dem mittleren Abstand zwischen Tankmündung und Flüssigkeit von 100 cm bei der Füllhöhe "mittel" und 180 cm bei der Füllhöhe "leer" der jeweilige Abstand des Flammenbodens von der Flüssigkeitsoberfläche abgezogen. Die so erhaltene Eindringtiefe der Flamme in den Tank wurde anschließend wieder auf den Tankdurchmesser bezogen.

In Bild 7.-38 ist die nach diesem Verfahren ermittelte Eindringtiefe der Flamme in den Tank über der Abbrandgeschwindigkeit dargestellt. Beide Größen sind auf den Tankdurchmesser bezogen. Um auch für die Abszisse einen dimensionslosen Wert zu erhalten, wurde  $v_a/d$  noch mit dem dimensionsbehafteten Faktor  $E_3$  erweitert. Es zeigt sich in Bild 7.-38 ein entsprechender Verlauf der Eindringtiefe wie in Bild 4.-8. Allerdings fallen hier die Geraden für die einzelnen Tankdurchmesser nicht mehr zusammen. Für die einzelnen Tankdurchmesser ergibt sich der Verlauf der Geraden ähnlich wie nach Gleichung 4.-1 zu

$$\frac{x}{d} = E_3 \frac{v_a}{d} - E_4 \quad (7.-2)$$

mit  $v_a$  in cm/s und  $d$  in cm.

Hierin ist

$$\begin{aligned} E_3 &= 80000 \text{ s und} \\ E_4 &= 2,01 \text{ bei } d = 128 \text{ cm,} \\ E_4 &= 1,66 \text{ bei } d = 160 \text{ cm,} \\ E_4 &= 1,81 \text{ bei } d = 200 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Ein Vergleich von Gleichung 4.-1 mit Gleichung 7.-2 zeigt, daß  $E_4$  und  $E_2$  die gleiche Größenordnung aufweisen,  $E_1$  und  $E_3$  sich

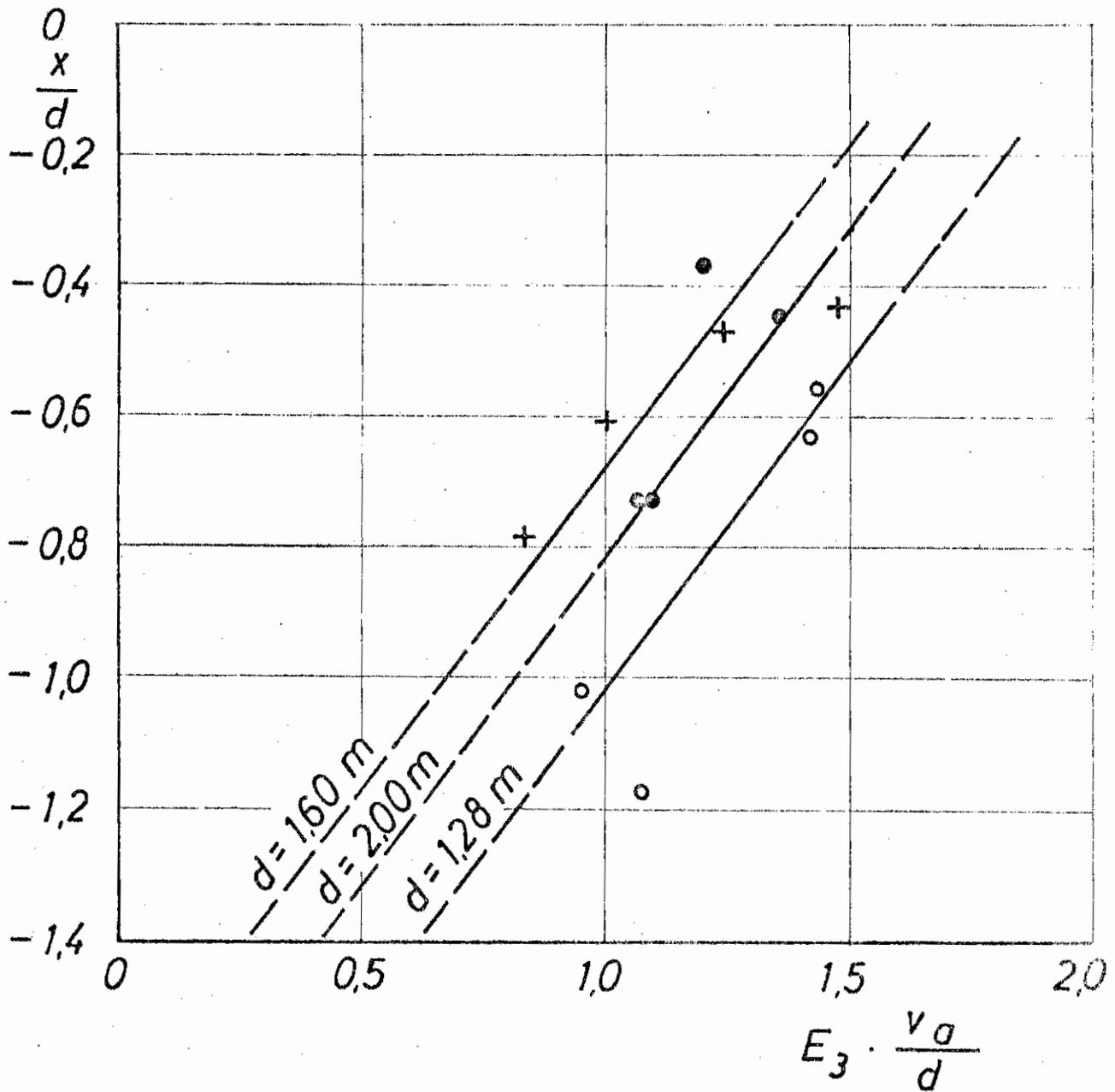


Bild 7.-38: Eindringtiefe der Flamme in den Tank als Funktion der Abbrandgeschwindigkeit und des Tankdurchmessers.

$E_3$  = dimensionsbehaftete Konstante.

aber erheblich unterscheiden. Dies liegt z.T. daran, daß  $E_1$  mit der Gasgeschwindigkeit und  $E_3$  mit der Abbrandgeschwindigkeit berechnet wurden. Bei Erdölprodukten unterscheidet sich die Dampf- von der Abbrandgeschwindigkeit um einen Faktor der Größenordnung  $10^2$ . Damit ist  $E_3$  nur noch um etwa eine Zehnerpotenz größer als  $E_1$ . Dieser Unterschied kann z.Z. noch nicht geklärt werden. Er hängt möglicherweise mit den unterschiedlichen Eigenschaften der verwendeten Brennstoffe Gasöl III und Propan zusammen.

Außerdem ist das hier benutzte Verfahren zur Ermittlung der Lage des Flammenbodens mit zahlreichen Fehlern behaftet. Darauf wird man auch die in Bild 7.-38 auftretende Aufspaltung der in Bild 4.-8 für die verschiedenen Tankdurchmesser noch gemeinsamen Geraden in drei Geraden zurückführen können.

So wurde für die wassergekühlte Tankwand  $m = 0$  gesetzt, da  $m$  nach Abschnitt 6.1 nur für

$$T_W \geq T_S$$

erklärt ist. Bei Wasserkühlung ist aber

$$T_W < T_S.$$

Ferner ist eine genaue Abschätzung der mittleren Flammen- und Tankwandtemperatur schwierig. Diese Temperaturen gehen aber mit der vierten Potenz in die Rechnung ein. Ebenso setzt die Annahme eines Flammenbodens voraus, daß die Flamme im unteren Bereich optisch dicht ist. Nur für diesen Fall kann  $v_a = v_{a,0}$  gesetzt werden. Die optische Dichte der Flamme bei geringem Füllstand und kleinem Tankdurchmesser ist aber keineswegs sichergestellt.

Trotz dieser aufgezeigten Mängel ist das aus Bild 7.-38 ersichtliche Ergebnis befriedigend und genügt für den qualita-

tiven Nachweis einer bestimmten Gesetzmäßigkeit für das Eindringen der Flamme in einen Tank.

#### 7.6.5. KÜHLUNG DER TANKWAND

Die Bilder 7.-34 bis 7.-36 zeigen eine Abnahme der Wärmestromdichte mit sinkendem Flüssigkeitsstand im Tank. Dies ist eine Folge der abnehmenden Wärmezufuhr an die Tankwand. Wie bereits mehrmals ausgeführt wurde, ist bei diesen Tankabmessungen mit wachsender Eindringtiefe die Flamme im Tankinneren in radialer Richtung nicht mehr optisch dicht. Ferner vergrößert sich der Abstand zwischen dem Flammenboden und der Flüssigkeit mit sinkendem Flüssigkeitsspiegel. Dem zwischen Flammenboden und Flüssigkeit liegenden Tankwandabschnitt wird dadurch weniger Wärme zugeführt als dem Abschnitt zwischen Flammenboden und Tankmündung.

Bei fast gefülltem Tank (Füllstand "voll") entfallen diese Einschränkungen größtenteils. Hier ergibt sich für alle drei untersuchten Tanks eine Wärmestromdichte von 1000 bis 1200 kcal/m<sup>2</sup> min, maximal von 1500 kcal/m<sup>2</sup> min (Bild 7.-35).

Bei einer Flammentemperatur von ca. 800°C und einer Wassertemperatur von ca. 90°C ergibt sich damit annähernd die Wärmedurchgangszahl für diese Tankzone zu

$$k = 100 \text{ kcal/m}^2 \text{ h grad} .$$

Nach den Ausführungen in Abschnitt 7.6.3 ist allerdings noch mit einer Steigerung dieses Wertes mit zunehmendem Tankdurchmesser zu rechnen.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG

Tanklager stellen wegen ihrer Energiehäufung eine besonders große Brandgefahr dar. In zahlreichen Versuchen wurde daher der Brandablauf von in Tanks gelagerten Flüssigkeiten untersucht. Bisher wurden aber nur Detailfragen geklärt. Die Darstellung des gesamten Brandablaufs mit absinkendem Flüssigkeitsspiegel gelang noch nicht.

Die vorliegenden Arbeiten stimmen darin überein, daß bei stark leuchtenden Flammen der Wärmerücktransport von der Flamme in die Flüssigkeit fast ausschließlich durch Wärmestrahlung erfolgt. Diese Wärmestrahlung geht von der unteren Flammenzone und dem Tankwandabschnitt zwischen Flamme und Flüssigkeit aus. Durch den Wärmerücktransport verdampft in der Zeiteinheit eine bestimmte Flüssigkeitsmenge, steigt als Dampfstrom im Tank auf und unterhält die Verbrennung. Die auf die Zeiteinheit bezogene Absenkung der Oberfläche nennt man Abbrandgeschwindigkeit. Sie ist die maßgebende Kenngröße eines Tankbrandes. Sie ergibt sich durch eine Wärmebilanz zwischen Wärmerückstrom und Wärmeaufnahme der gelagerten Flüssigkeit.

In dieser Arbeit werden die einzelnen Einflußgrößen auf die Wärmebilanz aufgezeigt. Dann wird in einer Literatur-Übersicht untersucht, welche der Größen bereits bekannt sind. Dabei zeigt sich, daß das Verhalten von Flüssigkeiten mit Wärmezonenebildung und der Brandablauf mit absinkendem Flüssigkeitsspiegel noch nicht ausreichend geklärt sind. Für den letzteren Fall werden lediglich das Eindringen der Flammen in den Tank und eine geringer werdende Abbrandrate erwähnt.

Der Verbrennung im Tankinneren kommt nun eine besondere Bedeutung zu, da Lage und Form der unteren Flammenzone wesentlich in die Strahlungsrechnung eingehen.

Es wurden daher zwei Versuchsreihen durchgeführt:

Einmal wurde nachgewiesen, daß eine der vier möglichen Wärmetransportkomponenten, die Wärmezufuhr durch die Tankwand im Bereich unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche, schon bei kleinen Tanks und kaum leuchtenden Flammen vernachlässigt werden kann.

Zum anderen wurde die Verbrennung im Tankinneren untersucht. Gemessen wurde die Lage der unteren Flammenfront, die zeitlich mittleren Temperaturen, die Temperaturschwankungen nach Amplitude und Frequenz und die Flammenlänge an Modelltanks von 8,6 bis 25,8 cm Durchmesser. Brennstoff war Propan, und die Gasgeschwindigkeit entsprach der beim Brand realer Tanks auftretenden Dampfgeschwindigkeit.

Diese letzteren Versuche ergaben für das Rechenmodell die Berechtigung, die untere Flammenbegrenzung im Tank durch einen ebenen Flammenboden zu ersetzen. Trotz klarer Ergebnisse für die Lage des Flammenbodens im Tank wurde eine Extrapolation auf Tankdurchmesser von 10 bis 100 m für nicht möglich gehalten. Der Abstand des Flammenbodens vom Flüssigkeitsspiegel bleibt für das Rechenmodell daher noch offen.

In dem Rechenmodell wird der Wärmetransport von dem Flammenboden und dem Tankwandabschnitt zwischen Flammenboden und Flüssigkeitsoberfläche zur Flüssigkeit bestimmt. Die daraus resultierende Abbrandgeschwindigkeit wird als Funktion der Füllhöhe des Tanks und der Branddauer für Flüssigkeiten ohne Wärmezone angegeben.

Auch ohne Kenntnis des Abstandes Flammenboden-Flüssigkeit gibt das Rechenmodell bereits eine Abschätzung über den Einfluß der Wandkühlung bei realen Tanks und erlaubt die Bestimmung der maximalen Abbrandgeschwindigkeit flüssiger Erdölpro-

dukte. Es wird gezeigt, wie an Hand des Rechenmodells künftige Versuche gestaltet werden sollten.

Für die Länge der aus Tanks brennenden Flammen wird aus den Versuchen und Literaturangaben eine Abhängigkeit von der Froudezahl abgeleitet, die bis 22,9 m Tankdurchmesser experimentell belegt ist.

Abschließend folgten Brandversuche an Tanks von 1,28, 1,60 und 2,00 m Durchmesser, 2,0 m Höhe und 3 mm Wanddicke. Die Tanks konnten mit Wasser gekühlt werden. Als Brennstoff diente Gasöl III. Es wurde die Abbrandgeschwindigkeit bei verschiedenen Füllhöhen, der zeitliche Temperaturverlauf auf der Tankachse und in der Tankwand sowie der durch Wandkühlung abgeführte Wärmestrom ermittelt. Aus diesen Werten wurde u.a. die Lage des Flammenbodens bestimmt. Dabei ergab sich eine Abhängigkeit, wie sie bereits für die Modelltanks bis 25,8 cm Durchmesser gefunden wurde.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Verordnung über die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Lagerung, Abfüllung und Beförderung brennbarer Flüssigkeiten zu Lande.
- [2] Burgoyne, J.H.; Katan, L.L.: Fires in open tanks of petroleum products: Some fundamental aspects. Journ. of the Inst. of Petr. 33 (1947), S. 158-185.
- [3] Grumer, J.; Strasser, A.; Kubala, T.A.; Burgess, D.S.: Uncontrolled diffusive burning of some new liquid propellants. Fire Res. Abst. and Rev. 3 (1961), S. 159-176.
- [4] Burgess, D.S.; Strasser, A.; Grumer, J.: Diffusive burning of liquid fuels in open tanks. Fire Res. Abst. and Rev. 3 (1961), S. 177-192.
- [5] Spalding, D.B.: The burning rate of liquid fuels from open trays by natural convection. Fire Res. Abst. and Rev. 4 (1962), S. 234-236.
- [6] Spalding, D.B.: Some fundamentals of combustion. London, 1955.
- [7] Hottel, H.C.: Certain laws governing diffusive burning of liquids. Fire Research Abst. and Rev. 1 (1959), S. 41-44.
- [8] Blinov, V.I.; Chudjakov, G.N.: Über einige Gesetzmäßigkeiten der Diffusionsverbrennung von Flüssigkeiten. Vorträge der Akd. d. Wiss. der UdSSR, Bd. 113, Moskau 1957, Nr. 5, S. 1094-1098 (Orig. russ.).
- [9] Drotschmann, H.: Die Frage des Abbrandes von Flüssigkeiten in Tanks. VFDB-Sonderheft 3 (1960), S. 106-108.

- [10] Blinov, V.I.; Chudjakov, G.N.: Diffusionsverbrennung von Flüssigkeiten.  
Moskau 1961 (Orig. russ.).
- [11] Werthenbach, H.G.: Brandversuche mit Modellen.  
Forschungsbericht für das Bundeswirtschaftministerium Bonn, 1965. Nicht veröffentlicht. Auszugsweise in:  
VFDB-Zeitschrift 16 (1967), S. 43-49.
- [12] Akita, K.; Yumoto, T.: Heat transfer in small pools and rates of burning of liquid methanol.  
In: Tenth Symposium (Internation.) on Combustion. Pittsburgh 1965, S. 943-948.
- [13] Hall, H.H.: Boiling over of crude petroleum burning in tanks. Mech.Eng. 47 (1925), S. 540-544.
- [14] Pavlov, P.P.; Khovanova, A.M.: Heat transfer in oil products burning from a free surface.  
Symp. on Chem.Means for Fire Extinktion and Fire Prevention. Moskau 1954 (Orig. russ.).
- [15] Rasbash, D.J.; Rogowski, Z.W.; Stark, G.W.V.: Properties of fires of liquids.  
Fuel 35 (1956), S. 94-107.
- [16] Magnus, G.: Tests on combustion velocity of liquid fuels and temperatur distribution in flame and beneath surface of the burning liquid.  
In: Internat. Symp. on the Use of Models in Fire Research, Washington 1961, S. 76-90.
- [17] Hinrichs, B.R.: Probleme der Modellbrandtechnik.  
VFDB-Zeitschrift 14 (1965), S. 42-50.
- [18] Gordon, W.; Mc Millan, R.D.: Temperatur distribution within aircraft fuel fires.  
Fire-Technology, 1 (1965), S. 52-61.

- [19] Tarifa, C.S.; Notario, del, P.P.; Valdes, E.C.: Open fires. Final Report of Grants FG-SP-114 and FG-SP-146 (Vol. I). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Madrid 1967.
- [20] Corlett, R.C.: Gas fires with pool-like boundary conditions. Combustion and Flame 12 (1968) 1, S. 19-32.
- [21] Burgess, D.S.; Grumer, J.; Wolfhard, H.G.: Burning rates of liquid fuels in large and small open trays. In: Intern.Symp. on the Use of Models in Fire Research, Washington 1961, S. 68-75.
- [22] Burgess, D.; Grumer, J.; Comments on "The burning rate of liquid fuels from open trays by natural convection" by D.B. Spalding. Fire Res. Abstr. and Rev. 4 (1962), S. 236-238.
- [23] Emmons, H.W.: Some observations on pool burning. In: International Symp. on the Use of Models in Fire Research, Washington 1961, S. 76-90.
- [24] Burke, S.P.; Schumann, T.E.W.: Diffusionsflames. Ind. Eng. Chem. 20 (1928), S. 998-1004.
- [25] Putman, P.H.; Speich, C.F.: A model study of the interaction of multible turbulent diffusion flames. In: Ninth (International) Symposium on Combustion, New York und London, 1963, S. 867-875.
- [26] Thomas, P.H.: The size of flames from natural fires. In: Ninth (International) Symposium on Combustion, New York und London, 1963, S. 844-858.
- [27] Fire Research 1961, London 1962.
- [28] Kremer, H.: Zur Ausbreitung inhomogener turbulenter Freistrahlen und turbulenter Diffusionsflammen. Karlsruhe 1954, Techn. Hochschule, Dr.Ing. Diss.

- [29] Hess, K.: Flammenlänge und Flammenstabilität.  
Karlsruhe 1965, Techn.Hochschule, Dr.Ing. Diss.
- [30] Sunavala, P.D.: Dynamics of the bouyant diffusion  
flame.  
Journ. Inst. Fuel 40 (1967), S. 492-497.
- [31] Steward, F.R.: Linear flame heights for various fuels.  
Combustion and flame 8 (1964), S. 171-178.
- [32] Rayleigh: The theory of sound.  
2.nd edit. London, 1926.
- [33] Rutherford, A.G.; Fells, J.: Oscillations in  
aerated Bunsen flames.  
Journ. Inst. Fuel, 42 (1969), S. 26-28.
- [34] Markstein, G.H.: Interaction of flow pulsations  
and flames propagation.  
Journal of the Aeronautical Sciences, 18 (1951),  
S. 428-429.
- [35] Pepperhoff, W.: Temperaturstrahlung.  
Steinkopff-Verlag, Darmstadt 1956.
- [36] Eckert, E.: Technische Strahlungsaustauschrechnungen.  
VDI-Verlag, Berlin 1937.
- [37] Unterlagen der Fa. Esso, Karlsruhe.

10. ANHANG

- Bild 7.-3: Anordnung der Thermoelemente an der Tankwand bzw. auf der Tankachse (Maße in mm).
- Bild 7.-4 bis 7.-9: Zeitlicher Temperaturverlauf auf der Tankachse. Versuch Nr. 1 - 6. Tankdurchmesser 1,28 m. m.W.= mit Wasserkühlung der Tankwand.
- Bild 7.-10 bis 7.-13: Zeitlicher Temperverlauf in der Tankwand. Versuch Nr. 7 - 10. Tankdurchmesser 1,28 m. o.W.= ohne Wasserkühlung der Tankwand.
- Bild 7.-14: Zeitlicher Temperaturverlauf auf der Tankachse. Versuch Nr. 11. Tankdurchmesser 1,28 m. o.W.= ohne Wasserkühlung der Tankwand.
- Bild 7.-15: Zeitlicher Temperaturverlauf in der Tankwand. Versuch Nr. 12. Tankdurchmesser 1,28 m. o.W.= ohne Wasserkühlung der Tankwand.
- Bild 7.-16 bis 7.-21: Zeitlicher Temperaturverlauf auf der Tankachse. Versuche Nr. 13 - 18. Tankdurchmesser 1,60 m. m.W.= mit Wasserkühlung der Tankwand.
- Bild 7.-22 bis 7.-26: Zeitlicher Temperaturverlauf in der Tankwand. Versuch Nr. 19 - 23. Tankdurchmesser 1,60 m. o.W.= ohne Wasserkühlung der Tankwand.
- Bild 7.-27: Zeitlicher Temperaturverlauf auf der Tankachse. Versuch Nr. 24. Tankdurchmesser 1,60 m. o.W.= ohne Wasserkühlung der Tankwand.
- Bild 7.-28 bis 7.-30: Zeitlicher Temperaturverlauf auf der Tankachse. Versuch Nr. 25 - 27. Tankdurchmesser 2,00 m. m.W.= mit Wasserkühlung der Tankwand.
- Bild 7.-31 bis 7.-33: Zeitlicher Temperaturverlauf in der Tankwand. Versuch Nr. 28 - 30. Tankdurchmesser 2,00 m. o.W.= ohne Wasserkühlung der Tankwand.

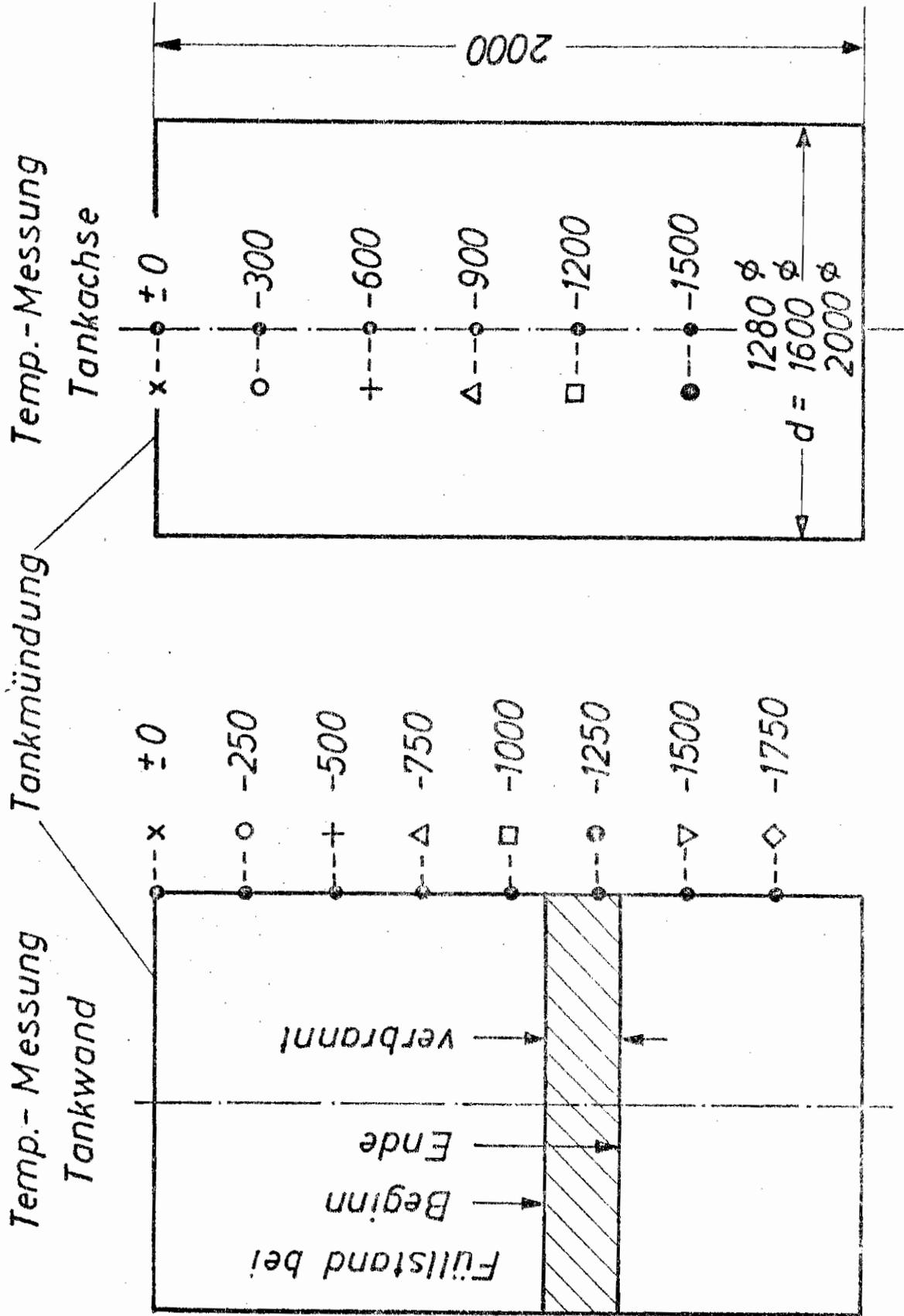
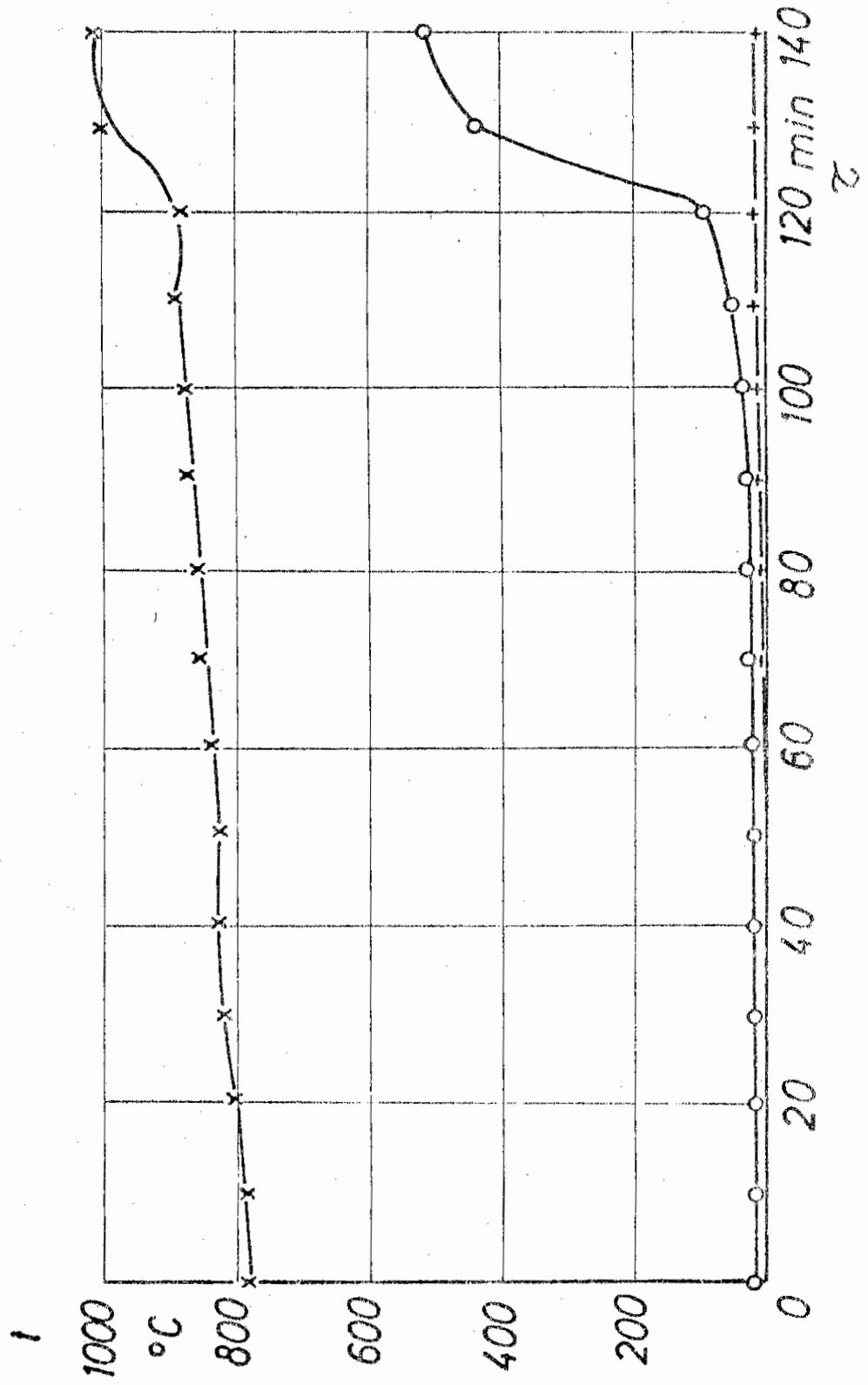
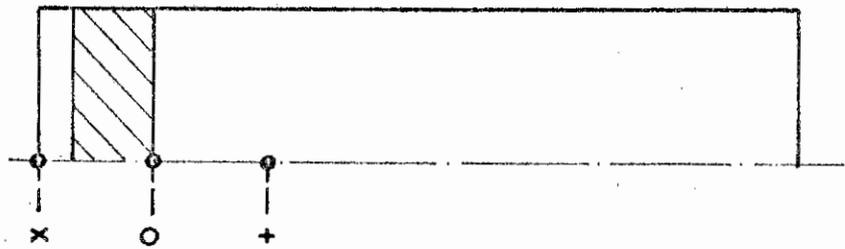


Bild 7.3.

Versuch Nr. 1

$d = 1,28 \text{ m.W.}$



Versuch Nr. 2

$d = 1,28 \text{ m.W.}$

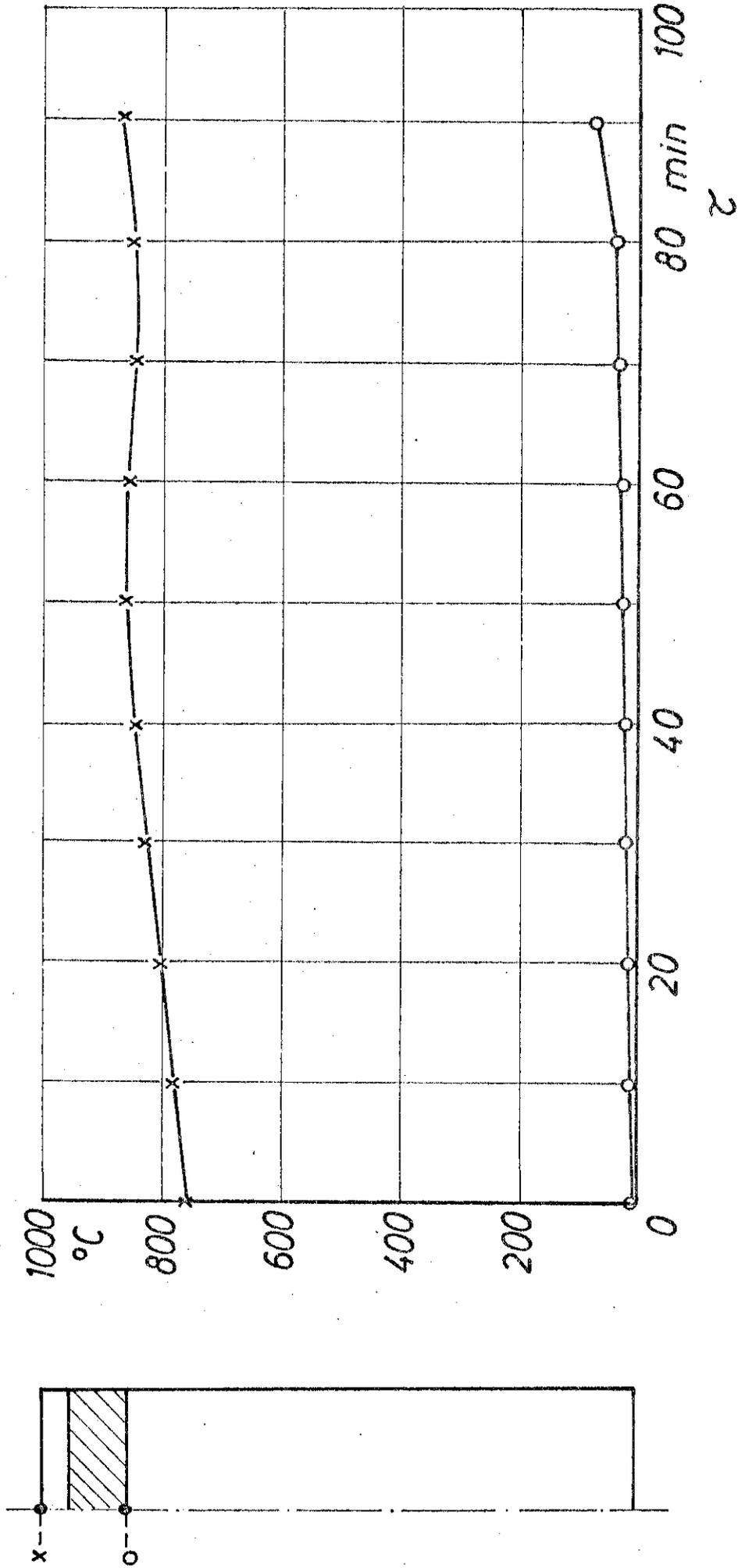


Bild 7.-5.

Versuch Nr.3

$d = 1,28 \text{ m.W.}$

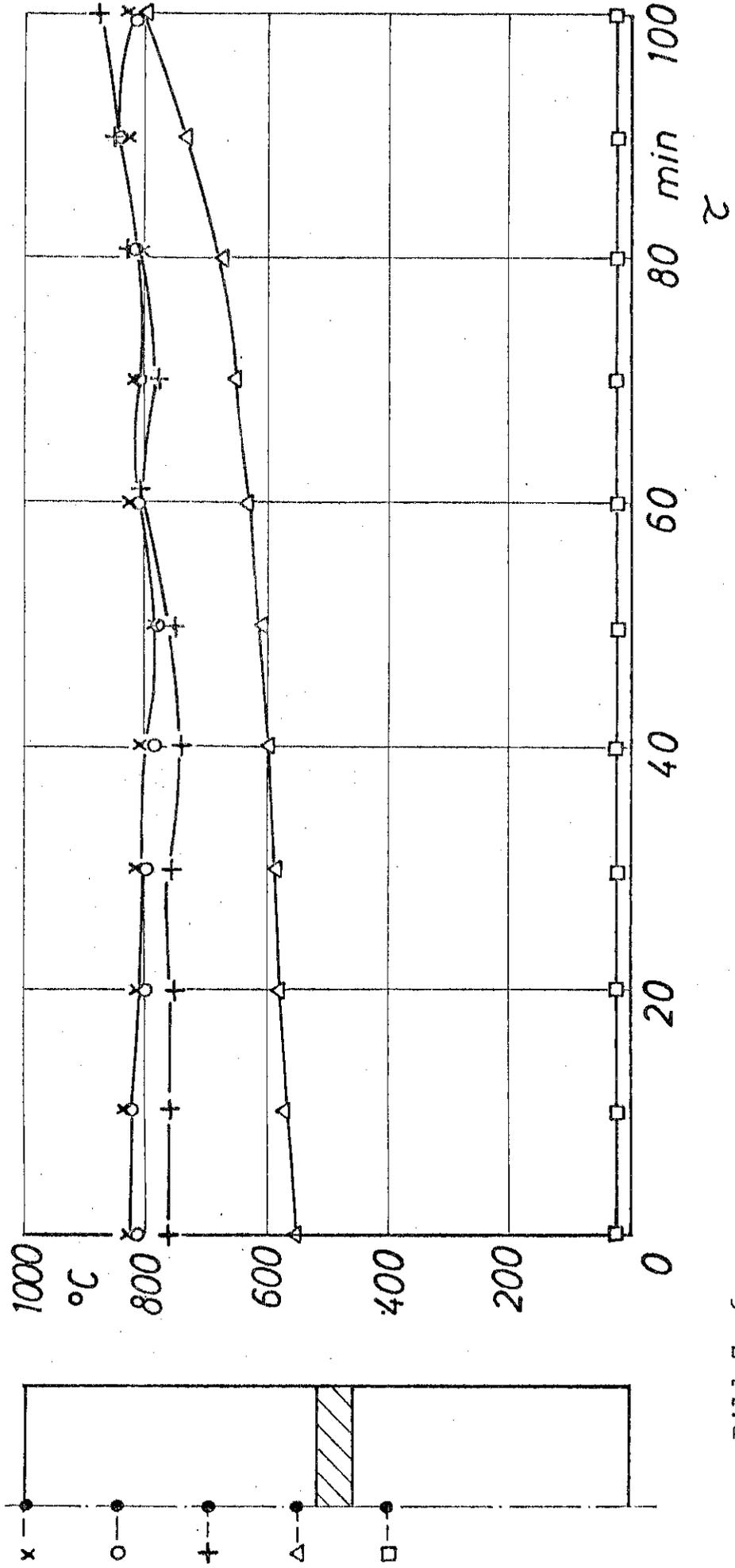


Bild 7.-6.

Versuch Nr. 4

$d = 1,28 \text{ m.W.}$

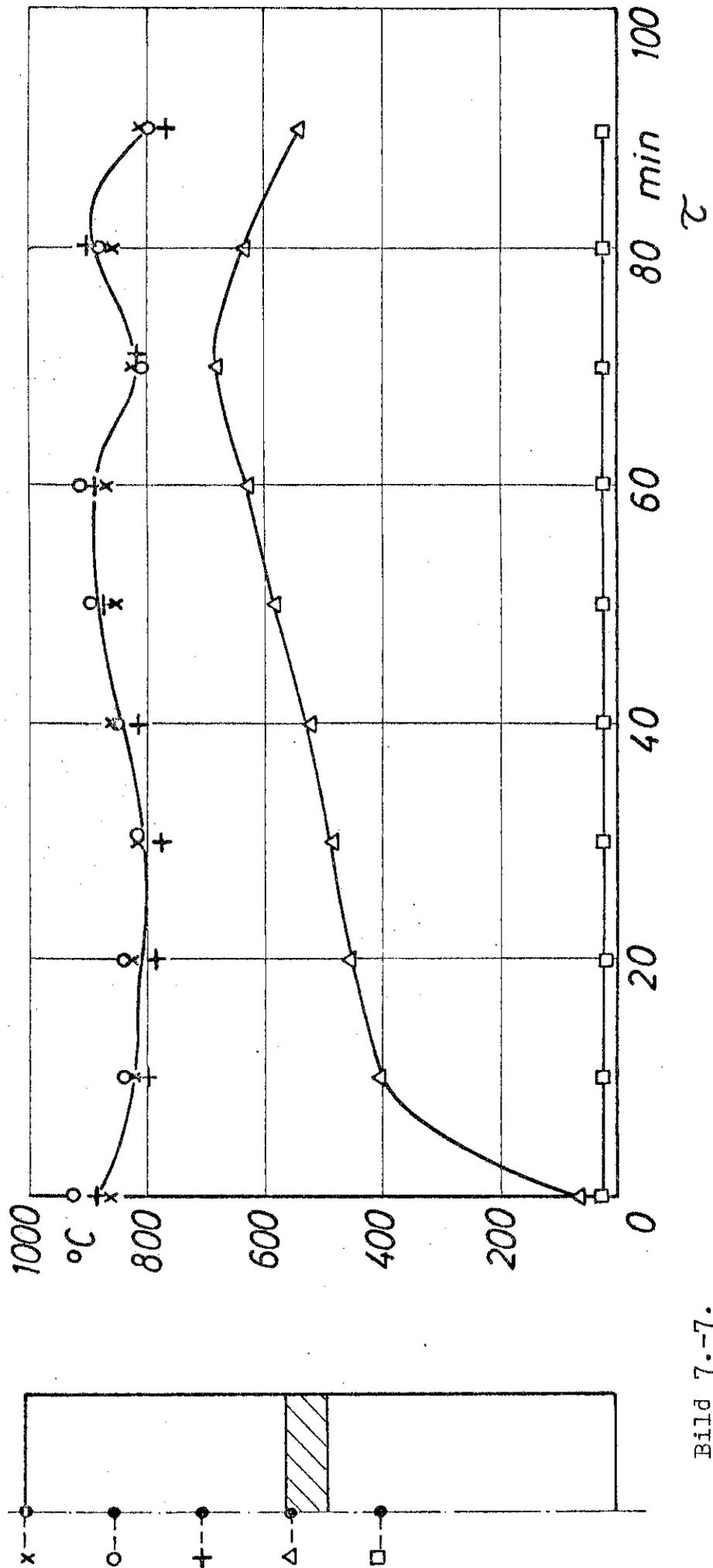


Bild 7.-7.

Versuch Nr. 5

$d = 1,28 \text{ m.W.}$

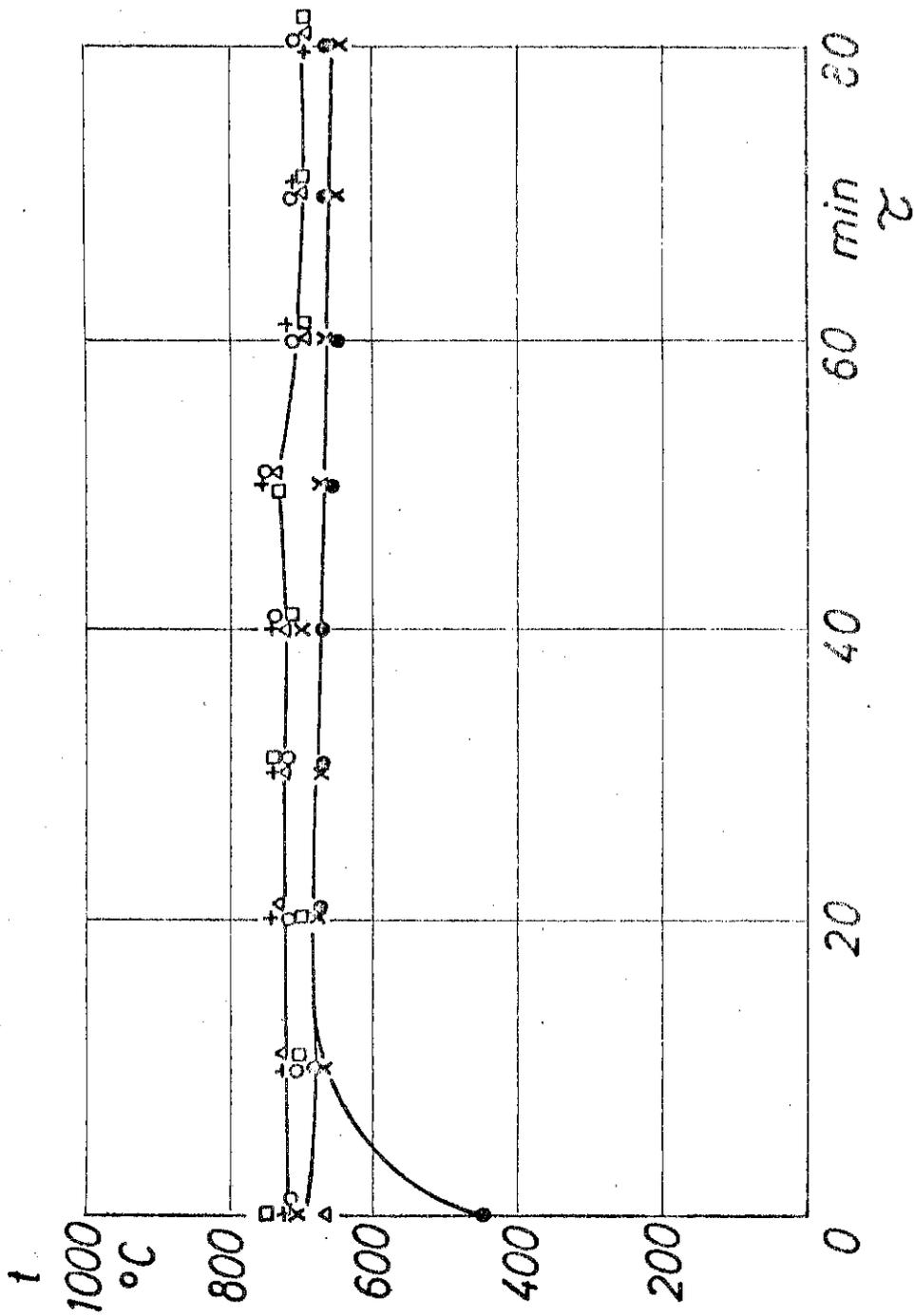
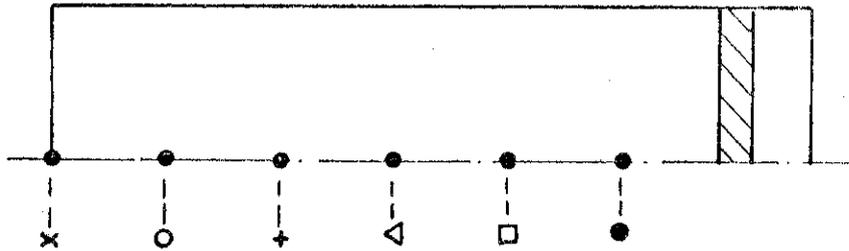


Bild 7.-8.

Versuch Nr. 6

$d = 1,28 \text{ m.W.}$

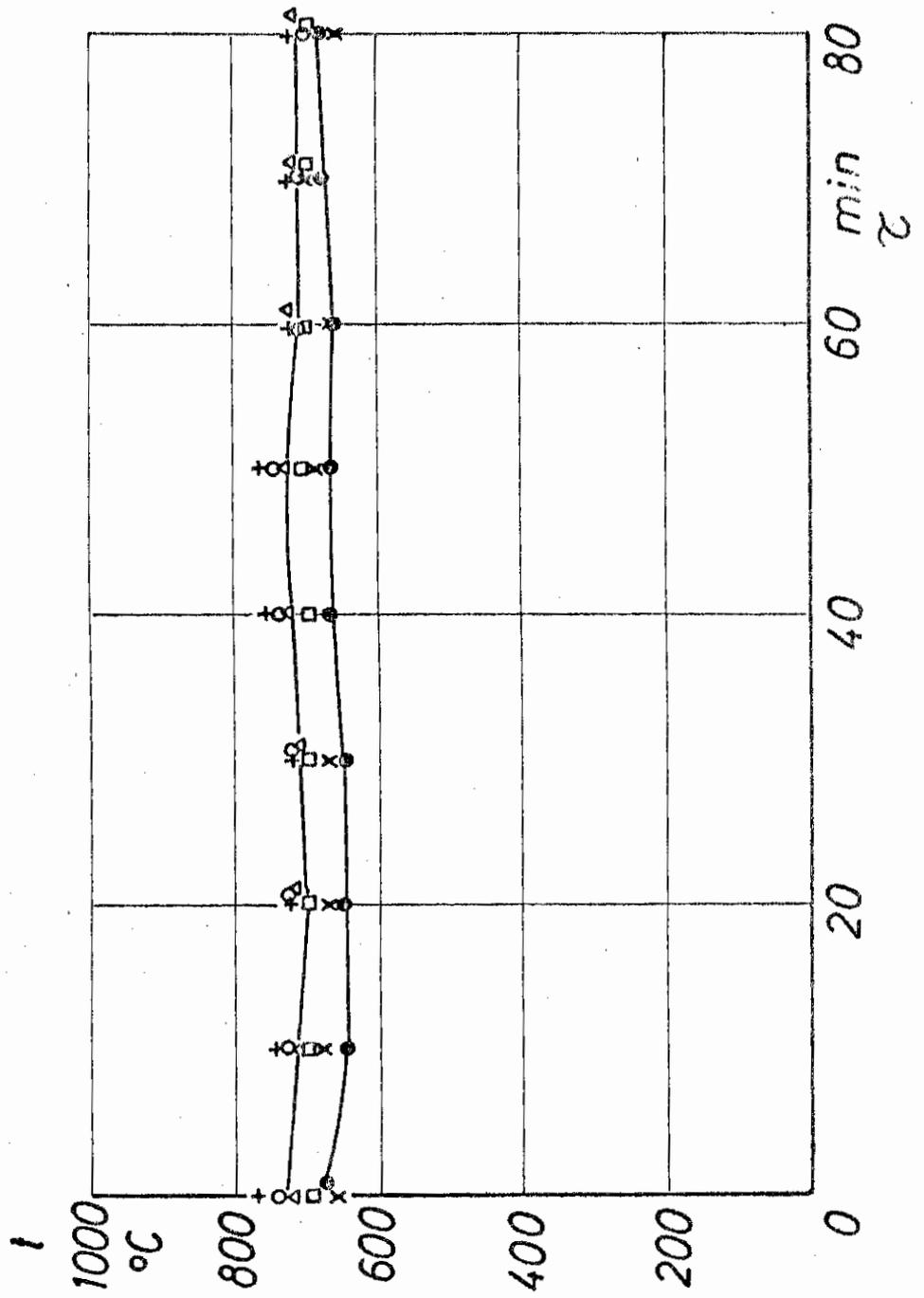
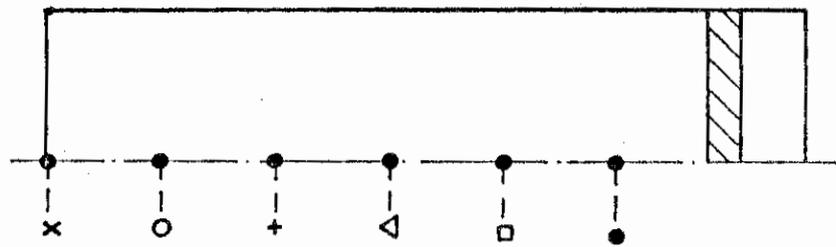


Bild 7.-9.

Versuch Nr.7

d = 1,28 o.W.

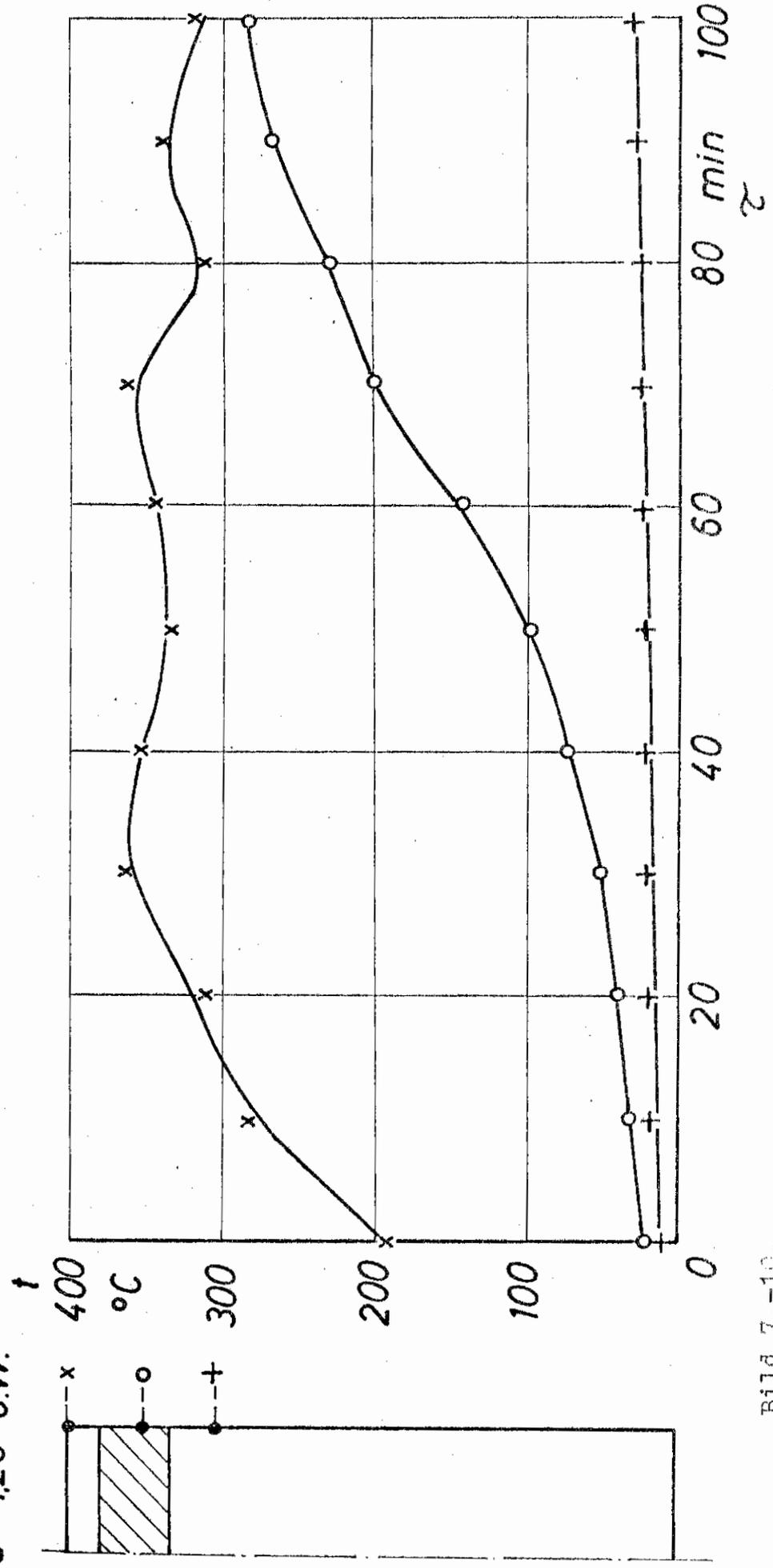


Bild 7.-10.

Versuch Nr. 8

$d = 1,28 \text{ oW.}$

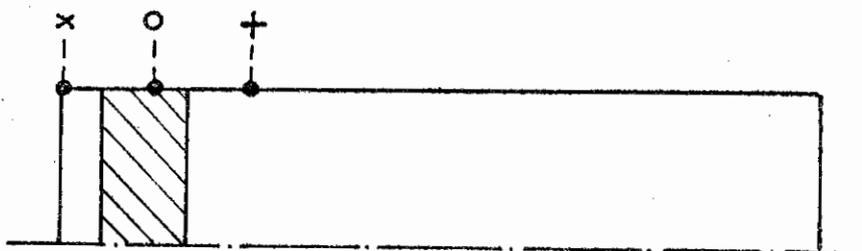
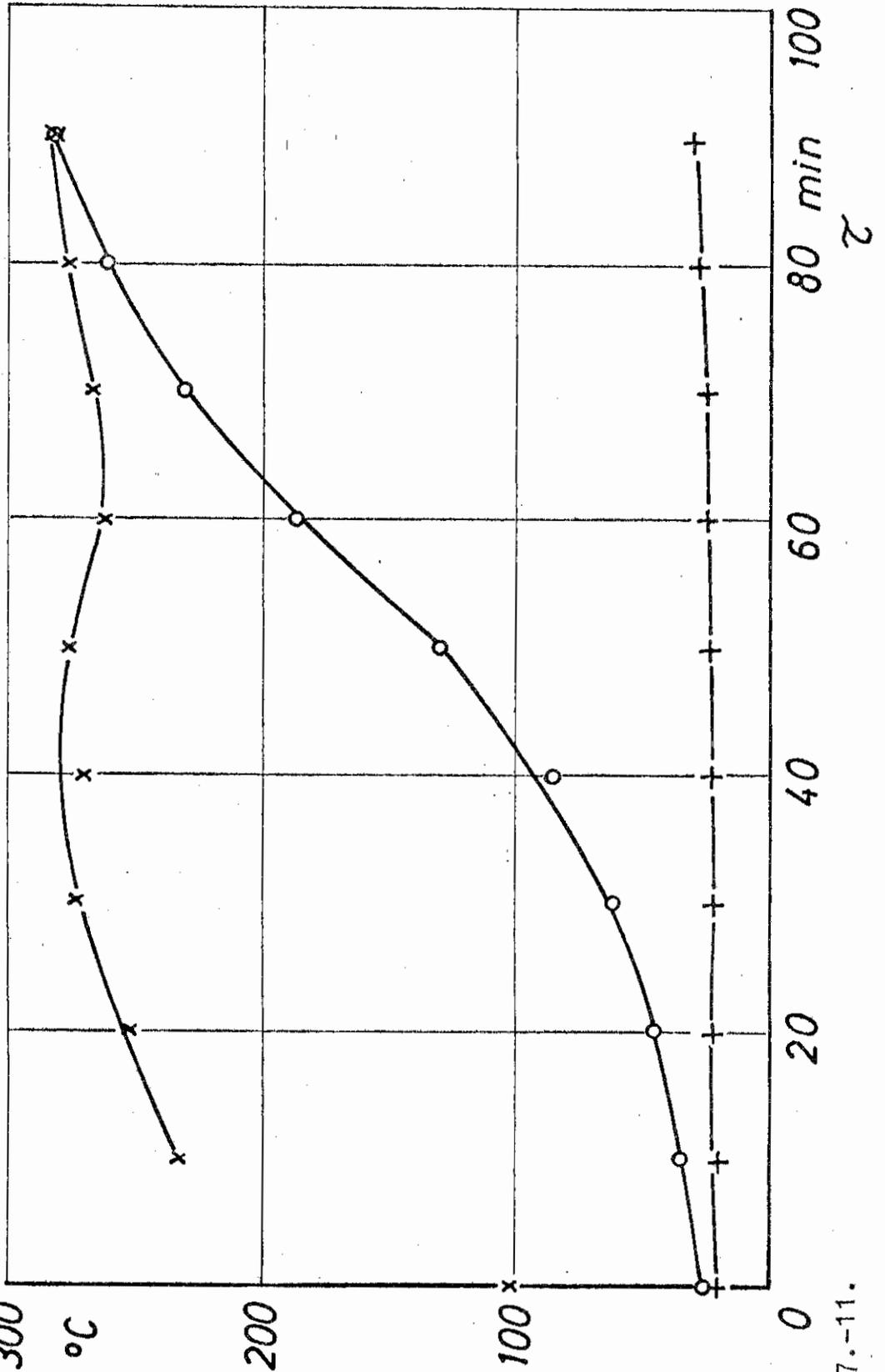


Bild 7.-11.

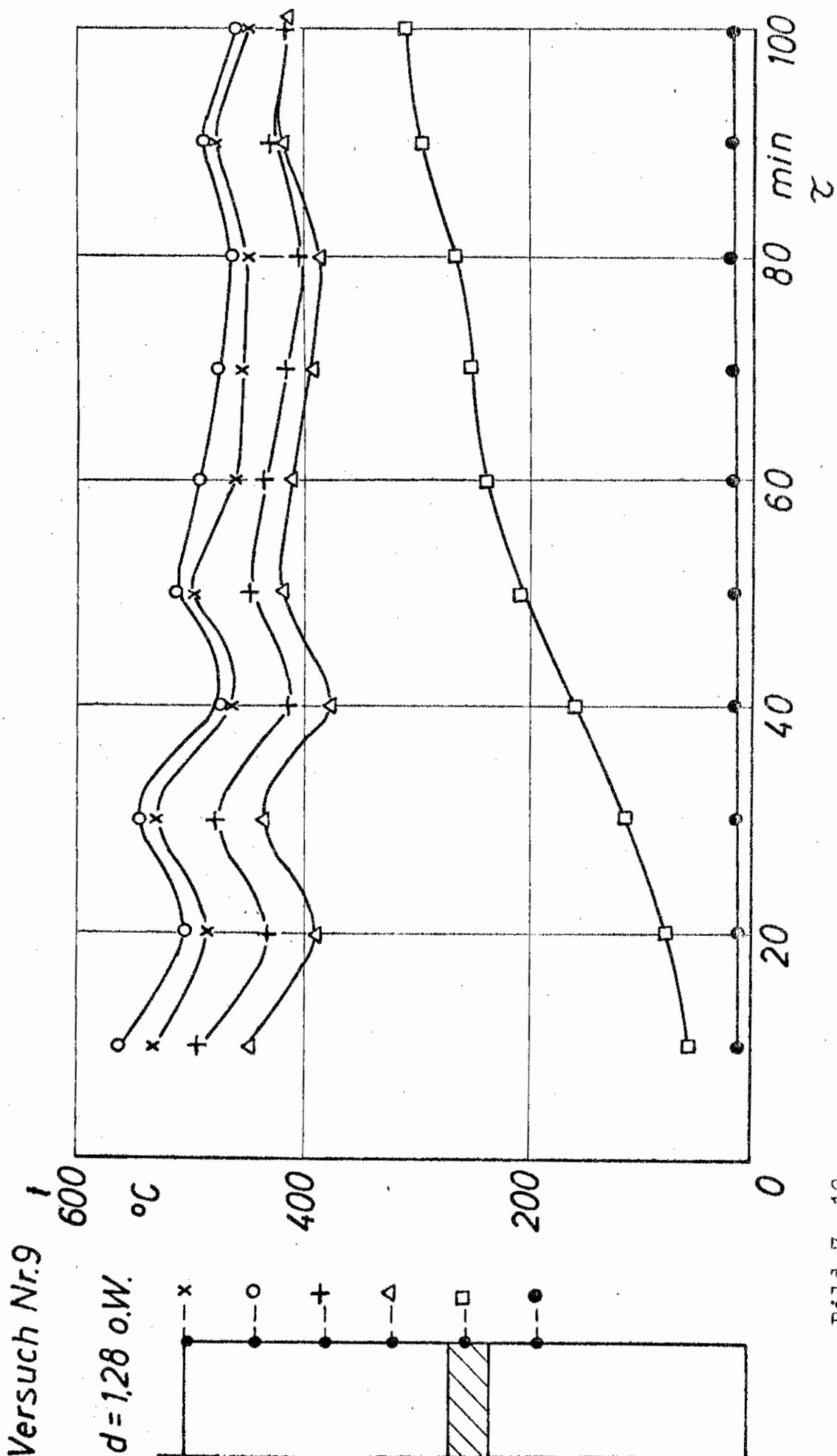


Bild 7.-12.

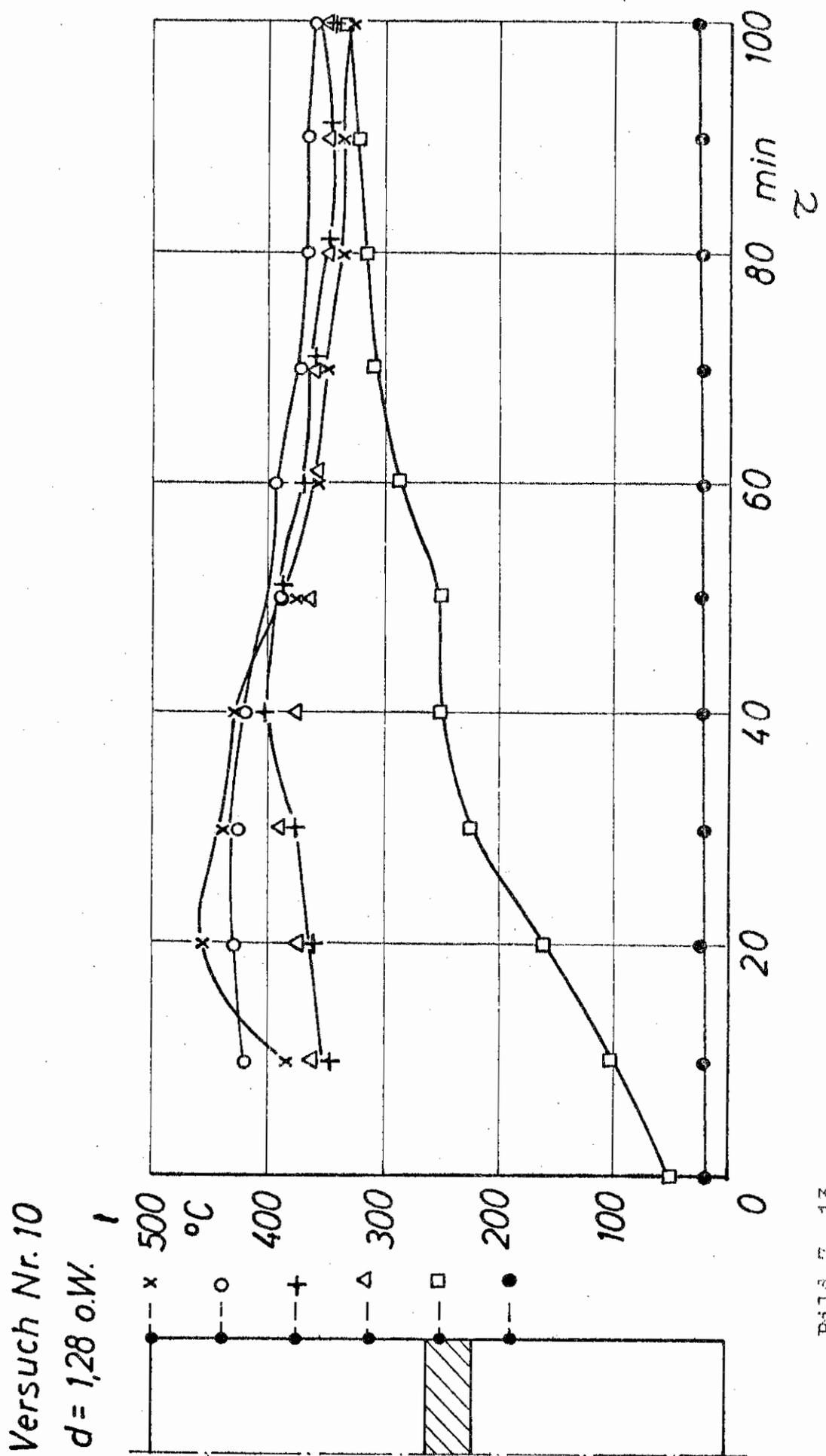


Bild 7.-13.

Versuch Nr. 11

$d = 128$  o.W.

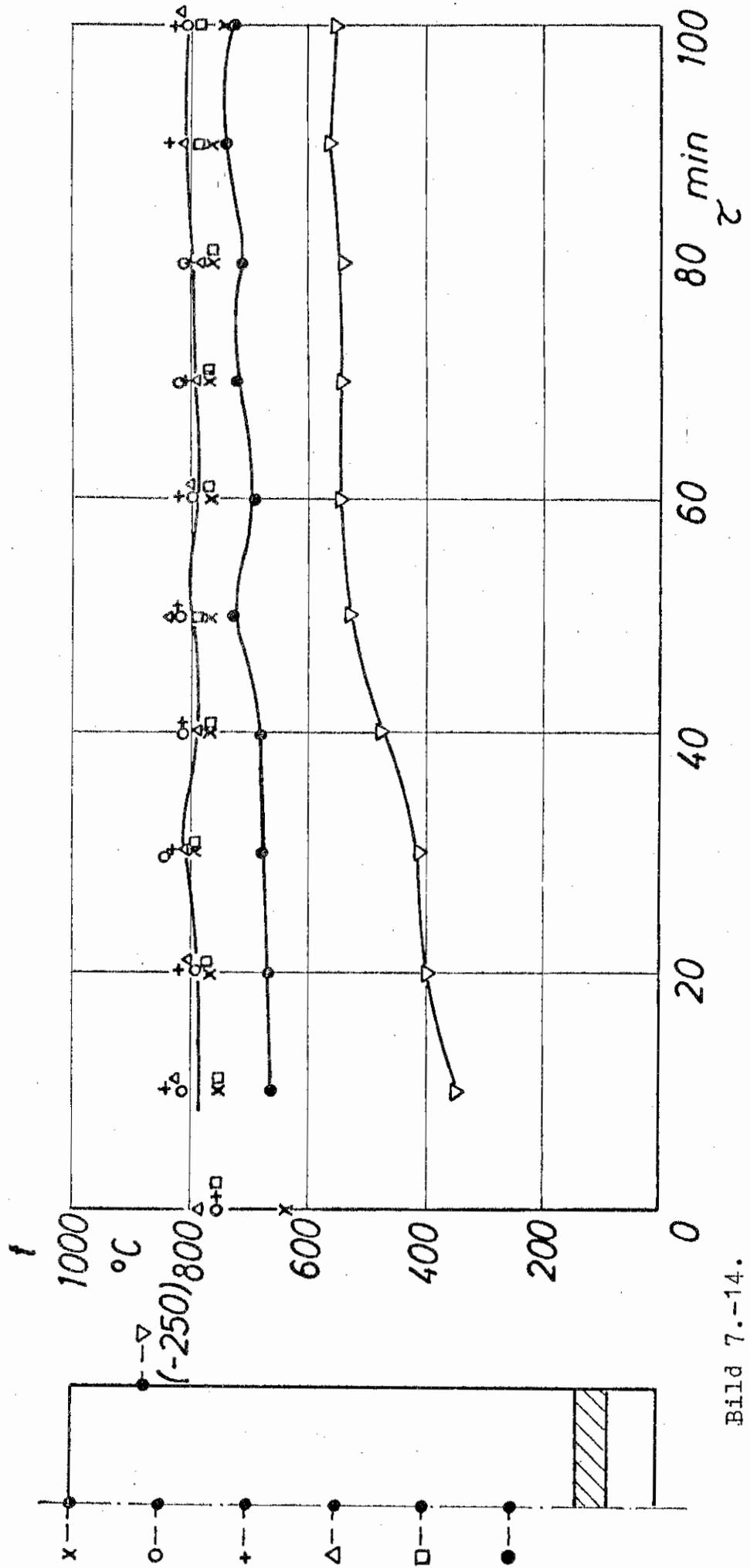


Bild 7.-14.

Versuch Nr.12

d = 128 o.W.

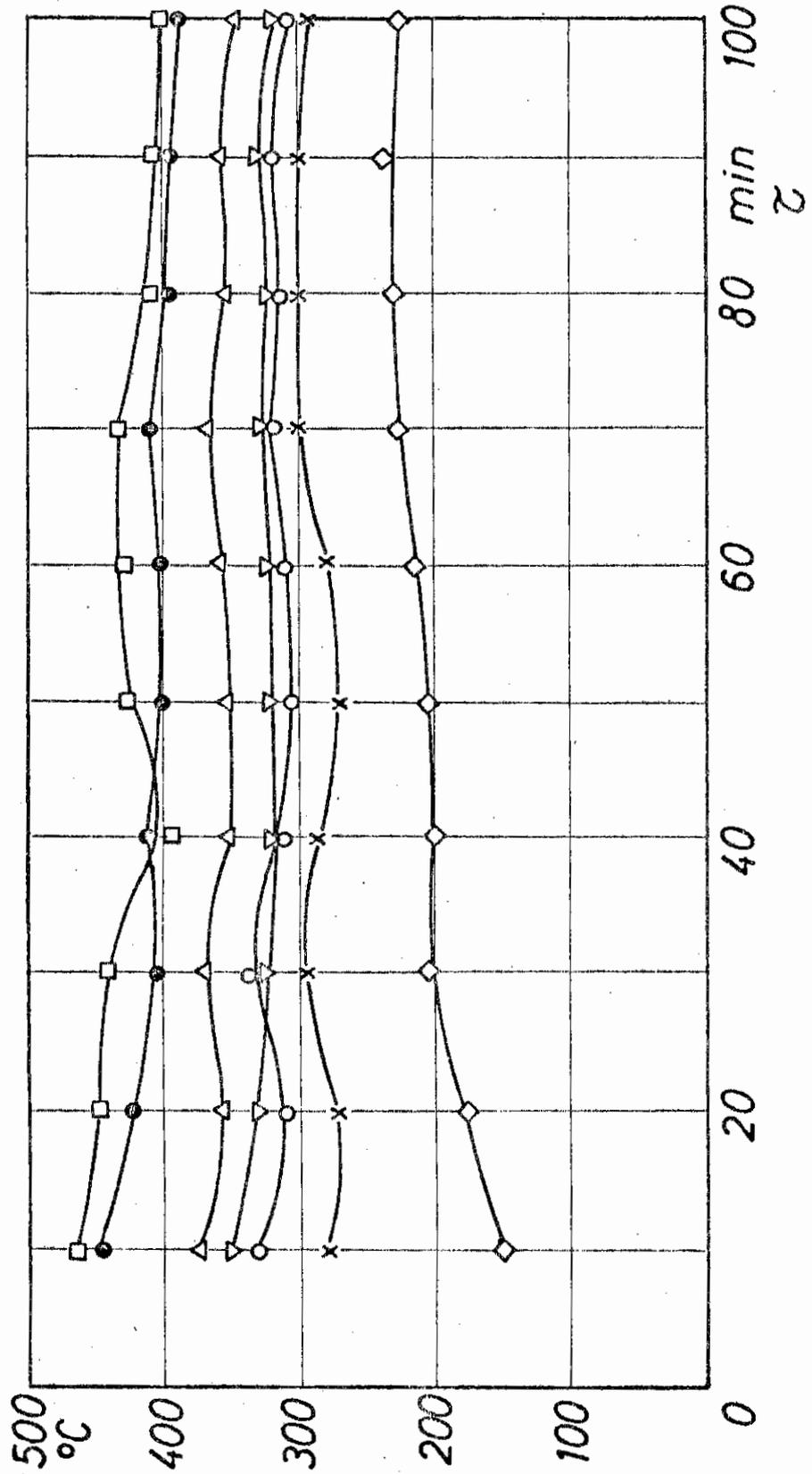


Bild 7.-15.

Versuch Nr. 13

$d = 1,60 \text{ m.W.}$

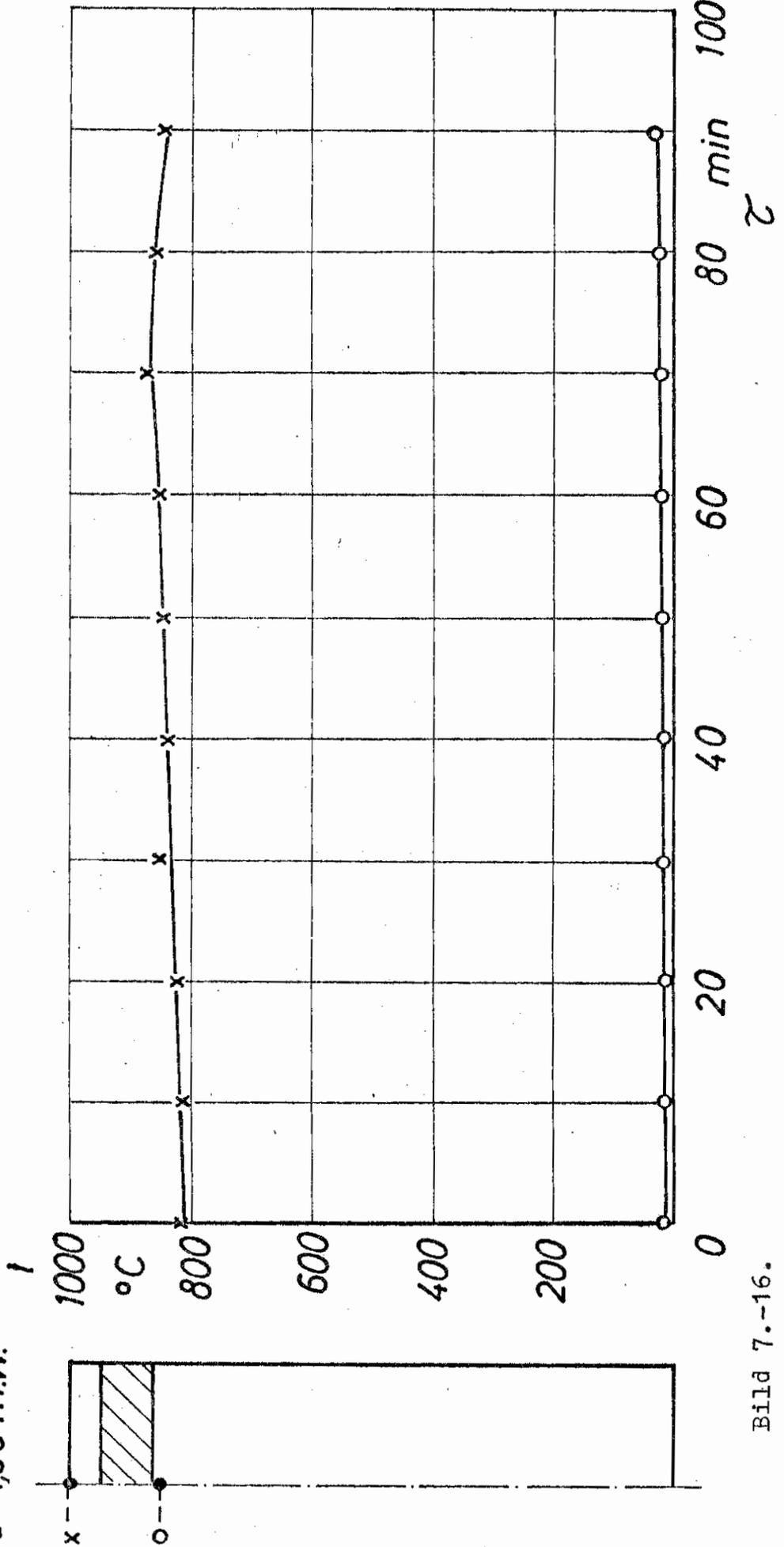


Bild 7.-16.

Versuch Nr. 14

$d = 160 \text{ m.W.}$

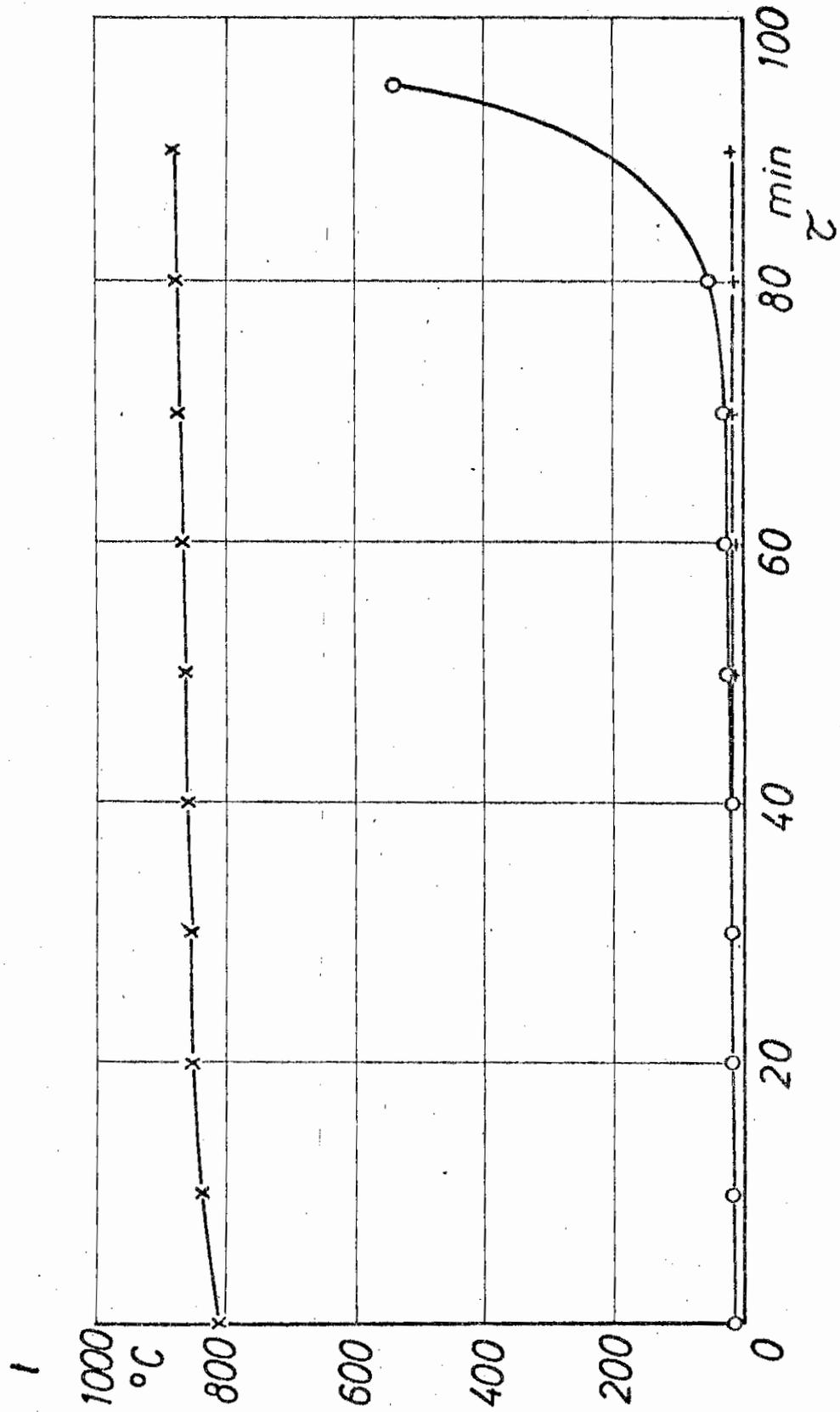
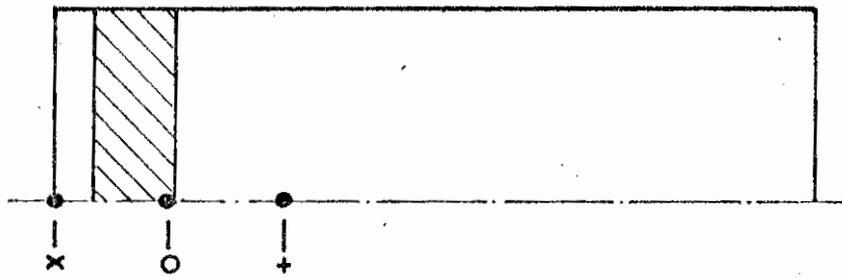
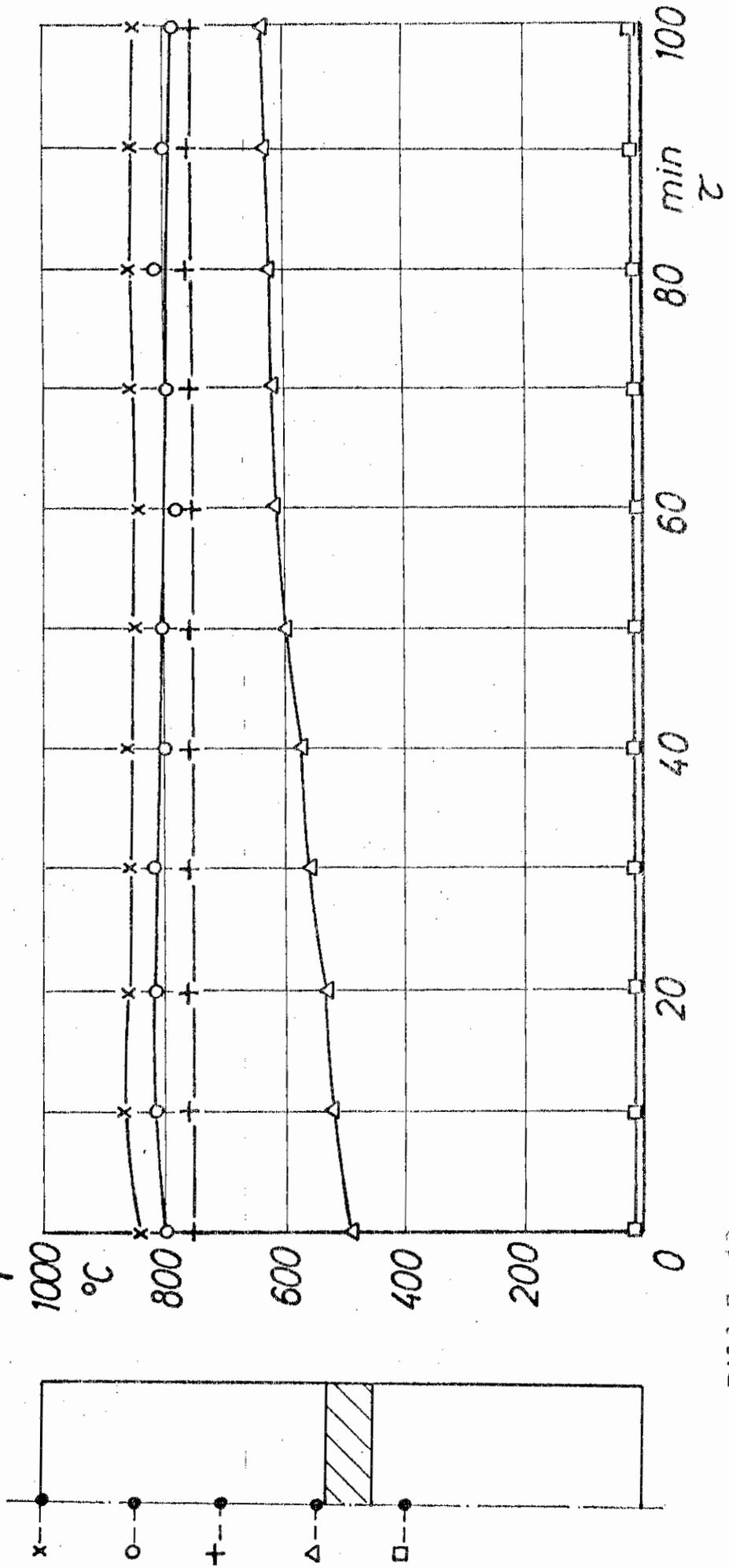


Bild 7.-17.

Versuch Nr.15

$d = 1,60 \text{ m.W.}$



BILG 7.-18.

Versuch Nr. 16  
d = 1,60 m.W.

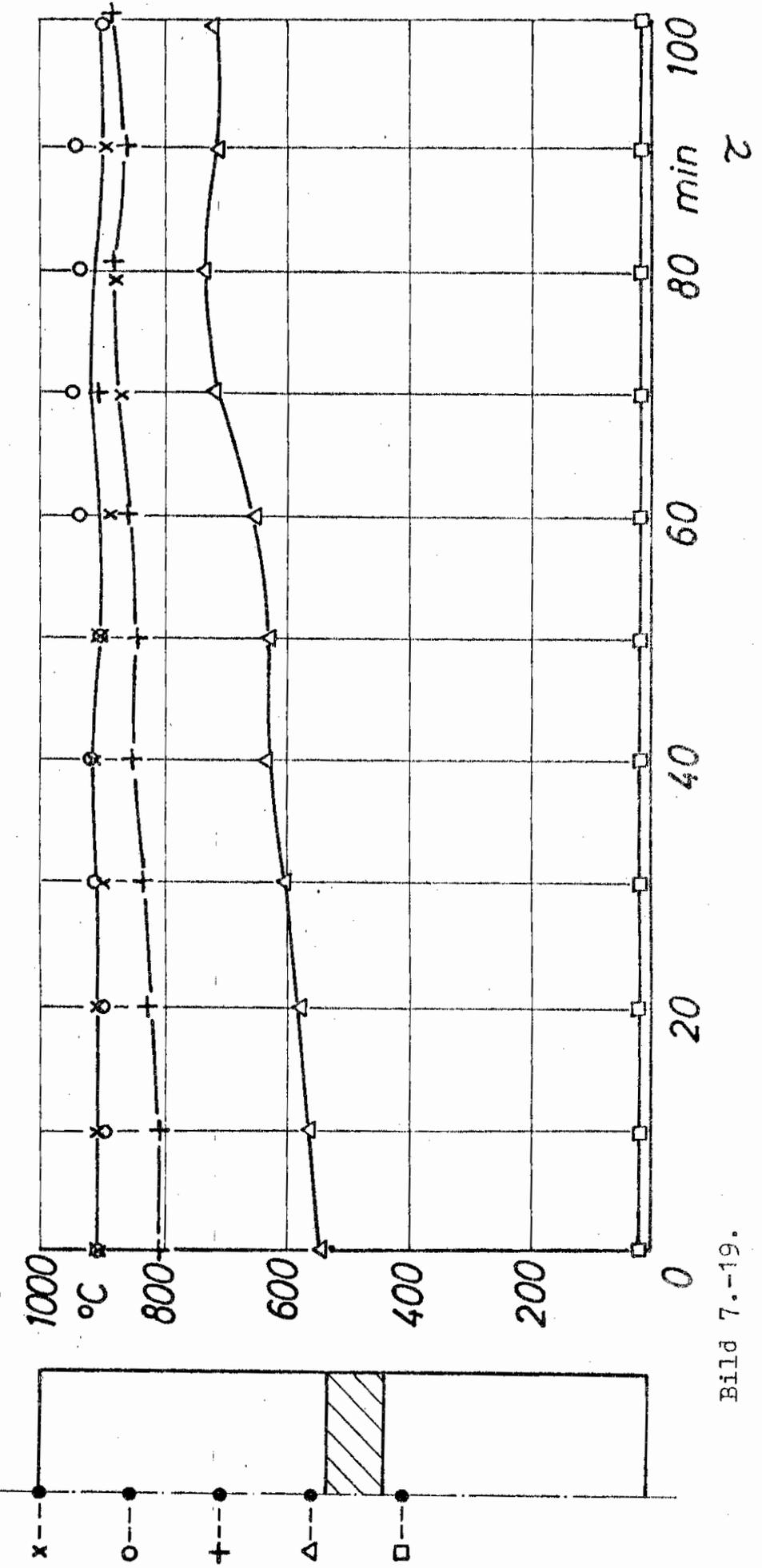


Bild 7.-19.

Versuch Nr. 17

$d = 1,60 \text{ mW}$

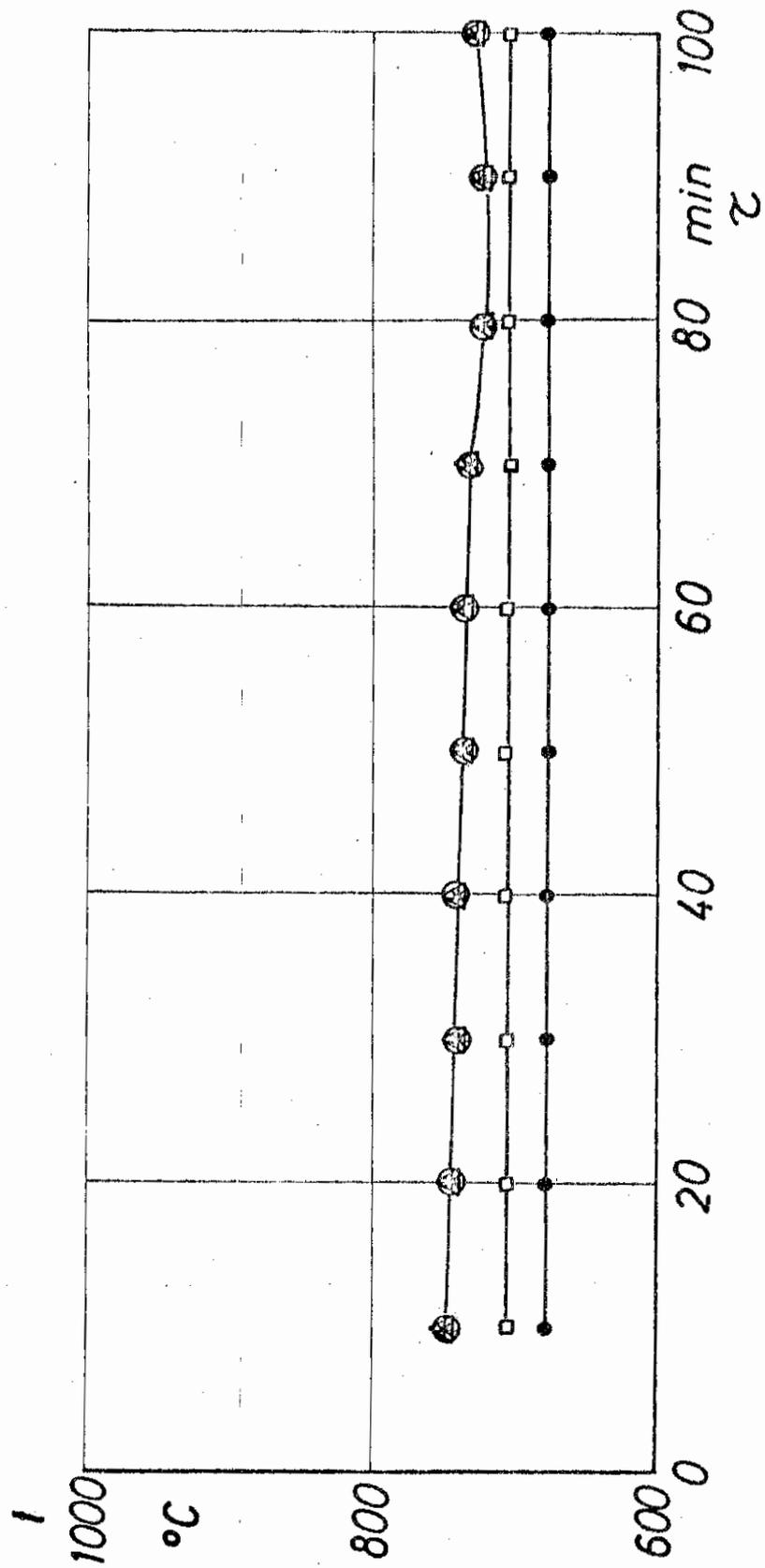
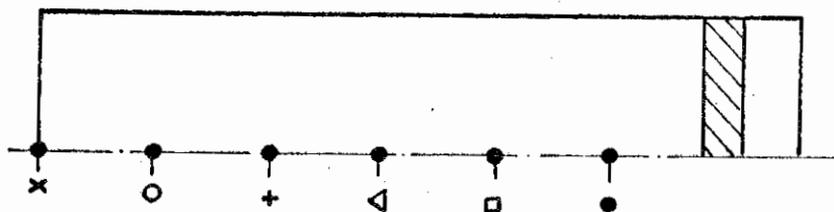


Bild 7.-20.

Versuch Nr. 18

$d = 160 \text{ m.W.}$

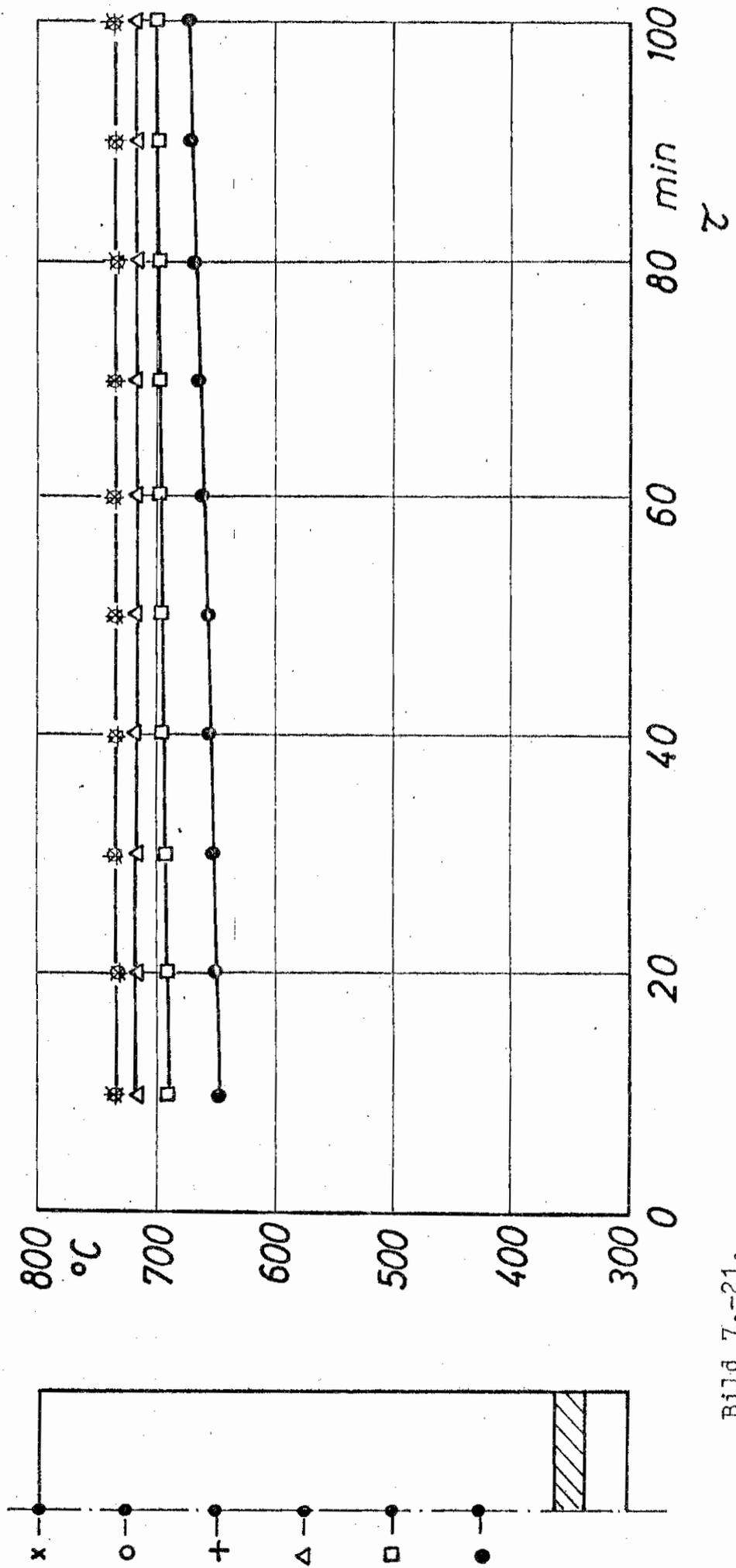
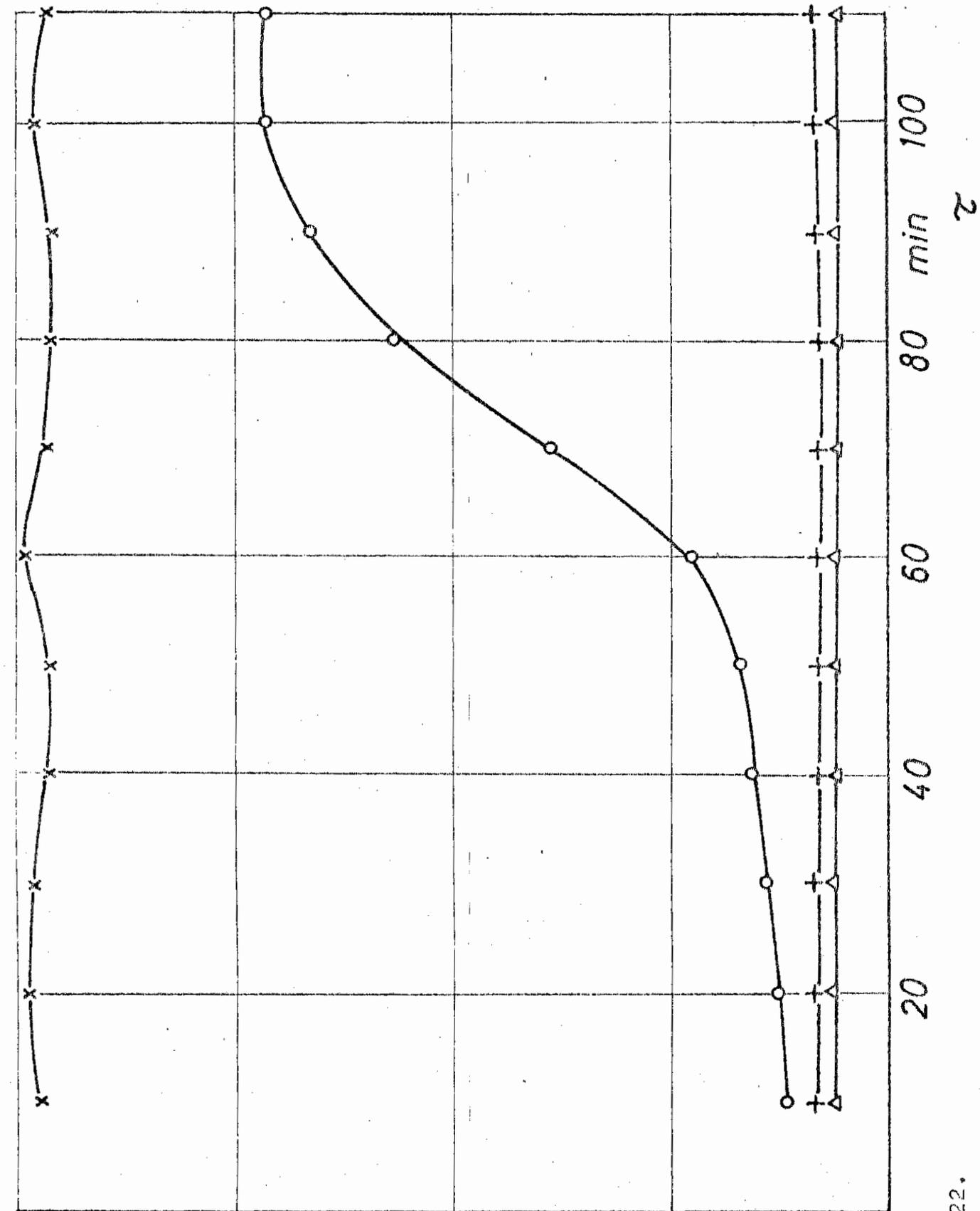


Bild 7.-21.



Versuch Nr. 19600  
d = 160 o.W.

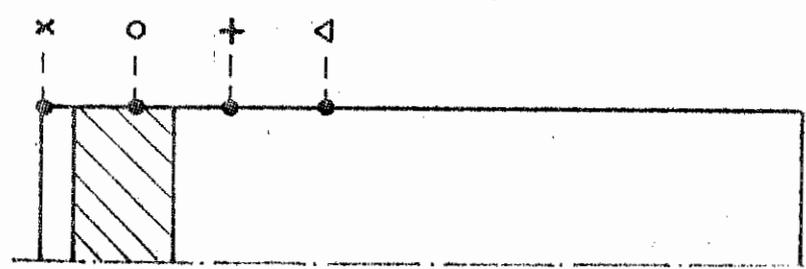


Bild 7.-22.

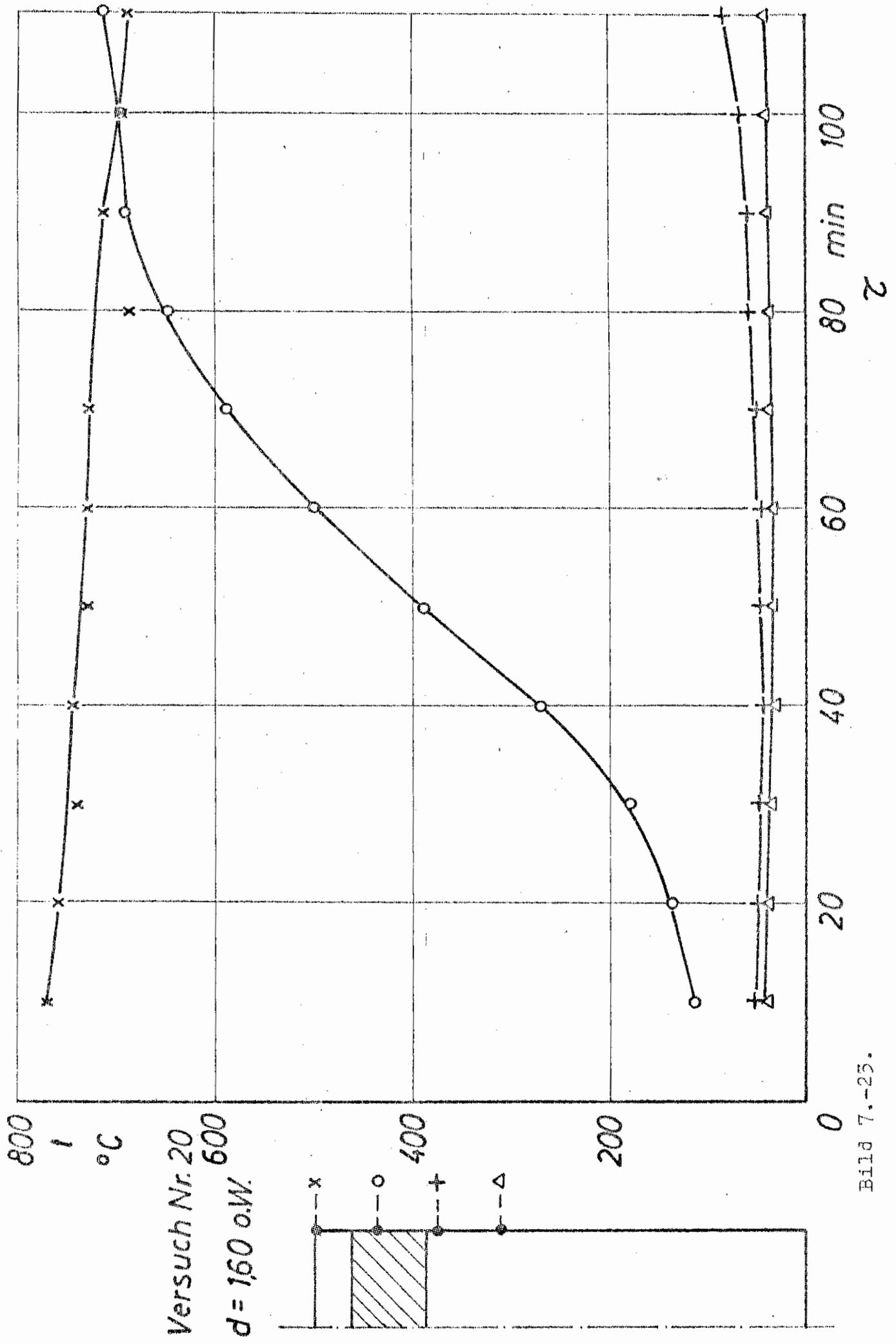
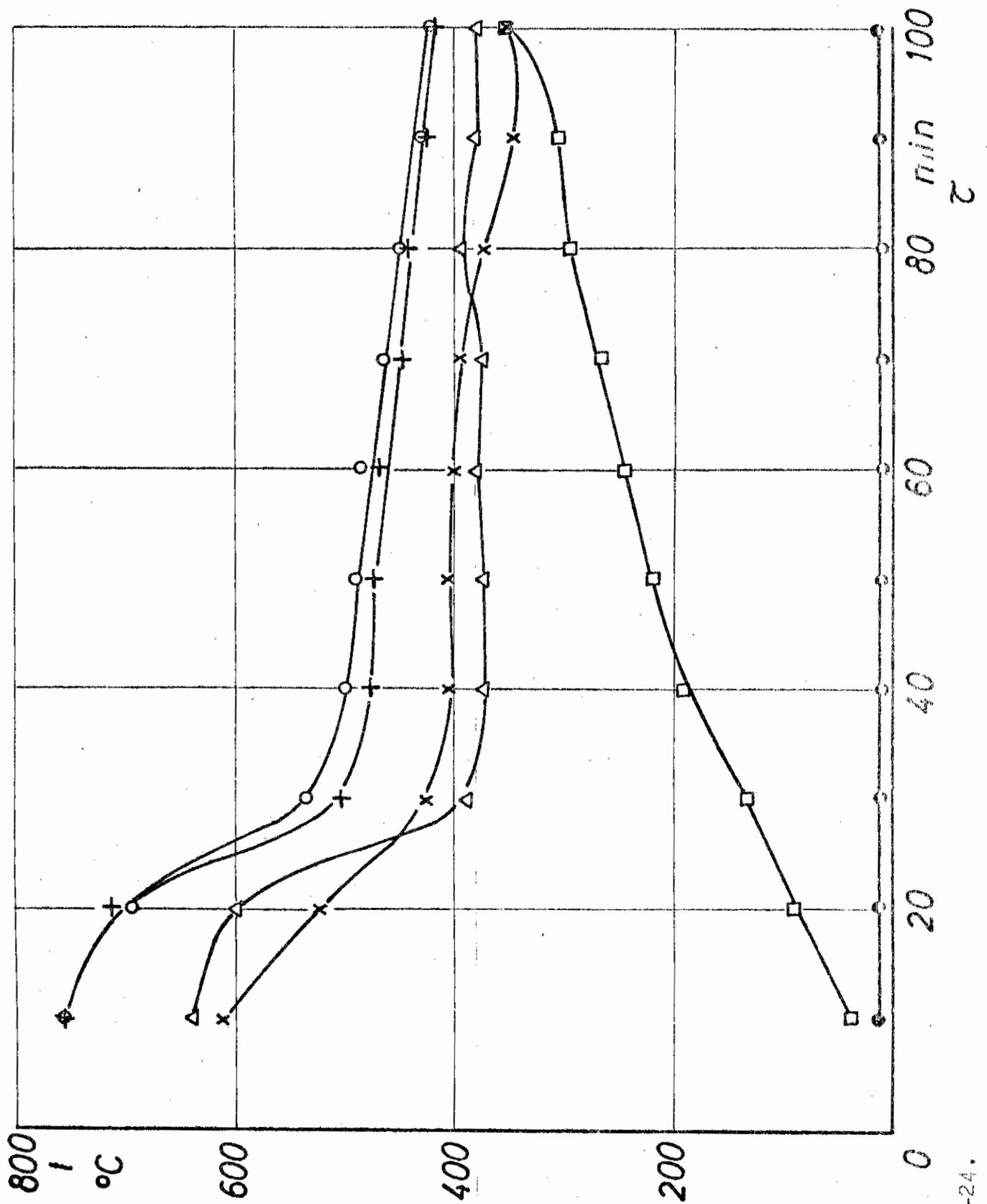


Bild 7.-25.



Versuch Nr. 21  
d = 1,60 o.W.

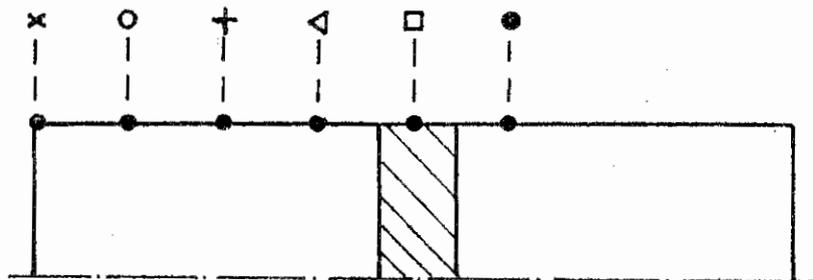


Bild 7.-24.

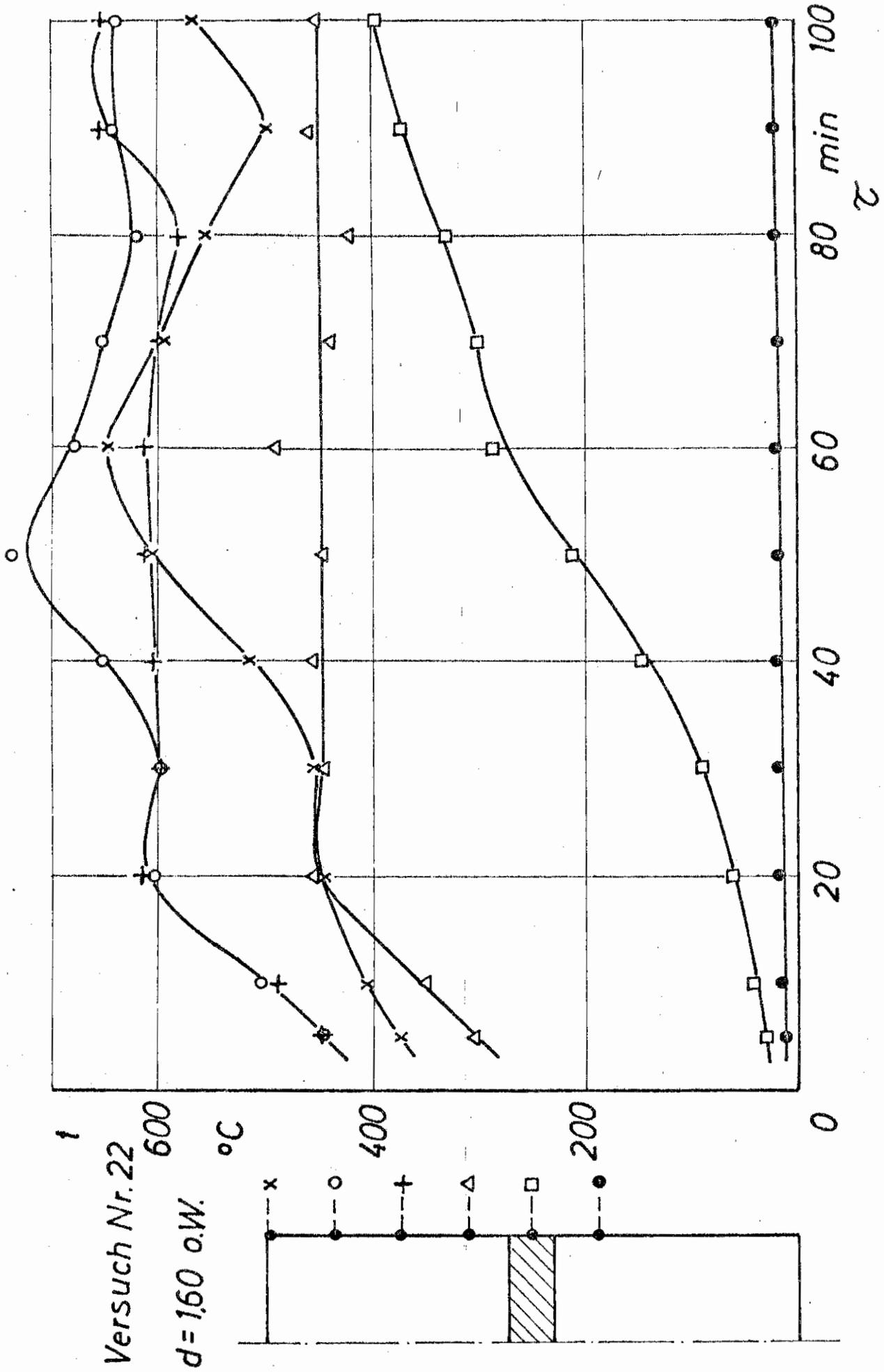


Bild 7.-25.

Versuch Nr. 23

$d = 1,60 \text{ o.W.}$

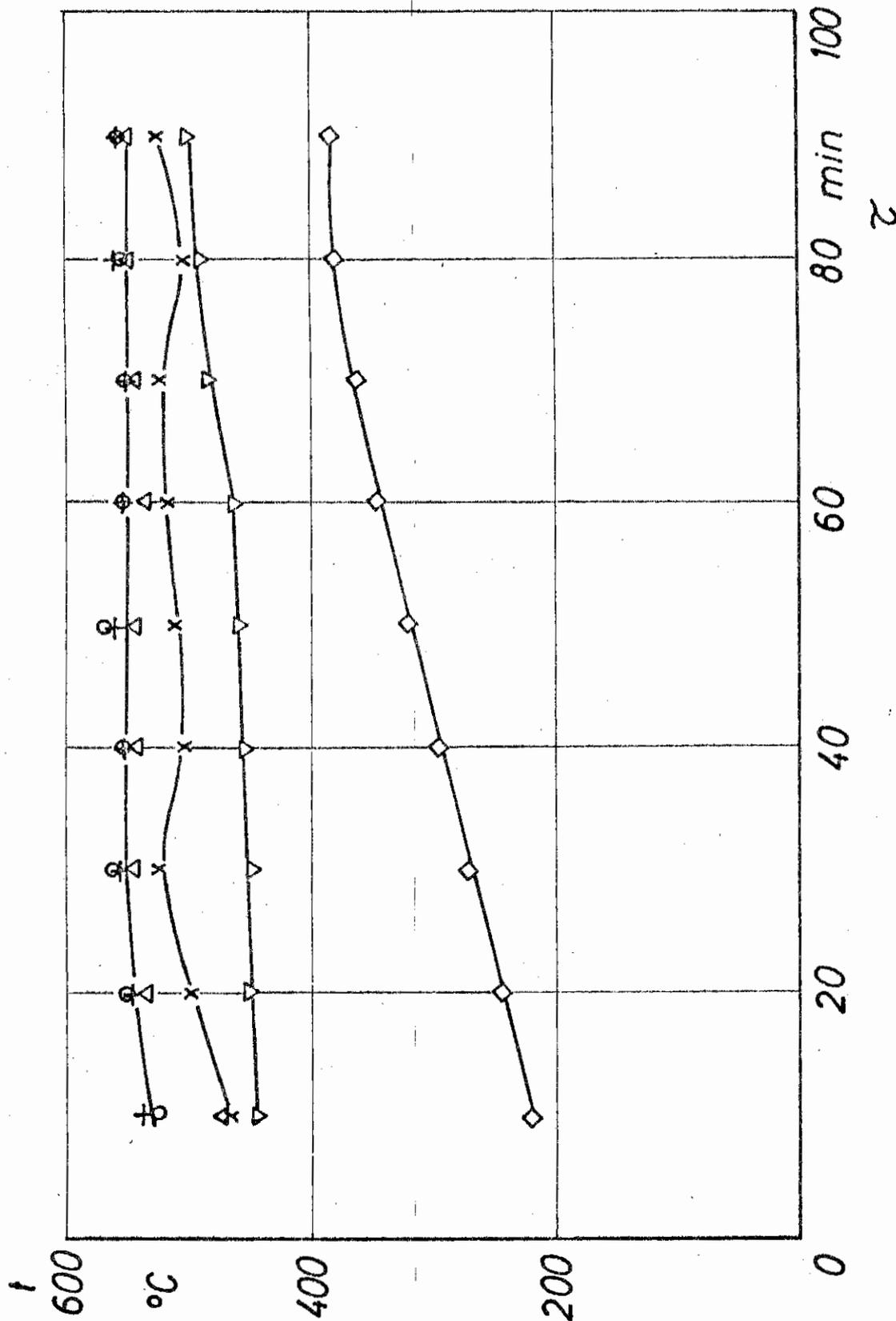


Bild 7.-26.

Versuch Nr. 24

$d = 1,60 \text{ o.W.}$

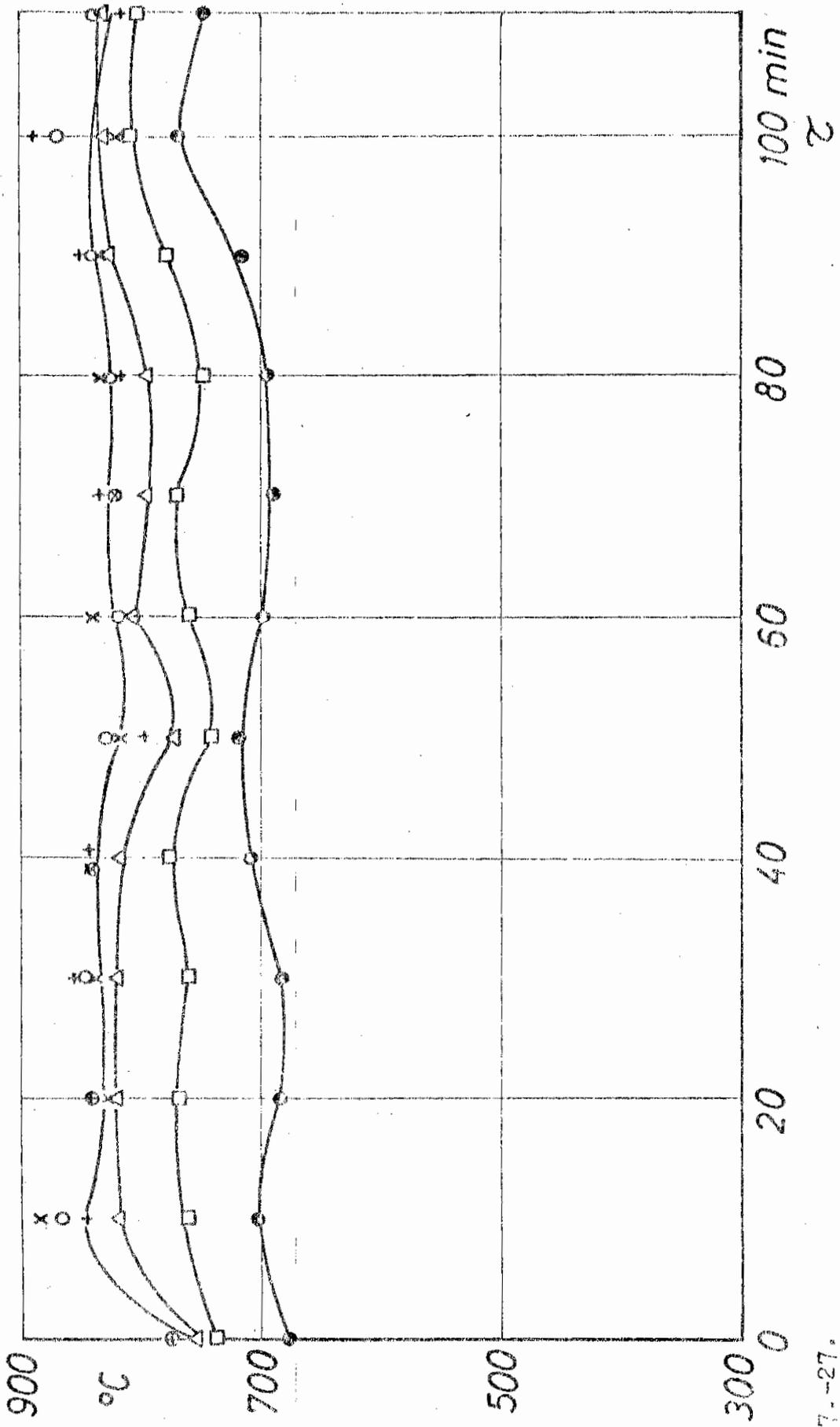


Bild 7.-27.

Versuch Nr. 25

$d = 2,00 \text{ m.W.}$

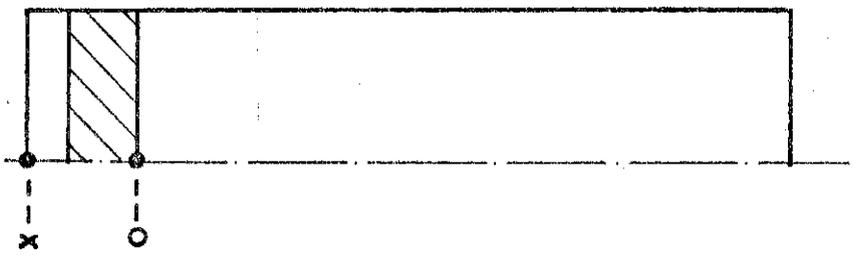
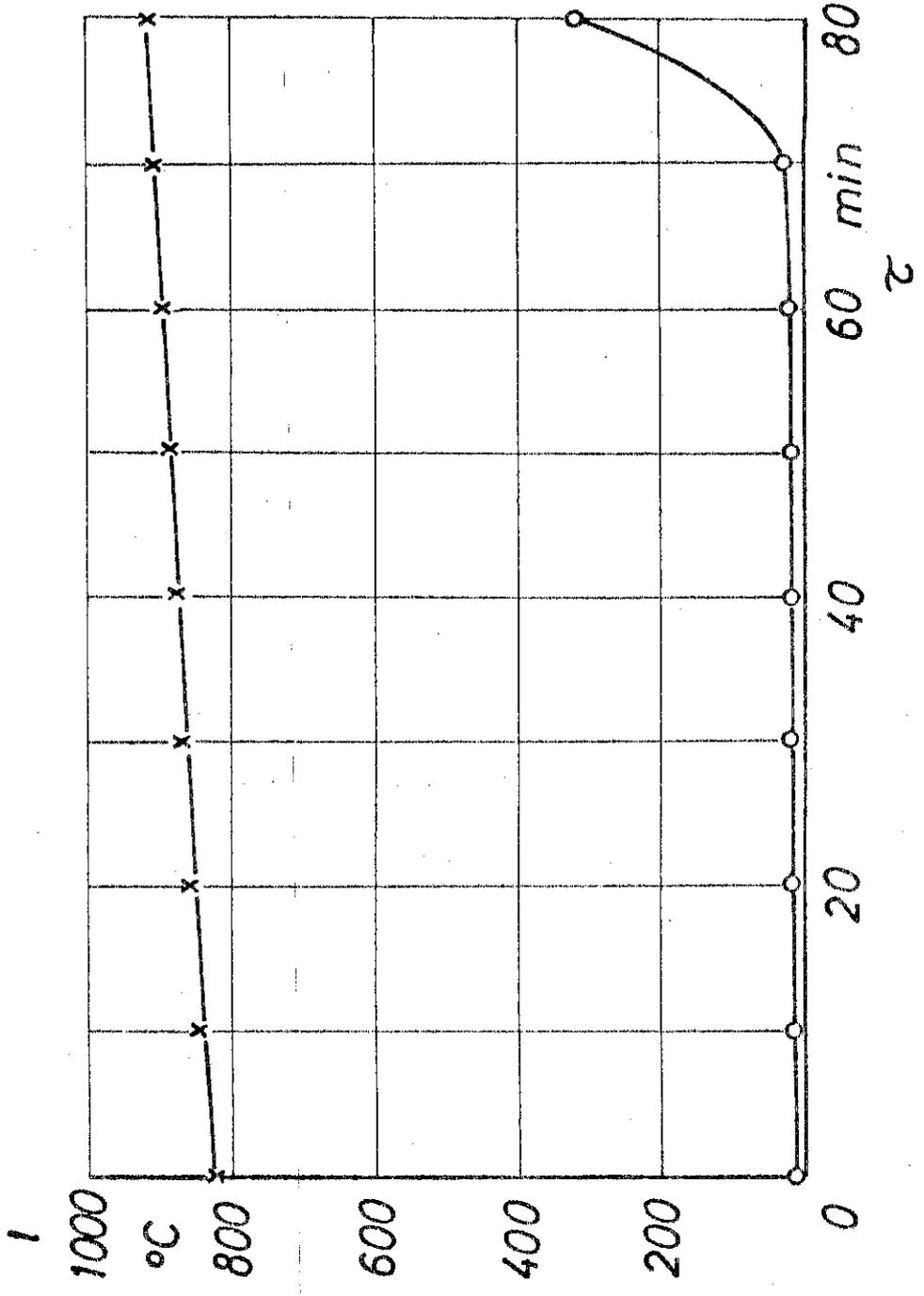


Bild 7.-28.

Versuch Nr. 26  
 $d = 200 \text{ m.W.}$

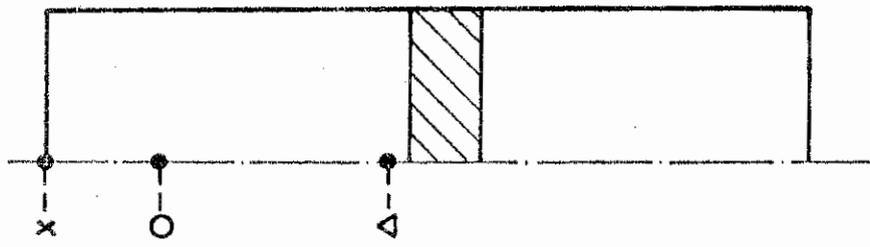
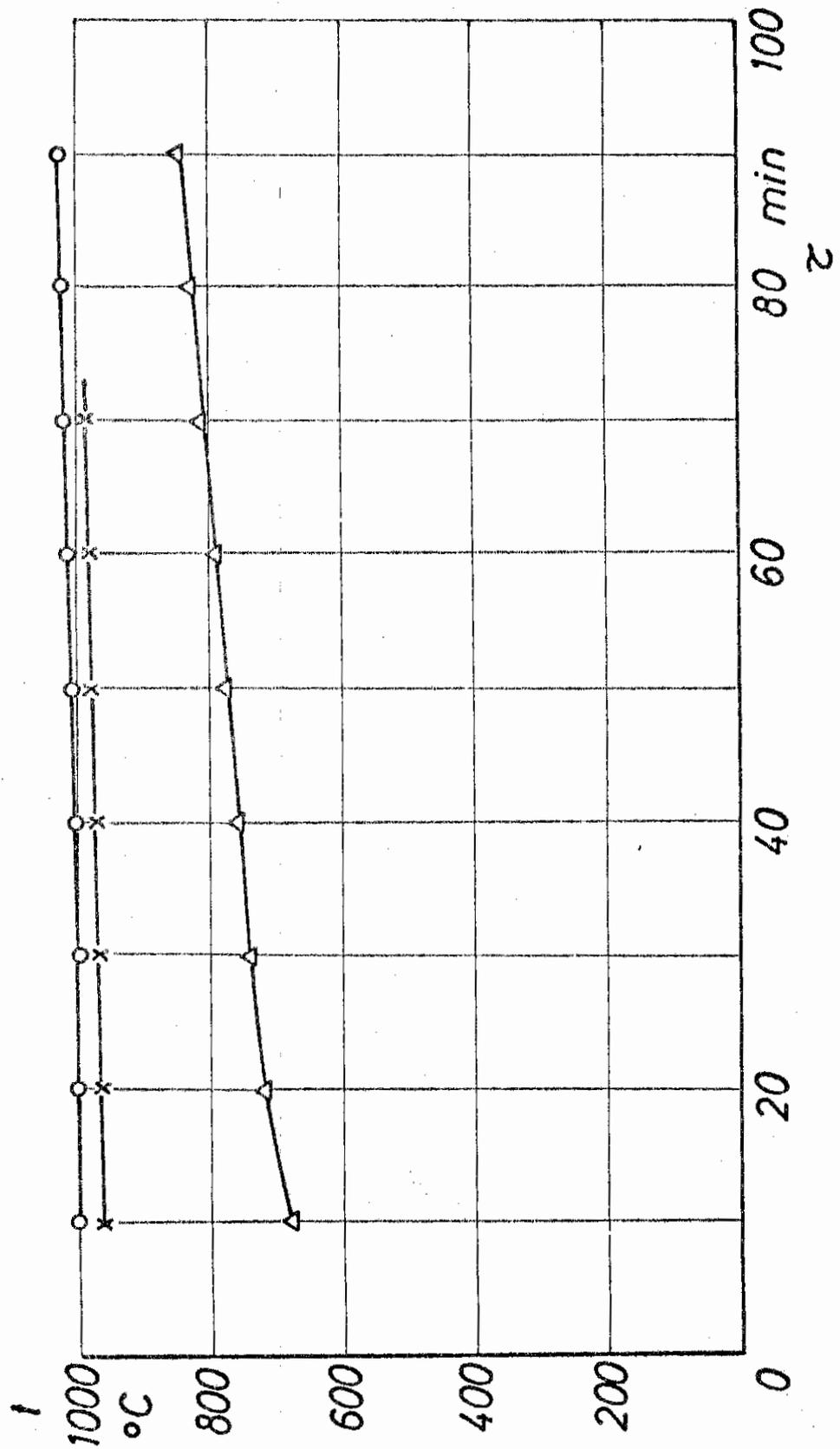


Bild 7.-29.

Versuch Nr. 27

$d = 200 \text{ m.W.}$

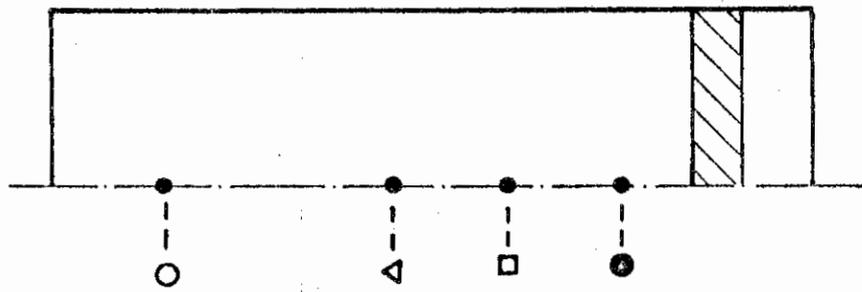
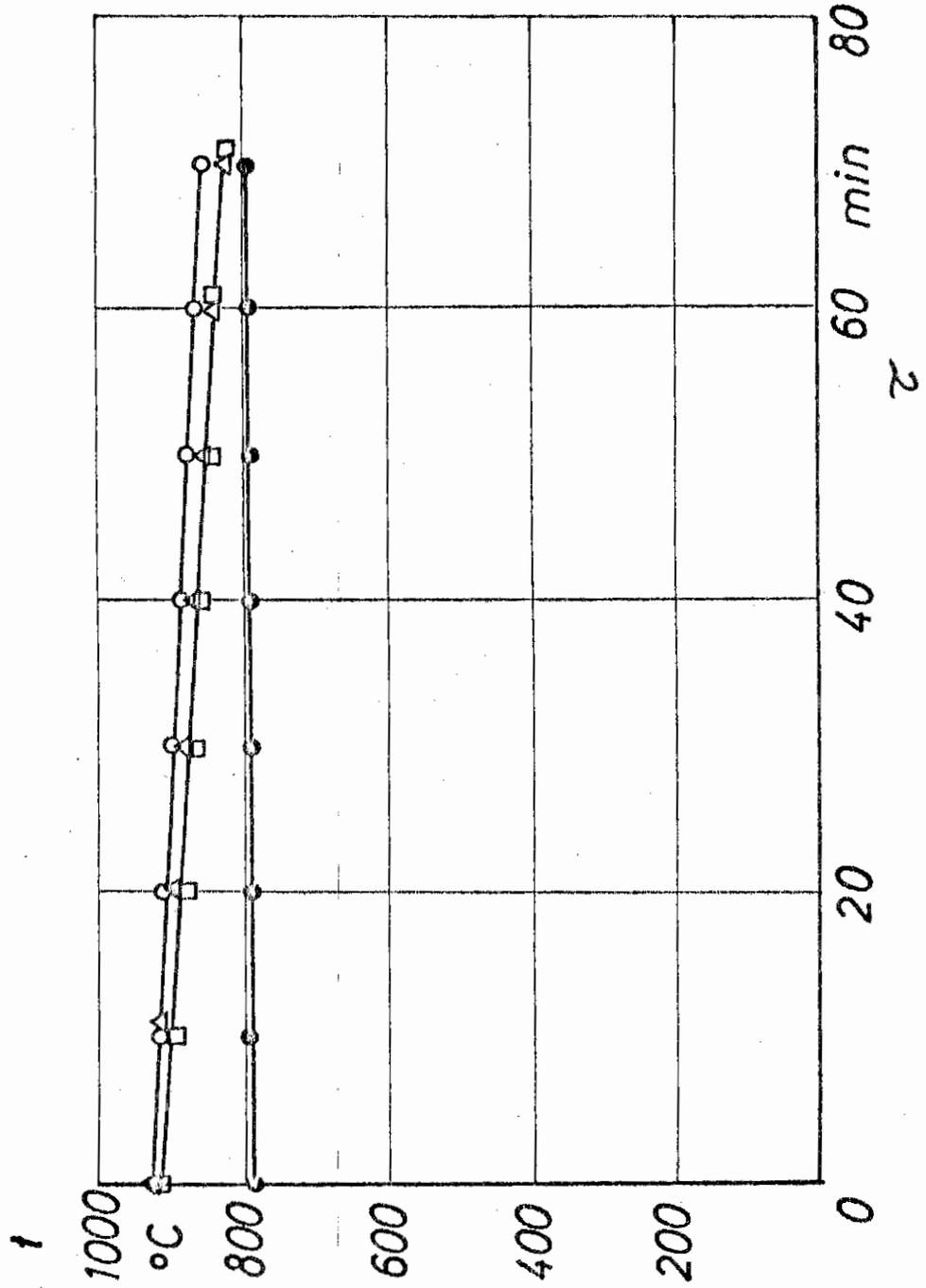
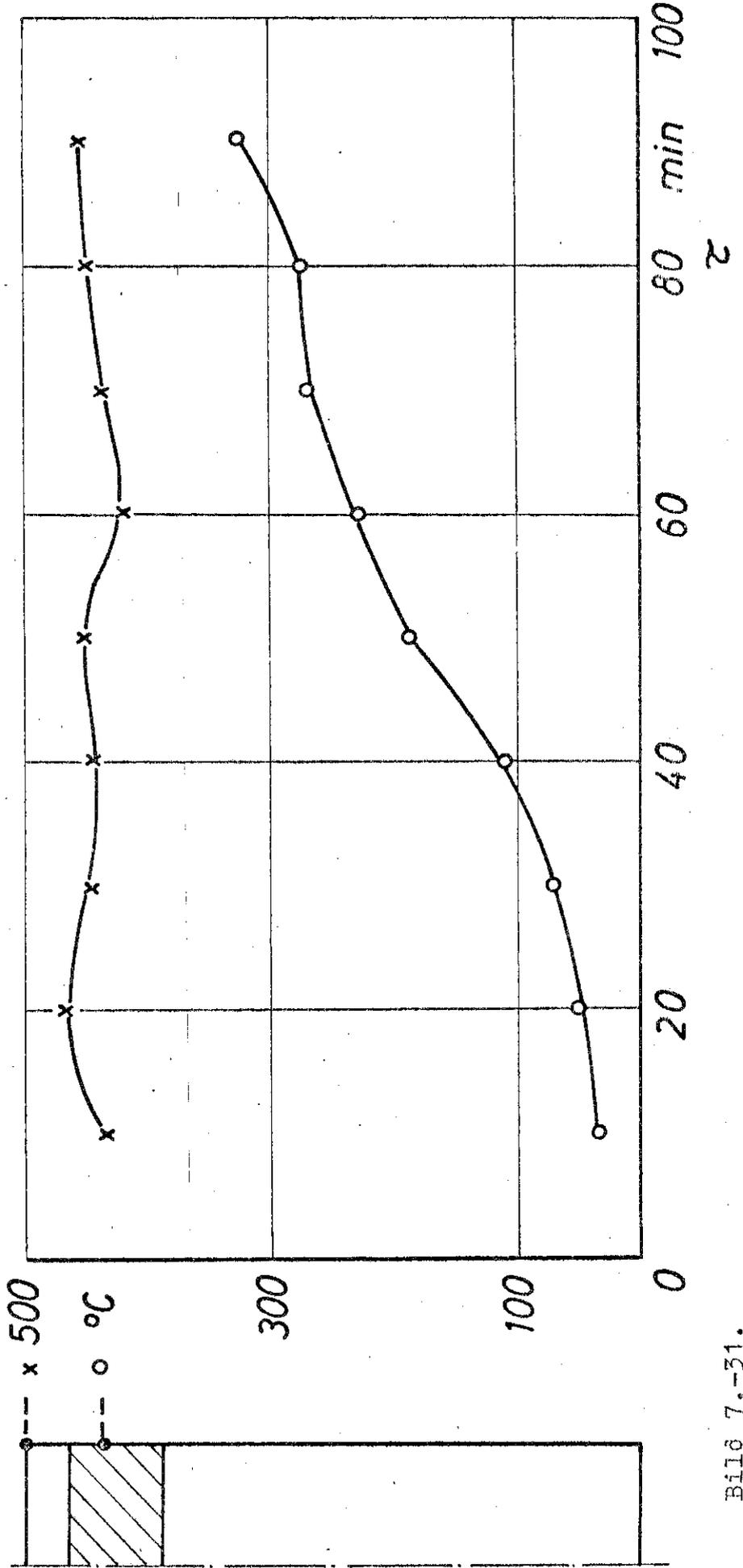


Bild 7.-30.

Versuch Nr. 28

$d = 200$  o.W.  $t$



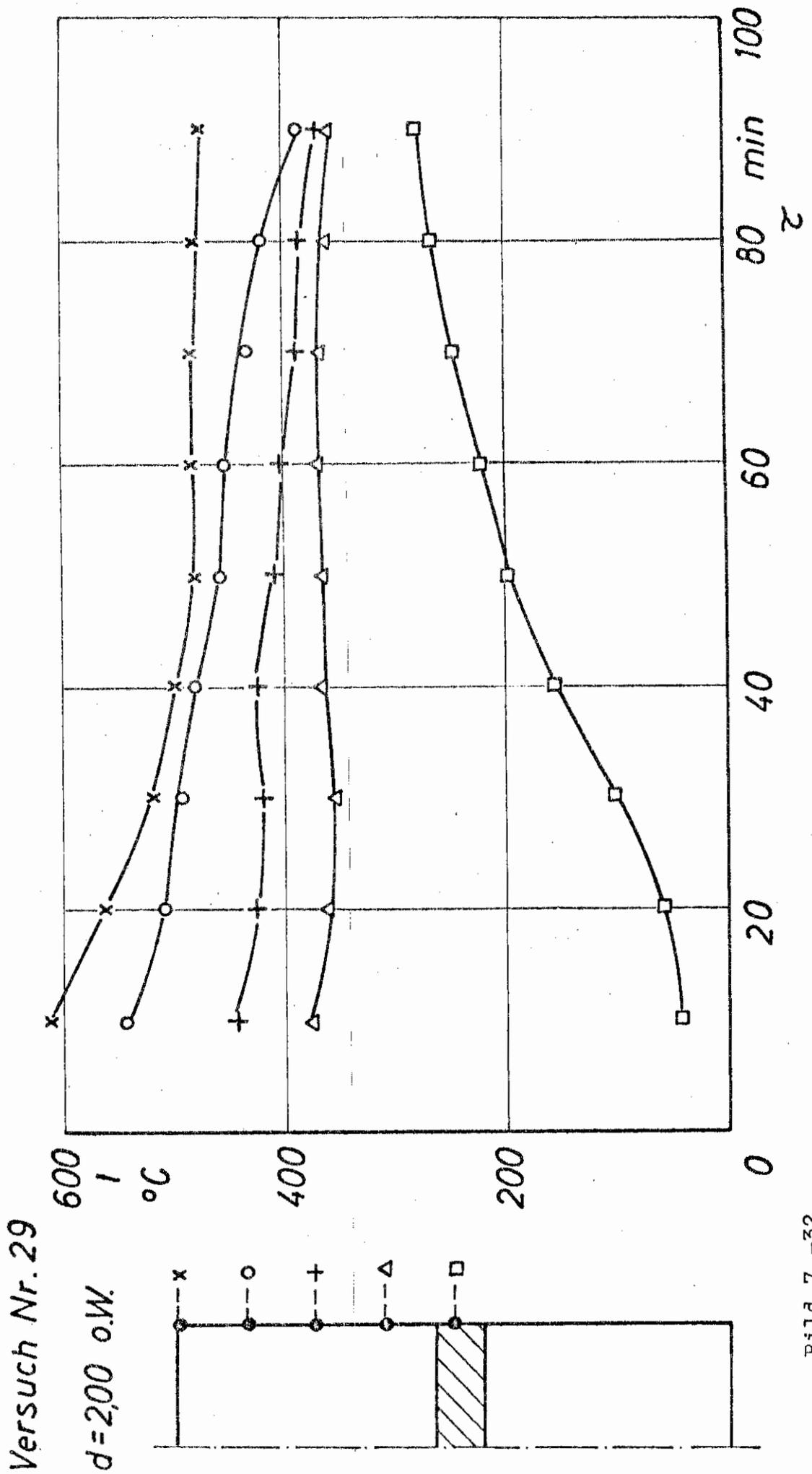


Bild 7.-32.

Versuch Nr. 30

d = 200 o.W.

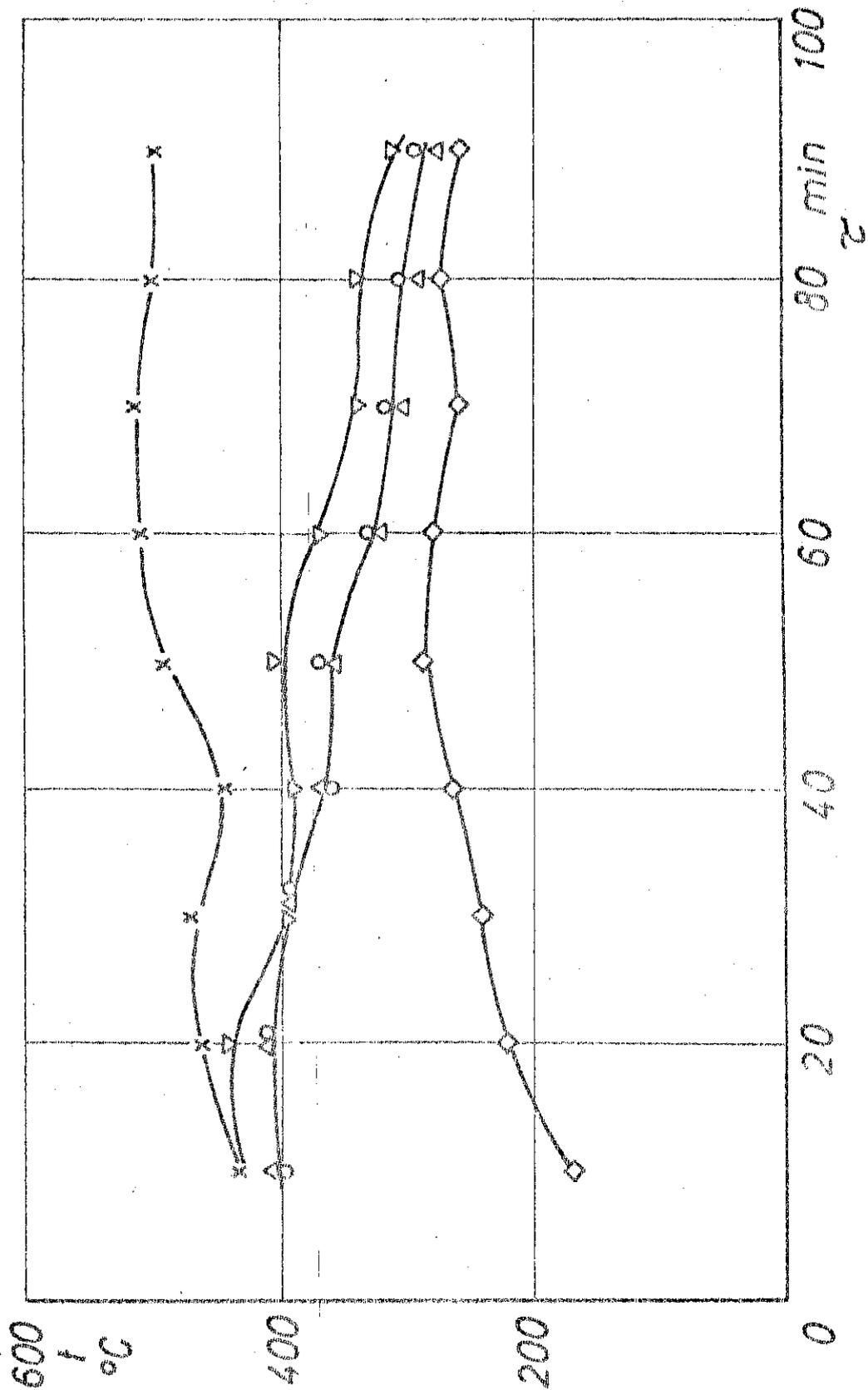
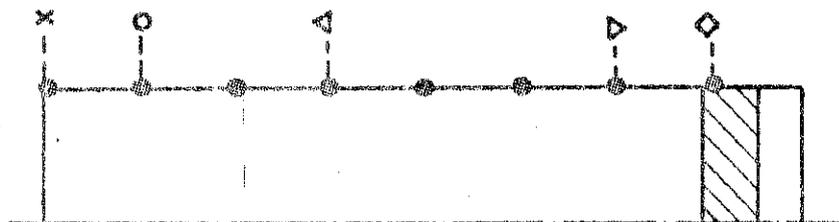


Bild 7.-33.