

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Untersuchung der Wärmeübertragung durch Strahlung
von einem brennenden Objekt auf die Umgebung

22

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

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

Forschungsbericht Nr. 22

"Untersuchung der Wärmeübertragung durch Strahlung
von einem brennenden Objekt auf die Umgebung"

von

Dr.-Ing. Paul G. Seeger

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an die Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

August 1972

FA. Nr. 45 (5/68)

- zweite Auflage, September 1981 -

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. BERECHNUNG DER BESTRAHLUNGSSTÄRKE AN EINEM BELIEBIGEN RAUMPUNKT IN DER UMGEBUNG EINES BRENNENDEN OBJEKTES	2
3. ANWENDUNG DER THEORIE AUF ZWEI TYPISCHE BRANDFÄLLE	4
3.1. Wärmestrahlung eines Brandes in einem Gebäude	6
3.2. Wärmestrahlung eines Brandes eines Lagertanks für brennbare Flüssigkeiten	7
4. BRANDVERSUCHE AN MODELLTANKS ZUR BESTIMMUNG DER WÄRMESTRAHLUNG	11
4.1. Versuchseinrichtung und Versuchsbedingungen	12
4.2. Meßverfahren	14
4.2.1. Messung der Flammenlänge	14
4.2.2. Messung der Bestrahlungsstärke	15
4.3. Versuchsergebnisse und Diskussion	16
4.3.1. Flammenlänge	16
4.3.2. Bestrahlungsstärke	17
4.4. Folgerungen aus den Versuchen	19
5. ZUSAMMENFASSUNG	19
6. LITERATURVERZEICHNIS	21
7. TABELLEN	24
8. BILDER	27

FORMELZEICHEN

a	Abstand zwischen der Gebäude- bzw. Tankwand und dem bestrahlten Flächenelement
a'	Äquivalenter Abstand zwischen der Flamme und dem bestrahlten Flächenelement
b	Äquivalente Flammenbreite
c	Höhe über der Tanköffnung
c ₁	Konstante
d	Tankdurchmesser
$Fr = \frac{u^2}{g \cdot d}$	Froude-Zahl
g	Erdbeschleunigung
h	Gebäude- bzw. Tankhöhe
l	Fassadenlänge des Gebäudes bzw. Flammenlänge
p	Prozentualer Anteil der Fensterfläche an der Fassadenfläche des Gebäudes
$\dot{q}$	Bestrahlungsstärke
T	Absolute Temperatur
u	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Brennstoffdampfes bzw. des Brenngases
ϵ	Emissionsvermögen
σ	Stefan-Boltzmannsche Konstante; $\sigma = 5,77 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{ K}^4$
φ	Winkelverhältnis

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Die bei einem Brand freiwerdende Wärme wird auf in der Umgebung befindliche Objekte sowohl durch Strahlung als auch konvektiv von den Verbrennungsgasen übertragen. Es kommt vor allem auf die Temperatur der Verbrennungsgase an, mit welchen Anteilen die beiden Übertragungsarten am Gesamtwärmeübergang teilnehmen. Auch spielen die räumliche Zuordnung des brennenden und der brandgefährdeten Objekte zueinander und die Umweltbedingungen, z.B. Wind, eine Rolle. So kann bei eng benachbarten Objekten der konvektiv übertragene Wärmestromanteil größere Werte annehmen, während mit zunehmender Entfernung vom brennenden Objekt die Gefahr einer Berührung des gefährdeten Objektes durch Flammen und Verbrennungsgase immer mehr zurückgeht, so daß Wärme nur durch Strahlung übertragen wird.

Die Festlegung von Sicherheitsabständen zwischen brandgefährdeten Objekten und die Auslegung von Brandschutzeinrichtungen, z.B. Berieselungseinrichtungen für Lagertanks für brennbare Flüssigkeiten, bereiten im allgemeinen erhebliche Schwierigkeiten. Die beispielsweise in Verordnungen und Technischen Regeln festgelegten Sicherheitsabstände und vorgeschriebenen Leistungswerte für Brandschutzeinrichtungen sind mehr oder weniger willkürlich angenommen und entbehren größtenteils der wissenschaftlichen Grundlage.

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es, Rechenverfahren aufzuzeigen bzw. zu entwickeln, mit denen die Bestrahlungsstärken an beliebigen Raumpunkten in der Umgebung eines brennenden Objektes ermittelt oder bei einem vorgegebenen kritischen Wert für die Bestrahlungsstärke die erforderlichen Sicherheitsabstände zwischen brandgefährdeten Objekten bestimmt werden können. Für die Ausarbeitung derartiger Rechenverfahren und für die Ermittlung der erforderlichen Stoff- und Rechenwerte werden einerseits Arbeiten aus der Literatur

herangezogen und andererseits Modellbrandversuche durchgeführt.

2. BERECHNUNG DER BESTRAHLUNGSSTÄRKE AN EINEM BELIEBIGEN RAUMPUNKT IN DER UMGEBUNG EINES BRENNENDEN OBJEKTES

Die Wärmestrahlung einer Flamme setzt sich aus der Strahlung einzelner Komponenten der Verbrennungsgase, insbesondere Kohlendioxid und Wasserdampf, die in gewissen, eng begrenzten Wellenlängenbereichen, sogenannten Banden, absorbieren und emittieren, und aus der Strahlung der sich bei unvollständiger Verbrennung abscheidenden glühenden Rußteilchen zusammen, die ein kontinuierliches Spektrum aussenden. Die spektrale Intensität der Gasstrahlung ist von der Temperatur, der Schichtdicke der Flamme und dem Partialdruck der entsprechenden Gaskomponente abhängig. Die Intensität der Rußstrahlung hängt ebenfalls von der Temperatur und der Schichtdicke der Flamme, außerdem aber von der Konzentration des Rußes in der Flamme, seiner Größe und Struktur ab. Während die Berechnung der Wärmeübertragung durch die Gasstrahlung keine allzu großen Schwierigkeiten bereitet, sofern die obengenannten Größen bekannt sind, ist die Wärmeübertragung durch die Rußstrahlung wesentlich schwieriger zu bestimmen, da die Eigenschaften, die Größe und die Verteilung der Rußteilchen in einer Flamme von einer Vielzahl von Einflußfaktoren abhängen. Je nachdem ob Rußbildung und damit Rußstrahlung in der Flamme vorliegt oder nicht, unterscheidet man leuchtende und nichtleuchtende Flammen.

Wegen der unvollständigen Verbrennung, die im allgemeinen mit Bränden verbunden ist, handelt es sich bei den auftretenden Flammen um leuchtende Flammen. Bei Flammendicken größer als 1 m kann man näherungsweise solche Flammen als schwarze bzw. graue Körper mit einem Emissionsvermögen zwischen 0,9 und 1 ansehen und damit für die Ermittlung der Strahlung auf

das Stefan-Boltzmannsche-Gesetz zurückgreifen, wodurch man die Schwierigkeiten, die mit der Bestimmung der Rußbildung zusammenhängen, umgehen kann. Mit dieser Voraussetzung kann die Bestrahlungsstärke, die an einem beliebig in der Umgebung des brennenden Objektes befindlichen Flächenelement auftritt, nach folgender Beziehung berechnet werden:

$$\dot{q} = \varphi \epsilon \sigma T^4 \quad . \quad (1)$$

Hierin ist:

$\dot{q}$ die Bestrahlungsstärke in W/cm^2

φ das Winkelverhältnis

ϵ das Emissionsvermögen

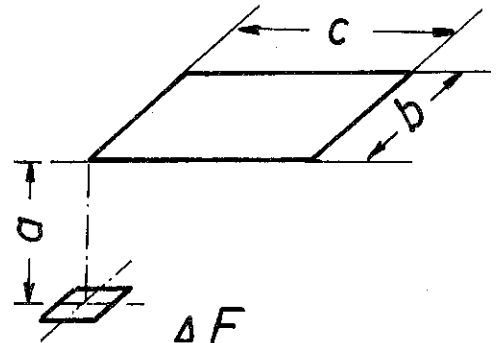
σ die Stefan-Boltzmannsche Konstante; $\sigma = 5,77 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{ K}^4$

T die Flammentemperatur in K

Das Winkelverhältnis φ gibt den Bruchteil der von einem strahlenden Körper ausgesandten Wärme wieder, der auf ein in der Umgebung befindliches Flächenelement auftritt. Für eine Reihe technisch wichtiger Fälle können Beziehungen für die Ermittlung des jeweiligen Winkelverhältnisses der Literatur [1,2,3] entnommen werden.

Die für die Berechnung der Wärmestrahlung bei den im Folgenden angenommenen zwei Brandfällen erforderlichen Beziehungen für die Bestimmung des Winkelverhältnisses sind nachstehend aufgeführt [1,2]:

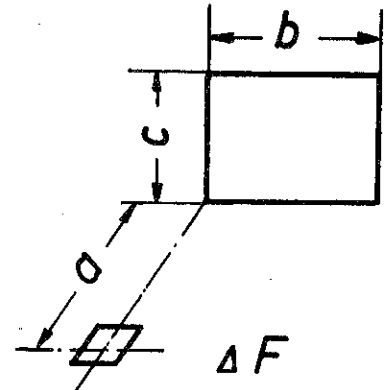
1. Winkelverhältnis zwischen einem parallel zu einer Rechteckfläche liegenden Flächenelement und der Rechteckfläche, wobei eine Ecke der Rechteckfläche die Mittelpunkt senkrecht des Flächenelementes berührt:



$$\varphi = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{B}{\sqrt{1+B^2}} \arctan \frac{C}{\sqrt{1+B^2}} + \frac{C}{\sqrt{1+C^2}} \arctan \frac{B}{\sqrt{1+C^2}} \right) (2)$$

$$\text{mit } B = \frac{b}{a} \text{ und } C = \frac{c}{a} \quad .$$

2. Winkelverhältnis zwischen einem senkrecht zu einer Rechteckfläche liegenden Flächenelement und der Rechteckfläche, wobei eine Seite der Rechteckfläche in der Ebene des Flächenelementes liegt und die Normale eines Eckpunktes der Rechteckfläche durch den Mittelpunkt des Flächenelementes geht:



$$\varphi = \frac{1}{2\pi} \left(\arctan B - \frac{1}{\sqrt{1 + c^2}} \arctan \frac{B}{\sqrt{1 + c^2}} \right) \quad (3)$$

$$\text{mit } B = \frac{b}{a} \text{ und } C = \frac{c}{a}.$$

In [1] könnten die Winkelverhältnisse direkt aus Diagrammen, die den Gleichungen (2) und (3) entsprechen, entnommen werden.

Erfüllt die geometrische Anordnung zweier parallel oder senkrecht zueinander stehenden Flächen nicht die obengenannten Forderungen, so kann man dies erreichen, indem man die eine Fläche in Teilrechtecke zerlegt bzw. sie vergrößert. Für diese Teil- oder vergrößerten Rechteckflächen können dann die Winkelverhältnisse bestimmt und durch sinngemäße Addition bzw. Subtraktion das gesuchte Winkelverhältnis gefunden werden.

3. ANWENDUNG DER THEORIE AUF ZWEI TYPISCHE BRANDFÄLLE

Mit der Gleichung (1) kann man einerseits die auf einen beliebig in der Umgebung liegenden Körper einwirkende Bestrahlungsstärke berechnen, andererseits aber auch, wenn einem die kritische Bestrahlungsstärke bekannt ist, bei der der Körper nach einer bestimmten Einwirkungszeit zur Entzündung kommt, den notwendigen Abstand bestimmen, um eine derartige Entzündung zu vermeiden. Zu diesem Zweck sind in der

Tabelle 1 Anhaltswerte für kritische Bestrahlungsstärken einiger Stoffe nach [4] zusammengestellt worden. Dabei handelt es sich bei den unter dem Begriff Selbstentzündung stehenden Werten um Bestrahlungsstärken, die nach maximal 15 Minuten Einwirkungszeit zu einer Selbstentzündung des Stoffes führen können. Die geringeren, unter dem Begriff Fremdzündung aufgeführten Werte geben Bestrahlungsstärken an, die nach einer gewissen Einwirkungszeit aus dem bestrahlten Stoff so viel Dämpfe und Gase austreiben, daß diese mit einer kleinen Zündflamme entzündet werden können. Diese Werte sind für Brandfälle bestimmt, bei denen eine Gefahr der Entzündung durch Funkenflug besteht.

Anhand zweier typischer Brandfälle, Brand in einem Gebäude und Brand eines Lagertanks für brennbare Flüssigkeiten, wird im folgenden die Anwendung der Gleichung (1) aufgezeigt. Die Berechnung erfolgt jeweils für den Zeitabschnitt des Brandes, in dem der Brand mit einer annähernd konstanten Abbrandgeschwindigkeit abläuft. Dabei wird angenommen, daß eine Absorption und Streuung der von dem brennenden Objekt emittierten Wärmestrahlung in der zwischen dem brennenden und dem bestrahlten Objekt befindlichen Atmosphäre durch Wasserdampf, Kohlendioxid und Staub nicht auftritt.

Da das die Bestrahlungsstärke bestimmende Winkelverhältnis zwischen zwei parallelen Flächen wesentlich größer als zwischen zwei senkrecht zueinander stehenden Flächen bei sonst gleichen geometrischen Verhältnissen ist und für Sicherheitsüberlegungen nur der größere Wert von Interesse ist, wird bei den nachstehenden Betrachtungen nur auf das Winkelverhältnis nach Gleichung (2) zurückgegriffen. Außerdem wird vorausgesetzt, daß die Temperatur und das Emissionsvermögen der Flamme an jedem Ort der Flamme den gleichen Wert hat und sich während des Brandablaufs nicht ändert.

3.1. Wärmestrahlung eines Brandes in einem Gebäude

Entsteht in einem Gebäude ein größerer Brand, so kann Wärme nur durch die Fensteröffnungen auf die Umgebung übertragen werden. Die von den Oberflächen der Gebäudeaußenwände ausgehende Wärmestrahlung kann bei der hier vorliegenden Betrachtung außer acht bleiben, da erst nach einer sehr langen Branddauer die Wände so erwärmt worden sind, daß eine merkliche Wärmestrahlung auftritt.

Betrachtet man nun eine Wand mit mehreren Fensteröffnungen, so müßte das Winkelverhältnis für jede Fensteröffnung ermittelt werden und aus diesen einzelnen Winkelverhältnissen das Gesamtwinkelverhältnis durch Addition errechnet werden. Da man aber in den meisten Fällen bei Gebäuden eine symmetrische Fensterverteilung annehmen kann, kann man die obige, mit einigem Rechenaufwand verbundene Bestimmung des Winkelverhältnisses vermeiden, indem man das Winkelverhältnis für die Wand ermittelt und es mit dem prozentualen Fensterflächenanteil multipliziert. So ergibt sich für das Winkelverhältnis zwischen einem parallel zu einer senkrechten Gebäudewand mit der Länge l , mit der Höhe h und mit einem prozentualen Fensterflächenanteil p im Abstand a liegenden Flächenelement, dessen Mittelpunkt senkrecht durch den Mittelpunkt der Wandfläche geht, und der Wandfläche folgende Beziehung:

$$\varphi = \frac{2}{\pi} \left(\frac{h}{\sqrt{h^2 + 4a^2}} \arctan \frac{l}{\sqrt{h^2 + 4a^2}} + \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4a^2}} \arctan \frac{h}{\sqrt{l^2 + 4a^2}} \right) \frac{p}{100} \quad (4)$$

In einer Studie [5] bestimmten Virtala und Toivonen mit Hilfe dieser Beziehung die erforderlichen Sicherheitsabstände, um eine Entzündung zu vermeiden, wobei sie für den bestrahlten Körper Holz als Baustoff annahmen. Anhand von Entzündbarkeitsversuchen an ihrem Institut fanden sie, daß unter normalen Verhältnissen eine Holzkonstruktion in Brand gerät, wenn die Bestrahlungsstärke einen Wert von $0,84 \text{ W/cm}^2$ über-

schreitet. Mit diesem Wert berechneten sie mit Hilfe von Gleichung (1) das kritische Winkelverhältnis zu 0,056, wobei sie für die Temperatur der strahlenden Fläche 1000 °C und für das Emissionsvermögen den Wert 1 in Gleichung (1) einsetzten.

Führt man dieses kritische Winkelverhältnis in Gleichung (4) ein, so ergibt sich die Flächenschar

$$a = f(p, l, h), \quad (5)$$

die den erforderlichen Sicherheitsabstand a als Funktion des prozentualen Anteils der Fensterfläche p , der Fassadenlänge l und der Gebäudehöhe h darstellt. Aus dieser Flächenschar erhält man durch Schnitte senkrecht zu jeweils einer Koordinatenachse für den erforderlichen Sicherheitsabstand Kurvenscharen, wie sie in den Bildern 1 und 2 dargestellt sind. Aus Bild 1 können die erforderlichen Sicherheitsabstände in Abhängigkeit von der Fassadenlänge für zwei verschiedene Fensterflächenanteile mit der Gebäudehöhe als Parameter und aus Bild 2 die erforderlichen Sicherheitsabstände in Abhängigkeit von dem Fensterflächenanteil für zwei verschiedene Gebäudehöhen mit der Fassadenlänge als Parameter entnommen werden.

3.2. Wärmestrahlung eines Brandes eines Lagertanks für brennbare Flüssigkeiten

Die bei einem Brand eines Lagertanks für brennbare Flüssigkeiten auf die Umgebung übertragene Strahlungswärme setzt sich aus der von der Flamme und aus der von der Tankwand emittierten Strahlungswärme zusammen. Für die Berechnung der Winkelverhältnisse wird vorausgesetzt, daß die Flamme völlig auf der Tanköffnung aufsitzt und die Form eines Zylinders besitzt, dessen Durchmesser gleich dem

Tankdurchmesser und dessen Höhe gleich der Flammenlänge ist. Ein Einfluß von Wind auf die Verbrennung, auf die Form der Flamme und auf das Winkelverhältnis wird nicht berücksichtigt.

Da das Winkelverhältnis nur von dem die strahlende Fläche einschließenden Winkel und nicht von der Form dieser Fläche abhängt, kann, wie Bild 3 zeigt, die Oberfläche des Flammen- bzw. Tankzylinders durch eine Rechteckfläche im Abstand a' ersetzt werden, wodurch eine elementare Berechnung des Winkelverhältnisses nach Gleichung (2) oder Gleichung (3) ermöglicht wird. Der Fehler, der bei der Berechnung durch den Wegfall der Flächenstücke an der oberen und unteren Begrenzung des Tank- bzw. Flammenzylinders entsteht, ist so klein, daß er vernachlässigt werden kann.

Der auf den Tankdurchmesser bezogene äquivalente Abstand a' und die auf den Tankdurchmesser bezogene äquivalente Flammenbreite b können entsprechend den in Bild 3 wiedergegebenen geometrischen Verhältnissen nach folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$\frac{a'}{d} = \frac{2\left(\frac{a}{d}\right)^2 + 2\left(\frac{a}{d}\right)}{2\left(\frac{a}{d}\right) + 1} \quad (6)$$

$$\frac{b}{d} = \sqrt{1/2 \left[\frac{a'}{d} \sqrt{\left(\frac{a'}{d}\right)^2 + 1} - \left(\frac{a'}{d}\right)^2 \right]}. \quad (7)$$

Die für den Fall der Flammenstrahlung für die Bestimmung des Winkelverhältnisses notwendigen Flammenlängen sind für größere Tankdurchmesser eine noch unbekannte Größe. Bisherige Messungen der Länge von Flammen brennender Tanks erstreckten sich auf Tankdurchmesser bis 22,9 m [6].

Bei den bei Tankbränden auftretenden Flammen handelt es sich um auftriebsbehaftete Diffusionsflammen, die den Übergang zwischen den laminaren und den rein turbulenten Flammen bilden und bei denen in den meisten Fällen der mit dem aufsteigenden Brennstoffdampf mitgeführte Impuls gegenüber dem durch Auftrieb verursachten Impuls vernachlässigt werden kann. Für diese Flammen kann man mit Thomas [7] annehmen, daß die auf den Tankdurchmesser bezogene Flammenlänge nur von der Froude-Zahl abhängt.

Es liegt eine Reihe von theoretischen und experimentellen Arbeiten [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] vor, die zu dem Ergebnis kamen, daß der Zusammenhang zwischen der auf den Tankdurchmesser bezogenen Flammenlänge l und der Froude-Zahl Fr durch folgende Potenzfunktion beschrieben werden kann:

$$l/d = c_1 Fr^n . \quad (8)$$

Hierin ist c_1 eine Konstante, die von dem jeweiligen Brennstoff abhängt. Die Autoren der oben erwähnten Arbeiten [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] fanden bei ihren Untersuchungen an Flammen gasförmiger und flüssiger Brennstoffe fast übereinstimmend für den Exponenten der Froude-Zahl den Wert 0,2.

Da nach Blinov und Chudjakov [6, 15] die Abbrandgeschwindigkeit von im Normzustand flüssigen Brennstoffen bei Tankdurchmessern größer als 1 m etwa 4 mm/min beträgt, was einer Geschwindigkeit des im Tank aufsteigenden Dampfstromes von ca. 10 mm/s entspricht, liegen die Froude-Zahlen realer Tankbrände bei Tanks mit Durchmessern von 10 m bis 100 m in der Größenordnung von 10^{-6} bis 10^{-7} . Für diese Abbrandgeschwindigkeiten bzw. Froude-Zahlen liegen nach [14, 16, 17] die auf den Tankdurchmesser bezogenen Flammenlängen zwischen 1 und 2.

Allerdings ist der Fehler, der durch die ungenaue Ermittlung der Flammenlänge hervorgerufen wird, nicht allzu schwerwiegend, wie Bild 4 erkennen läßt. In diesem Bild ist der Verlauf der Winkelverhältnisse zwischen der Flamme und einem parallel zur Flammenachse in Tankhöhe liegenden Flächenelement über dem auf den Tankdurchmesser bezogenen Abstand a für verschiedene Flammenlängen im halb-logarithmischen Maßstab aufgetragen. Welchen Einfluß die Lage des bestrahlten Flächenelementes auf die Größe des Winkelverhältnisses hat, zeigt Bild 5, in welchem der Verlauf der Winkelverhältnisse sowohl für den Fall, daß sich das Flächenelement in Tankhöhe befindet, als auch für den Fall, daß es in Höhe des Flammenmittelpunktes liegt, über dem auf dem Tankdurchmesser bezogenen Abstand a im halb-logarithmischen Maßstab aufgezeichnet ist.

Der nach Gleichung (1) berechnete Verlauf der Bestrahlungsstärke, die an einem Flächenelement herrscht, dessen Mittelpunkt senkrecht durch den Flammenmittelpunkt geht, ist in Bild 6 über dem auf den Tankdurchmesser bezogenen Abstand a im halb-logarithmischen Maßstab aufgetragen. Für die Berechnung wurde das Emissionsvermögen der Flamme zu 0,9 und die Temperatur der Flamme zu 900°C angenommen. Dieser Wert deckt sich mit Messungen bei den in Abschnitt 4 beschriebenen Brandversuchen an Modelltanks (siehe AGF-Forschungsbericht Nr. 21 [18]) und mit Angaben aus der Literatur [16, 18]. Für die Ermittlung der Winkelverhältnisse wurde für die Flammenlänge, auf den Tankdurchmesser bezogen, ein Wert von $l/d = 1,5$ der Berechnung zugrundegelegt.

Bei der Bestimmung der Bestrahlungsstärke wurde nur die Flammenstrahlung berücksichtigt, d.h. die von der Tankwand ausgesandte Wärmestrahlung blieb aus folgendem Grund außer Betracht. Einerseits wird die Tankwand bei gefülltem Tank

durch den in dem Tank lagernden Brennstoff soweit gekühlt, daß eine Wärmestrahlung der Wand nicht auftreten kann. Andererseits nimmt zwar der von der Tankwand emittierte Wärmestrom mit sinkendem Flüssigkeitsspiegel zu, erreicht aber wegen der 4. Potenz, mit der die Temperaturen in das Stefan-Boltzmannsche Gesetz eingehen, bei gleichem Emissionsvermögen und bei einer die Stabilität der Tankwand noch nicht gefährdenden Wandtemperatur nur einen Bruchteil des von der Flamme ausgesandten Wärmestromes.

Bild 6 zeigt nun, wie man bei gegebenem Tankdurchmesser d und gegebenem Abstand a anhand des nach Gleichung (1) berechneten Verlaufs der örtlichen Bestrahlungsstärke, die maximal an diesem Raumpunkt auftretende Bestrahlungsstärke $\dot{q}_{\max}$ ermitteln kann (siehe Fall 1). Umgekehrt kann dem Bild 6, wenn der Tankdurchmesser d und ein kritischer Wert für die Bestrahlungsstärke $\dot{q}_{\text{krit}}$ vorgesehen sind, der auf den Tankdurchmesser bezogene Mindestabstand a entnommen werden (siehe Fall 2).

4. BRANDVERSUCHE AN MODELLTANKS ZUR BESTIMMUNG DER WÄRMESTRAHLUNG

Um zu klären, inwieweit die Gleichung (1) die bei wirklichen Tankbränden in der Umgebung auftretenden Bestrahlungsstärken wiedergibt, wurden Brandversuche an drei größeren Modelltanks auf einem Freigelände¹⁾ durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen wurden folgende Größen bestimmt:

1. Die Temperaturen in der Flamme, im Tankraum zwischen Tanköffnung und Flüssigkeitsoberfläche, in der Flüssigkeit und in der Tankwand.
2. Die Abbrandgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Füllhöhe im Tank.

¹⁾ Für die Überlassung des Versuchsgeländes sei hier der ESSO AG, Raffinerie Karlsruhe, besonders gedankt.

3. Der durch Wasserkühlung der Tankwand abgeführte Wärmestrom.
4. Die Eindringtiefe der Flamme in das Tankinnere zwischen Tanköffnung und Flüssigkeitsoberfläche.
5. Die Flammenlänge.
6. Die in der Umgebung des brennenden Tanks auftretende Bestrahlungsstärken.

Die unter den Ziffern 1 bis 4 angeführten Untersuchungen sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Über diese Versuche und ihre Ergebnisse wurde eingehend im Forschungsbericht Nr. 21 der AGF "Brände von Erdölprodukten in Tanks - Versuche und Rechenmodell" [18] berichtet.

4.1. Versuchseinrichtung und Versuchsbedingungen

Das Schema der Versuchseinrichtung zeigt Bild 7. Bild 8 gibt eine Gesamtansicht der Versuchsanlage wieder. Zum Schutz des Grundwassers standen die Modelltanks jeweils in einer öldichten Auffangwanne.

Um die Voraussetzung - Flammendicke größer als 1 m -, die der Gleichung (1) zugrunde liegt, zu erfüllen, wurden die Durchmesser der drei Modelltanks zu 1,28 m, 1,6 m und 2,0 m festgelegt. Die Höhe war bei allen drei Tanks gleich und betrug 2,0 m.

Durch einen zusätzlichen Blechmantel, der im Abstand von 75 mm um die Tankwand angeordnet werden konnte, konnte die Tankwand fast auf ihrer gesamten Höhe mit Wasser gekühlt werden. Dabei wurde der Kühlwasserstrom während der jeweiligen Versuchsdauer auf einem konstanten Wert gehalten,

der so groß gewählt worden war, daß ein Sieden des Wassers vermieden wurde. Mit dieser Anordnung war es möglich, den Einfluß der von der Tankwand ausgesandten Wärmestrahlung zu untersuchen.

Als Brennstoff wurde Gasöl III verwendet. Die wichtigsten Kenngrößen dieses Brennstoffes, das unter Tankbrandbedingungen eine stark leuchtende Flamme aufweist, können der Tabelle 2 entnommen werden.

Da die Flammenstrahlung einerseits von der Abbrandgeschwindigkeit des Brennstoffes abhängt, andererseits aber sich die Abbrandgeschwindigkeit mit sinkendem Flüssigkeitsspiegel verringert, wurden die Messungen an dem jeweiligen Tank im vollgefüllten, halbleeren und fast leerem Zustand, entsprechend den drei mittleren Füllhöhen im Tank von 1,8 m, 1,0 m und 0,2 m, durchgeführt. Die Füllhöhe wurde am Beginn eines jeden Versuches entsprechend der vorgesehenen Versuchsdauer und der örtlichen Abbrandgeschwindigkeit durch Zupumpen aus oder durch Abpumpen in Vorratsbehälter so eingestellt, daß die genannten Mittelwerte für die Füllhöhe eingehalten werden konnten. Um den örtlichen Verlauf der Bestrahlungsstärke senkrecht und parallel zur Tankachse ermitteln zu können, war eine Versuchsdauer von rund 100 Minuten erforderlich. Wie die Messungen der Abbrandgeschwindigkeit ergaben, nimmt bei den hier vorliegenden Tankabmessungen die Abbrandgeschwindigkeit von 2 mm/min bis 2,5 mm/min bei voll gefülltem Tank mit sinkendem Flüssigkeitsspiegel bis auf 1 mm/min bis 1,5 mm/min bei fast leerem Tank ab [18].

Um die Reproduzierbarkeit der Messungen überprüfen zu können, wurden bei den Modelltanks mit den Durchmessern von 1,28 m und 1,6 m je zwei Versuche bei den drei Füllhöhen mit und ohne Wasserkühlung durchgeführt. Da die Meßergebnisse weitgehend übereinstimmten, beschränkte sich die

Untersuchung an dem Modelltank mit dem Durchmesser von 2,0 m nur noch jeweils auf einen Versuch.

Nach Beendigung der Messungen wurde der Tank mit Hilfe einer Asbestdecke gelöscht. Da das nach dem Löschen im Tank verbleibende Öl für die folgenden Versuche wieder verwendet wurde, konnte der Tank weder mit Pulver oder Schaum gelöscht werden, da das Öl dadurch verunreinigt worden wäre, noch mit Wasser, da das ein Wasserpelster auf den Tankboden sonst zur Folge gehabt hätte. Die Wiederbenutzung des im Tank verbleibenden Öls war zulässig, da das hier als Brennstoff verwendete Öl, wie in [18] nachgewiesen wird, keine Wärmezone aufbaut. Dies bedeutet, daß, abgesehen von einer sehr dünnen Schicht an der Flüssigkeitsoberfläche, eine Änderung in der Zusammensetzung und in den Eigenschaften des Öls nicht eintritt.

Die Füllhöhe im Tank wurde am Beginn und am Ende eines Versuches mit einem Meßstab ermittelt und ihre zeitliche Abnahme über den statischen Druck der Flüssigkeitssäule mittels elektrischer Meßwertaufnehmer bestimmt und auf einen 12-Meßstellen-Kompensationspunktdrucker registriert.

Um witterungsbedingte äußere Umwelteinwirkungen auf die Untersuchungen möglichst auszuschalten, wurden die Versuche nur bei niederschlagsfreiem Wetter und bei Windgeschwindigkeiten nicht über 4 m/s (Windstärke 3) durchgeführt.

4.2. Meßverfahren

4.2.1. Messung der Flammenlänge

Die Flammenlänge wurde anhand fotografischer Kurzaufnahmen der Flamme mit Hilfe eines mitfotografierten Meßstabes mit 10 cm Einteilung (siehe Bild 8) bestimmt, dessen Abstand

von der Flammenachse ein Drittel der Gesamtentfernung zwischen Kamera und Flammenachse betrug.

4.2.2. Messung der Bestrahlungsstärke

Die Messung der örtlichen Bestrahlungsstärke erfolgte mit Strahlungssonden der Firma Pyro-Werk GmbH, Hannover, die aufgrund ihres Öffnungswinkels von 180° die gesamte Halbraumstrahlung erfassen. Um die Meßwerte unabhängig von der auftretenden Bestrahlungsstärke in etwa mit der gleichen Genauigkeit erfassen zu können, wurde mit zwei Strahlungssonden unterschiedlicher Meßbereiche gearbeitet. Die eine Strahlungssonde war für den Meßbereich $0 - 4,5 \text{ W/cm}^2$ und die andere für den Meßbereich $0 - 0,5 \text{ W/cm}^2$ ausgelegt. Um einen Meßfehler durch Gehäusetemperaturänderungen infolge der auftreffenden Wärmestrahlung zu vermeiden, wurden die Sondengehäuse durch Wasser gekühlt und dadurch auf einer konstanten Temperatur gehalten. Die Sonden wurden in einem Schwarzkörperofen mit sphärischem Strahler der Firma Land Pyrometers Ltd, Dronfield/England, geeicht. Die Meßwerte wurden auf einem Kompensationslinienschreiber aufgezeichnet, mit dessen Integrationseinrichtung auch der zeitliche Mittelwert der Bestrahlungsstärke während der jeweiligen Meßdauer von ungefähr 5 Minuten bestimmt werden konnte.

Zur Haltung und Führung der wassergekühlten Strahlungssonden und zur Aufnahme des Linienschreibers diente der in den Bildern 7 und 8 gezeigte Meßwagen. Auf einem Fahrgestell befand sich ein senkrechter Mast mit einer Länge von ca. 9 m, dessen Stabilität durch eine biegungssteife Fachwerkkonstruktion gewährleistet war. Längs dieses Mastes konnte auf seiner gesamten Höhe ein Führungsschlitten, der zur Aufnahme der beiden Strahlungssonden diente, mittels eines handbetätigten Kettenantriebes bewegt werden. Die Räder

des Fahrgestells liefen in U-förmigen Schienen, die auf hölzernen Eisenbahnschwellen verlegt waren. Der Meßwagen wurde durch einen Elektromotor angetrieben. Die Einstellgenauigkeit des Meßwagens und des Führungsschlittens lag unterhalb 1 cm. Die Strahlungssonde mit dem kleineren Meßbereich wurde bei Bestrahlungsstärken, die diesen Meßbereich überschritten, durch eine Abschirmung geschützt. Der Linienschreiber zur Registrierung der Meßwerte befand sich ebenfalls auf dem Fahrgestell.

4.3. Versuchsergebnisse und Diskussion

4.3.1. Flammenlänge

Die Schwierigkeit, anhand von fotografischen Kurzaufnahmen die Flammenlänge zu bestimmen, zeigt Bild 9, auf dem das Erscheinungsbild der Flamme zu verschiedenen Zeiten während eines Versuches ersichtlich ist. Bei Flammen, wie sie bei Tankbränden auftreten, nimmt infolge des Anstiegs der Temperatur der Verbrennungsgase der Auftrieb in der Flamme und damit die Strömungsgeschwindigkeit gegenüber der Verdampfungsgeschwindigkeit des flüssigen Brennstoffes so stark zu, daß es zu periodischen Einschnürungen der Flamme oberhalb der Tanköffnung kommt, die bis zum völligen Ablösen des oberen Flammenteils als Ballen führen können. Es wurde daher aus allen Flammenbildern eines Versuches die Länge des leuchtenden Teils der Flamme ausgemessen und aus diesen Einzelwerten ein Mittelwert für die Flammenlänge gebildet. Diese so erhaltenen und auf den Tankdurchmesser bezogenen Flammenlängen sind in Tabelle 3 für die einzelnen Versuche aufgeführt. Außerdem enthält diese Tabelle noch die Füllhöhe im Tank am Beginn und am Ende des jeweiligen Versuches und die Branddauer. Aufgrund der meßmethodisch bedingten Ungenauigkeit der Flammenlängenbestimmung kann den in Tabelle 3

aufgeführten Werten nur entnommen werden, daß die auf den Tankdurchmesser bezogene Flammenlänge im zeitlichen Mittel einen Wert von $l/d=1,5$ nicht überschreitet. Welchen Einfluß die Füllhöhe im Tank auf die Flammenlänge ausübt, kann eindeutig diesen Werten nicht entnommen werden. Um diesen Einfluß eventuell erfassen zu können, müßte die Flamme in einer wesentlich kürzeren Zeitfolge aufgenommen werden, als sie bei der hier vorliegenden Untersuchung mit ca. zehn Aufnahmen pro Versuch gewählt wurde.

4.3.2. Bestrahlungsstärke

Auf den Bildern 10 bis 12 sind die in Tankhöhe senkrecht zur Tankachse gemessenen zeitlichen Mittelwerte der örtlichen Bestrahlungsstärke über dem auf den Tankdurchmesser bezogenen Abstand a im halblogarithmischen Maßstab für die drei Tankdurchmesser und die drei Füllhöhen bei gekühlter Tankwand aufgetragen. Die Bilder 13 bis 15 zeigen die entsprechenden Meßwerte bei ungekühlter Tankwand. Die im Abstand von 3 m von der Tankachse längs der auf den Tankdurchmesser bezogenen Höhe c über der Tanköffnung gemessenen zeitlichen Mittelwerte der örtlichen Bestrahlungsstärke geben die Bilder 16 bis 18 für die drei Tankdurchmesser und die drei Füllhöhen bei gekühlter Tankwand wieder. Die entsprechenden Meßwerte bei ungekühlter Tankwand können den Bildern 19 bis 21 entnommen werden. Wie der Vergleich mit dem nach Gleichung (1) berechneten Verlauf der örtlichen Bestrahlungsstärke, der in diesen Bildern jeweils als ausgezogene Kurve mit eingezeichnet ist, zeigt, ordnen sich die bei vollem Tank gemessenen Werte gut in den theoretisch gegebenen Zusammenhang ein. Wie schon in Abschnitt 3.2 wurde dabei für die Berechnung das Emissionsvermögen der Flamme zu 0,9, die Temperatur der Flamme zu 900°C und die für die Ermittlung der Winkelverhältnisse erforderliche Flammenlänge, auf den Tankdurchmesser bezogen, zu

$l/d=1,5$ angenommen. Auch dieser Berechnung liegt nur die Flammenstrahlung zugrunde, d.h. die von der Tankwand emittierte Wärmestrahlung wurde aus dem in Abschnitt 3.2 angegebenen Grund ebenfalls nicht mit einbezogen.

Aus den Bildern 10 bis 21 kann weiterhin ersehen werden, wie mit fallendem Flüssigkeitsspiegel die Bestrahlungsstärken abnehmen, was darauf zurückzuführen ist, daß sich, wie Untersuchungen gezeigt haben [14, 18], die Flamme mit sinkendem Flüssigkeitsspiegel ins Innere des Tanks verlagert.

Welchen Einfluß die Kühlung der Tankwand auf die emittierten Wärmeströme bzw. auf die Bestrahlungsstärken ausübt, wird durch einen Vergleich zwischen den Bildern 10 bis 12 und den entsprechenden Bildern 13 bis 15 bzw. zwischen den Bildern 16 bis 18 und den entsprechenden Bildern 19 bis 21 deutlich. Es zeigt sich, daß die mit sinkendem Flüssigkeitsspiegel infolge der sich ins Tankinnere verlagernden Flamme nachlassende Flammenstrahlung durch die Wärmestrahlung der ungekühlten Tankwand oberhalb des Flüssigkeitsspiegels kompensiert wird. Dies wird besonders aus den Bildern 13 bis 15 ersichtlich, in denen jeweils zusätzlich der nach Gleichung (1) berechnete Verlauf der auf die Wärmestrahlung der Tankwand zurückzuführenden örtlichen Bestrahlungsstärke in Tankhöhe über dem auf den Tankdurchmesser bezogenen Abstand a als gestrichelte Kurve eingezeichnet ist. Wie man sieht, entspricht an einem bestimmten Ort die Differenz der ohne und mit Kühlung der Tankwand bei einer Füllhöhe im Tank von 0,2 m gemessenen Bestrahlungsstärken in etwa der Bestrahlungsstärke, die allein infolge der Wärmestrahlung der Tankwand an diesem Ort auftritt. Dabei wurde der Berechnung der auf die Wärmestrahlung der Tankwand zurückgehenden Bestrahlungsstärke ein Emissionsvermögen der Tankwand von 0,9 [2] und die bei den hier durchgeführten Brandversuchen ermittelte Tankwandtemperatur von im Durchschnitt 500°C (siehe AGF-Forschungsbericht Nr. 21 [18]) zugrundegelegt.

Für das Winkelverhältnis wurde auf den Maximalwert zurückgegriffen, der sich ergibt, wenn die Wand über ihrer gesamten Höhe von 2 m Wärmestrahlung aussendet.

4.4. Folgerungen aus den Versuchen

Wie die Versuche ergeben haben, können für den Fall des Abbrandes von im Normzustand flüssigen Brennstoffen anhand des nach Gleichung (1) mit den im Abschnitt 3.2 angenommenen Werten für das Emissionsvermögen, für die Temperatur und für die Länge der Flamme berechneten Verlaufes der örtlichen Bestrahlungsstärke sowohl die in der Umgebung eines brennenden Tanks auftretenden maximalen örtlichen Bestrahlungsstärken als auch die erforderlichen Sicherheitsabstände zwischen den brandgefährdeten Objekten bestimmt werden. Dieser theoretische Verlauf der örtlichen Bestrahlungsstärke behält auch für größere Tankdurchmesser, als sie bei diesen Untersuchungen vorlagen, bis hin zu Durchmessern realer Tanks seine Gültigkeit, da einerseits bei Flammendicken größer als 1 m das Emissionsvermögen der Flamme und auch die Flammentemperatur unabhängig vom Tankdurchmesser ihren Wert beibehalten [16, 18] und andererseits das Winkelverhältnis nur geometrisch ähnliche Größen enthält. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß sich die für die Berechnung der Winkelverhältnisse erforderliche Flammenlänge, auf den Tankdurchmesser bezogen, nur relativ wenig mit wachsendem Tankdurchmesser ändert [17].

5. ZUSAMMENFASSUNG

Leuchtende Flammen, wie sie im allgemeinen wegen der unvollständigen Verbrennung bei Bränden auftreten, können ab einer bestimmten Flammendicke als schwarze bzw. graue Körper ange-

sehen werden. Die auf ein beliebig in der Umgebung eines brennenden Objektes befindliches Flächenelement infolge der Wärmestrahlung der Flamme einwirkende Bestrahlungsstärke kann daher nach einer auf dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz beruhenden Beziehung berechnet werden. Für zwei typische Brandfälle, Brand in einem Gebäude und Brand eines Lagertanks für brennbare Flüssigkeiten, wird dargelegt, wie man mit dieser Gesetzmäßigkeit, sofern die kritische Bestrahlungsstärke für den bestrahlten Stoff bekannt ist, anhand von Diagrammen den erforderlichen Abstand zwischen dem brennenden und dem gefährdeten Objekt bestimmen kann, um eine Entzündung zu vermeiden.

Um zu klären, inwieweit diese Beziehung die bei realen Tankbränden in der Umgebung auftretenden Bestrahlungsstärken wiedergibt, wurden Brandversuche an drei Modelltanks mit Durchmessern von 1,28 m, 1,6 m und 2,0 m und mit einer für alle Tanks gleichen Höhe von 2,0 m durchgeführt. Die Tankwandungen konnten mit Wasser gekühlt werden. Als Brennstoff diente Gasöl III, das unter Tankbrandbedingungen eine stark leuchtende Flamme aufweist. Es wurden bei drei unterschiedlichen Füllhöhen im Tank die Bestrahlungsstärke in verschiedenen Raumpunkten senkrecht und parallel zur Tankachse mit Strahlungssonden gemessen und außerdem die Flammenlänge fotografisch bestimmt.

Wie der Vergleich zeigte, stimmen die gemessenen Bestrahlungsstärken gut mit den theoretisch ermittelten Werten überein. Aufgrund der Versuche, bei denen die Tankwände mit Wasser gekühlt wurden, konnte weiterhin der Anteil der Wärmestrahlung der Tankwand an den gesamt übertragenen Wärmeströmen eindeutig festgestellt werden.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang.
2. Auflage.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1974.

- [2] Pepperhoff, W.:
Temperaturstrahlung.
Darmstadt: Verlag Dr. D. Steinkopff 1956.

- [3] McGuire, J.H.:
Heat transfer by radiation.
Fire Research Special Report Nr. 2
London: H.M. Stationery Office 1953.

- [4] Nelson, H.E.:
Radiant energy transfer in fire production engineering
problem solving.
Fire Technology 4 (1968), Nr. 3, S. 196-205.

- [5] Virtala, V. und Toivonen, U.:
Baudichte und Brandsicherheit.
VFDB-Zeitschrift 3 (1954), Nr. 4, S. 127-136.

- [6] Blinov, V.I. und Chudjakov, G.N.:
Über einige Gesetzmäßigkeiten der Diffusionsverbrennung
von Flüssigkeiten.
Doklady Akademii Nauk SSSR, Band 113,
Nr. 5 (1957), S. 1094-1097 (Orig. russ.).

- [7] Thomas, P.H.:
Some studies of models in fire research.
In: 1. Internationales Brandschutz-Seminar der VFDB.
VFDB-Zeitschrift 9 (1960), Sonderheft Nr. 3, S. 96-101.

- [8] Thomas, P.H.:
The size of flames from natural fires.
In: Ninth Symposium (International) on Combustion.
New York, London: Academic Press 1963. S. 844-858.
- [9] Sunavala, P.D.:
Dynamics of the buoyant diffusion flame.
Journal of the Institute of Fuel
40 (1967), S. 492-497.
- [10] Steward, F.R.:
Linear flame heights for various fuels.
Combustion and Flame 8 (1964), S. 171-178.
- [11] Hess, K.:
Flammenlänge und Flammenstabilität.
Karlsruhe, Technische Hochschule, Dr.-Ing. Dissertation
1964.
- [12] Kremer, H.:
Die Ausbreitung inhomogener turbulenter Freistrahlen
und turbulenter Diffusionsflammen.
Karlsruhe, Technische Hochschule, Dr.-Ing. Dissertation
1964.
- [13] Putnam, A.A. and Speich, C.F.:
A model study of the interaction of multiple turbulent
diffusion flames.
In: Ninth Symposium (International) on Combustion.
New York, London: Academic Press 1963. S. 867-877.
- [14] Seeger, P.G. und Werthenbach, H.G.:
Diffusionsflammen mit extrem niedriger Strömungs-
geschwindigkeit.
Chemie-Ingenieur-Technik 42 (1970), Nr. 5, S. 282-286.

- [15] Hottel, H.C.:
Certain laws governing diffusive burning of liquids.
Fire Research Abstracts and Reviews 1 (1958/59),
Nr. 2, S. 41-44.

- [16] Atallah, S. and Allan, D.S.:
Safe separation distances from liquid fuel fires.
Fire Technology 7 (1971), Nr. 1, S. 47-56.

- [17] Werthenbach, H.G.:
Flammenlänge bei Bränden von Flüssigkeitsbehältern.
Verfahrenstechnik 5 (1971), Nr. 3, S. 115-118.

- [18] Werthenbach, H.G.:
Brände von Erdölprodukten in Tanks - Versuche und
Rechenmodell.
Forschungsbericht Nr. 21 der Arbeitsgemeinschaft
Feuerschutz (AGF), 1971.

Tabelle 1. Kritische Bestrahlungsstärken für verschiedene Stoffe nach [4]

Stoffe	Bestrahlungsstärke in W/cm^2	
	Selbstentzündung	Fremdzündung
Ungestrichenes dunkles Holz(ofentrocken)	3,4	1,3
Gestrichenes Holz (trocken)		1,7-2,5
Sperrholz		1,7
Ungestrichene poröse Holzfaserplatte	2,5	1,1
Ungestrichene harte Holzfaserplatte		1,3
Duroplastischer Kunststoff	8,4	
Textilien (allgemein)	3,4	
Baumwollgewebe	2,4	1,3
Einwirkung auf die menschliche Haut	Bestrahlungsstärke in W/cm^2	
Maximale Bestrahlungsstärke bei unbestimmter Bestrahlungsdauer	0,13 [*]	
Schmerz nach 10-20 s	0,4	
Schmerz nach 3 s	1,05	
Blasen nach 10-12 s	1,05	

* entspricht 1 Solarkonstante

Tabelle 2. Kenngrößen des verwendeten Brennstoffes
(Mittelwerte aus zwei Lieferungen)

Bezeichnung	Gasöl III
Dichte bei 15 °C in g/cm ³	0,842
Flammpunkt in °C	65
unterer Heizwert (errechnet) in kJ/kg	42 945
Destillationsprobe nach ASTM: abdestillierter Anteil in Vol.-% bei einer Temperatur in °C von	
5	208
10	229
20	256
30	276
40	290
50	302
60	313
70	324
80	334
90	346
95	356
Siedebeginn in °C	167
Siedeende in °C	367
Rückstand in Vol.-%	1,5

Tabelle 3. Tankdurchmesser, Füllhöhe, Branddauer und auf den Tankdurchmesser bezogene Flammenlänge bei den einzelnen Versuchen

Versuch Nr.	Tank- durch- messer in cm	Wasser- kühlung	Füllhöhe		Brand- dauer in min	Auf den Tankdurch- messer bezogene Flammenlänge
			Beginn in cm	Ende in cm		
1	128	ja	191,0	151,0	199,0	1,2
2	128	ja	191,0	171,5	95,0	1,1
3	128	ja	104,5	92,0	101,5	1,2
4	128	ja	112,0	98,0	94,0	1,1
5	128	ja	24,5	15,5	88,0	1,0
6	128	ja	26,0	17,5	82,0	1,0
7	128	nein	189,5	166,0	108,0	1,3
8	128	nein	189,0	167,0	90,0	1,4
9	128	nein	106,0	92,0	110,0	1,3
10	128	nein	104,0	88,5	105,5	1,3
11	128	nein	27,5	17,5	103,5	1,2
12	128	nein	25,5	17,0	105,5	*
13	160	ja	190,0	172,5	93,0	0,9
14	160	ja	189,5	168,0	98,0	1,1
15	160	ja	105,0	90,5	109,5	*
16	160	ja	105,0	85,5	121,0	1,2
17	160	ja	25,5	14,5	108,0	*
18	160	ja	25,0	14,5	107,5	0,8
19	160	nein	191,0	165,0	117,0	*
20	160	nein	184,5	155,5	114,0	1,1
21	160	nein	108,5	89,0	106,0	1,0
22	160	nein	108,5	92,0	100,0	1,2
23	160	nein	22,5	12,0	95,0	1,4
24	160	nein	25,0	10,5	113,0	1,4
25	200	ja	189,5	170,5	83,0	0,9
26	200	ja	105,0	86,5	91,0	1,0
27	200	ja	30,5	18,5	75,0	1,1
28	200	nein	186,6	156,0	130,0	1,3
29	200	nein	106,5	89,0	97,0	1,1
30	200	nein	27,0	12,0	91,0	1,0

* wegen zu großem Windeinfluß nicht bestimmbar

- Bild 1. Erforderliche Sicherheitsabstände in Abhängigkeit von der Fassadenlänge für zwei verschiedene Fensterflächenanteile mit der Gebäudehöhe als Parameter
- Bild 2. Erforderliche Sicherheitsabstände in Abhängigkeit von dem Fensterflächenanteil für zwei verschiedene Gebäudehöhen mit der Fassadenlänge als Parameter
- Bild 3. Substitution des Flammen- und Tankzylinders durch eine Rechteckfläche zur Bestimmung der Winkelverhältnisse zwischen der Flamme bzw. der Tankwand und einem der Flammen- bzw. Tankachse parallelen Flächenelement
- Bild 4. Verlauf der Winkelverhältnisse zwischen der Flamme und einem parallel zur Flammenachse in Tankhöhe liegenden Flächenelement über dem auf den Tankdurchmesser bezogenen Abstand für verschiedene Flammenlängen
- Bild 5. Verlauf der Winkelverhältnisse zwischen der Flamme und einem parallel zur Flammenachse liegenden Flächenelement über dem auf den Tankdurchmesser bezogenen Abstand für zwei verschiedene Lagen dieses Flächenelementes bezüglich der Tanköffnung
- Bild 6. Bestimmung der maximalen Bestrahlungsstärke bei gegebenem Tankdurchmesser und gegebenem Abstand zwischen brennendem Tank und bestrahltem Flächenelement (Fall 1) bzw. Bestimmung des erforderlichen Sicherheitsabstandes bei gegebenem Tankdurchmesser und vorgegebener kritischer Bestrahlungsstärke (Fall 2)

- Bild 7. Schema der Versuchseinrichtung
- Bild 8. Gesamtansicht der Versuchsanlage mit Modell-tank, Meßwagen und Meßstab
- Bild 9. Erscheinungsbild der Flamme. Tankdurchmesser 1,28 m
- Bild 10 bis 12. Bestrahlungsstärken in Tankhöhe senkrecht zur Tankachse in Abhängigkeit von dem auf den Tankdurchmesser bezogenen Abstand bei gekühlter Tankwand.
Tankdurchmesser 1,28 m, 1,6 m, 2,0 m
- Bild 13 bis 15. Bestrahlungsstärken in Tankhöhe senkrecht zur Tankachse in Abhängigkeit von dem auf den Tankdurchmesser bezogenen Abstand bei ungekühlter Tankwand.
Tankdurchmesser 1,28 m, 1,6 m, 2,0 m
- Bild 16 bis 18. Bestrahlungsstärken im Abstand von 3 m von der Tankachse in Abhängigkeit von der auf den Tankdurchmesser bezogenen Höhe über der Tanköffnung bei gekühlter Tankwand.
Tankdurchmesser 1,28 m, 1,6 m, 2,0 m
- Bild 19 bis 21. Bestrahlungsstärken im Abstand von 3 m von der Tankachse in Abhängigkeit von der auf den Tankdurchmesser bezogenen Höhe über der Tanköffnung bei ungekühlter Tankwand.
Tankdurchmesser 1,28 m, 1,6 m, 2,0 m

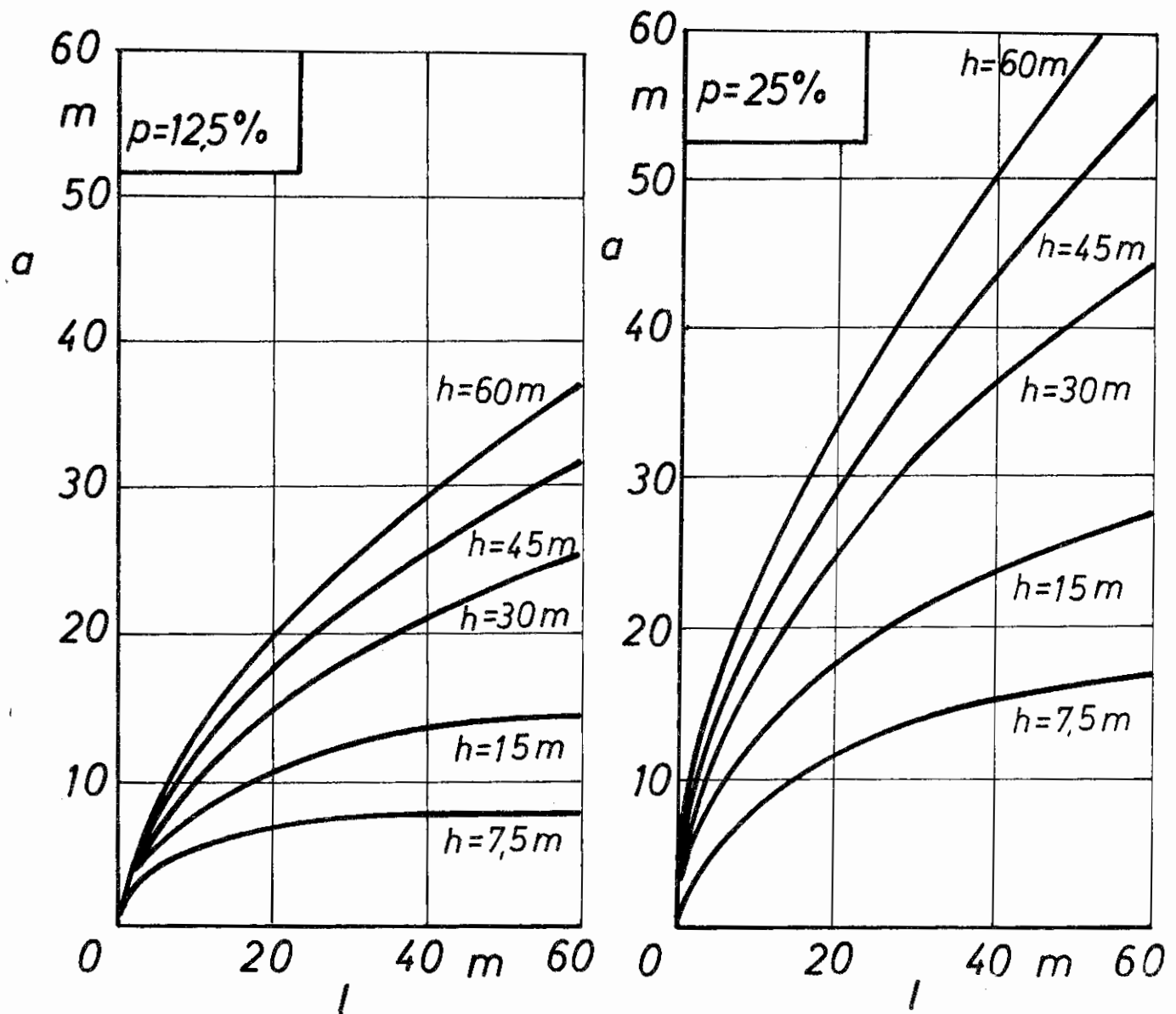


Bild 1

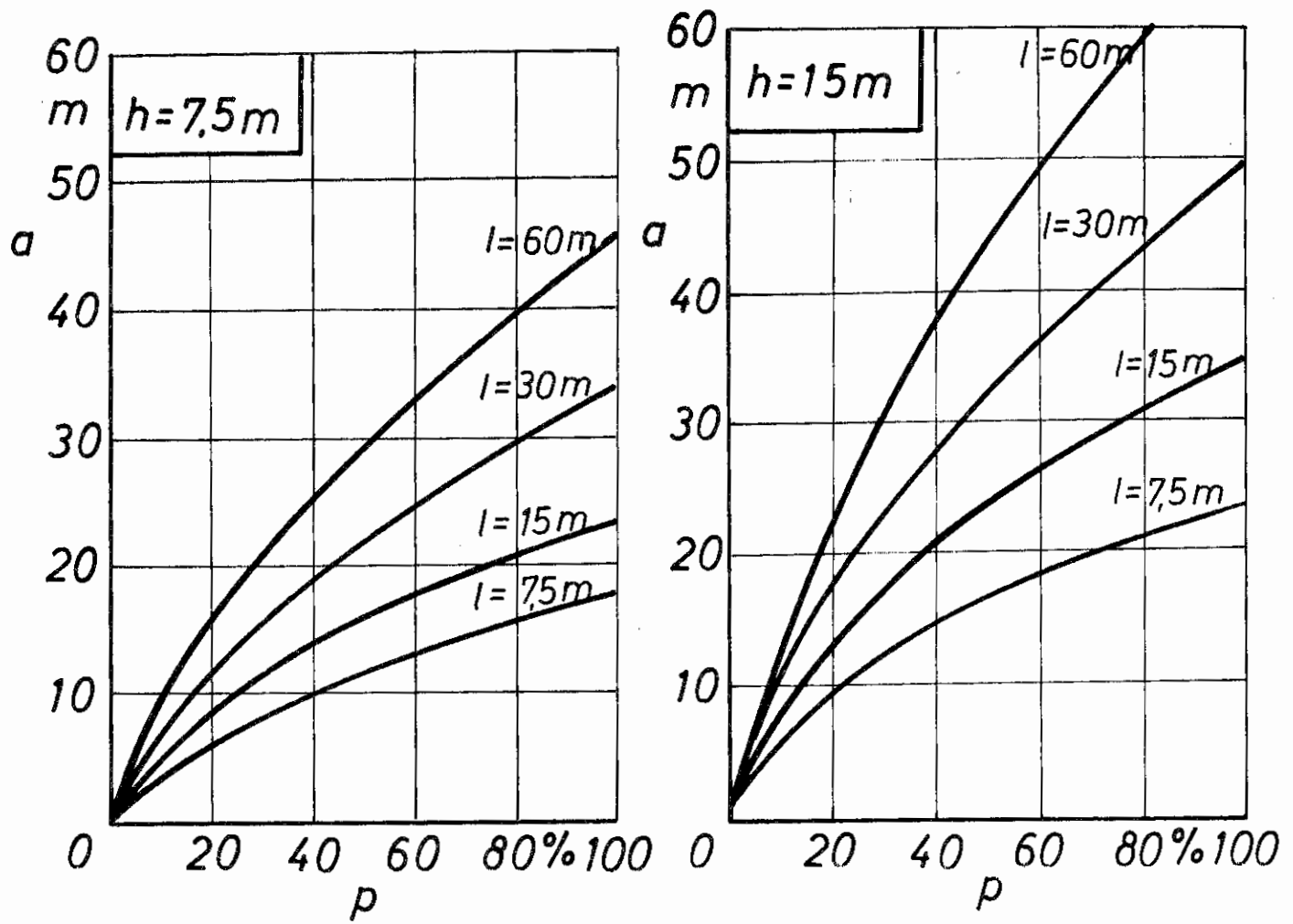


Bild 2

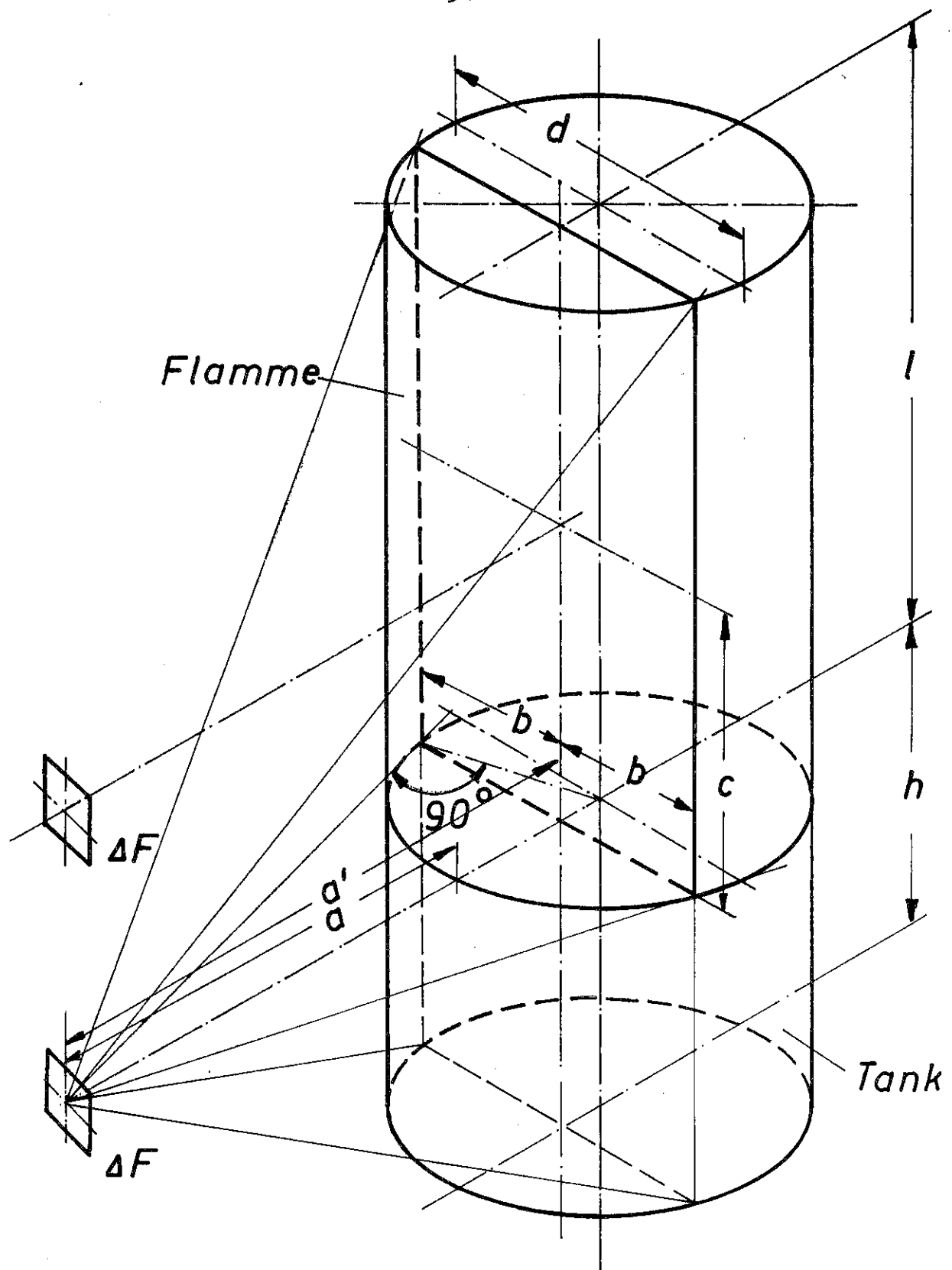
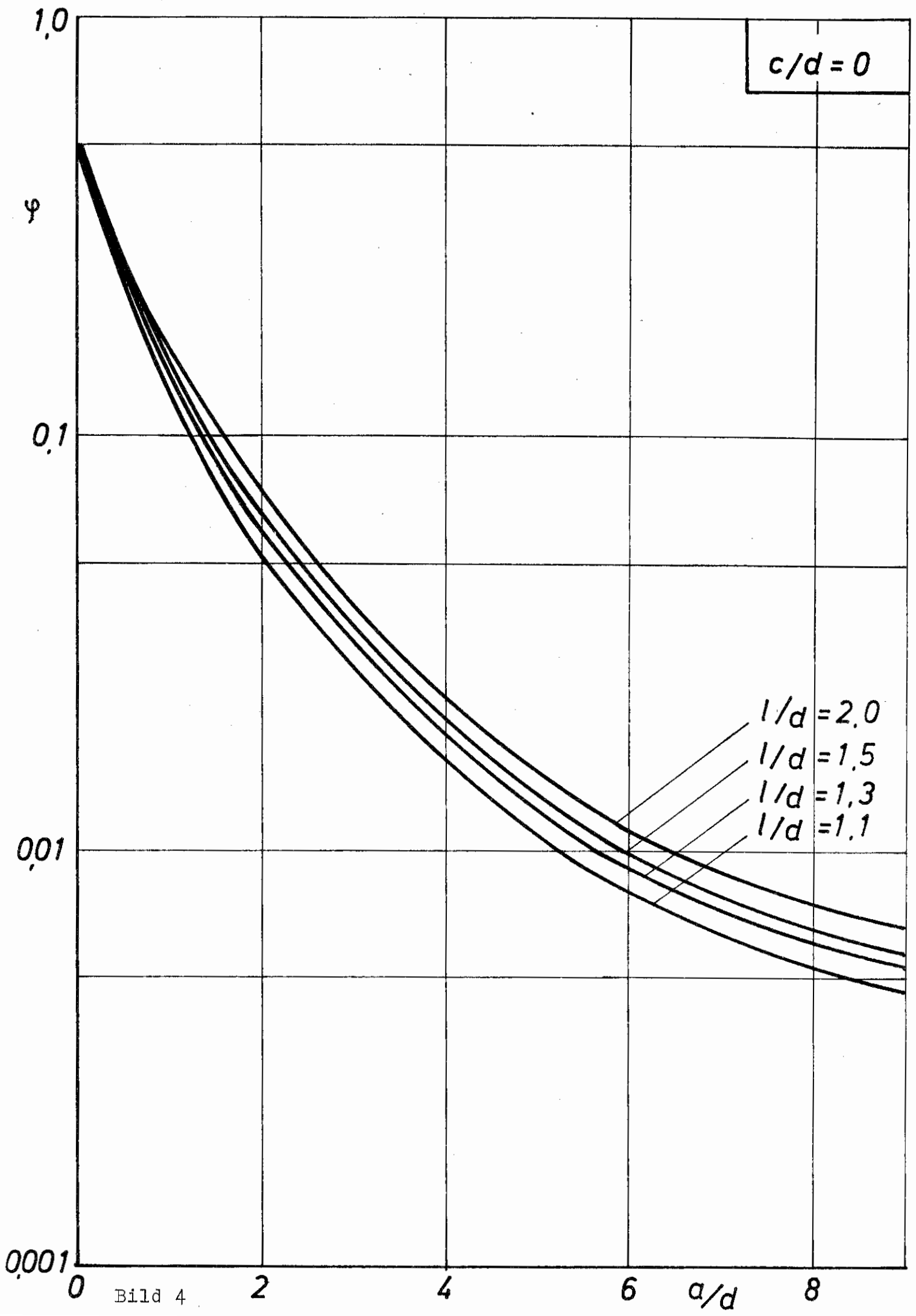
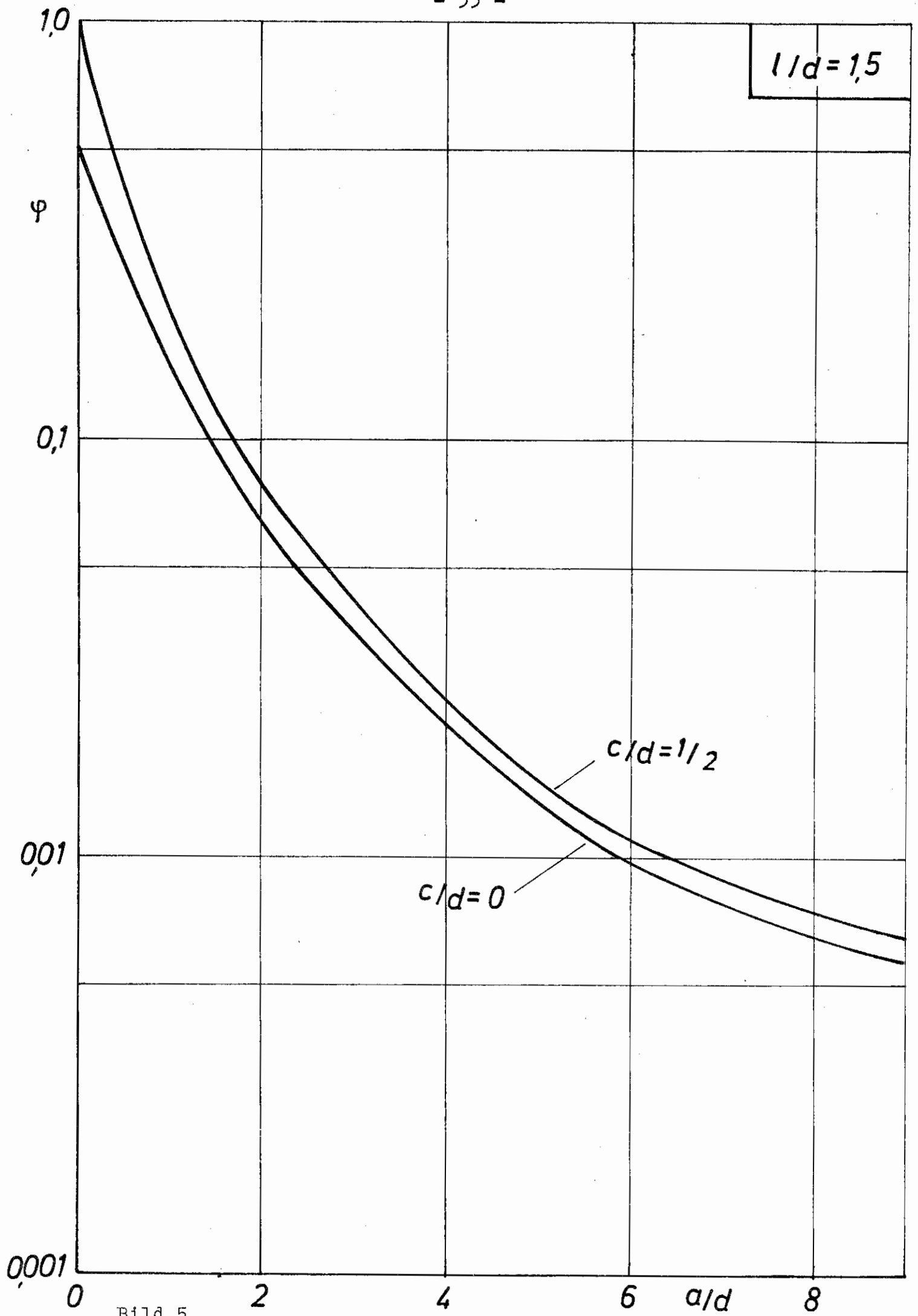
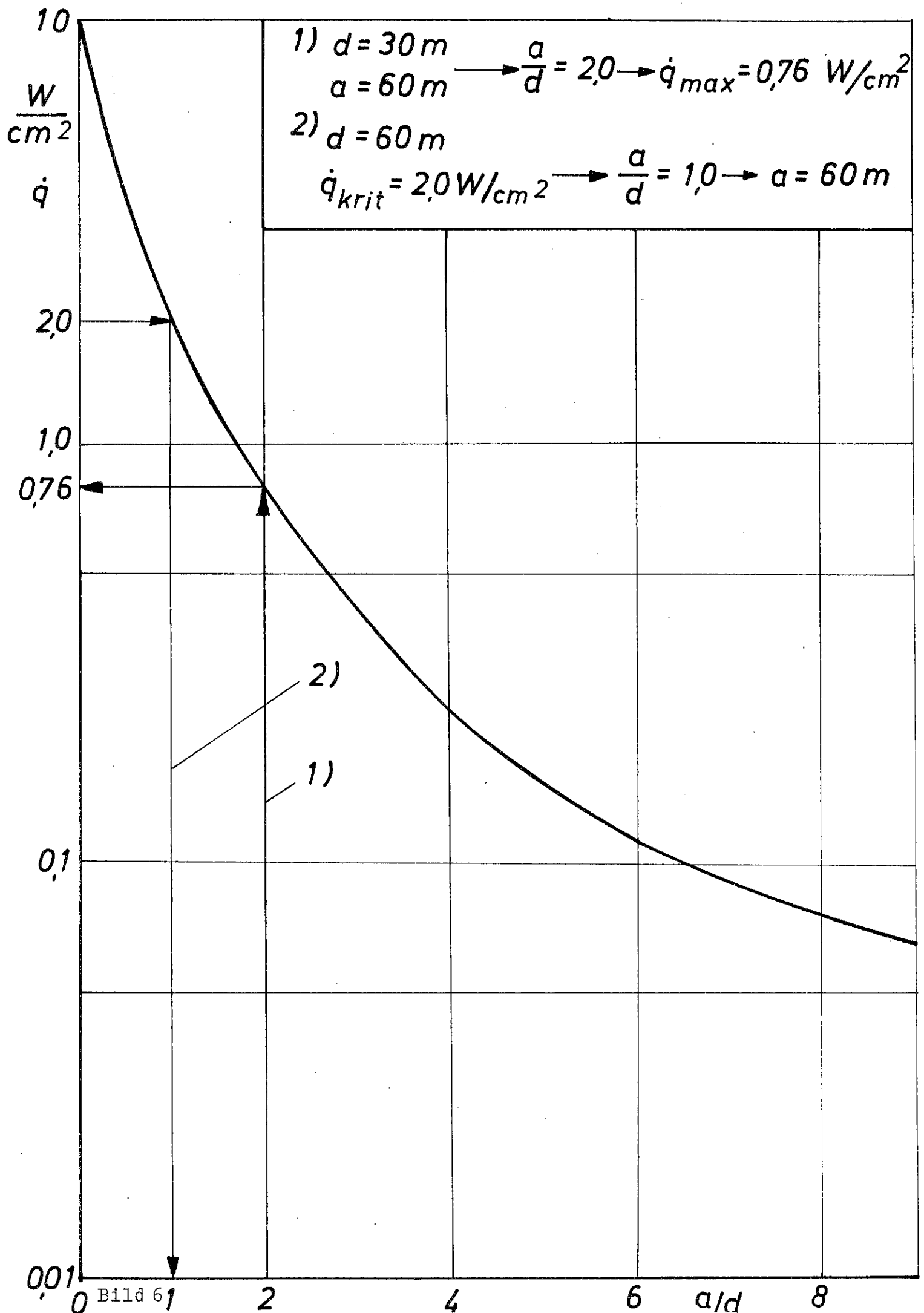


Bild 3







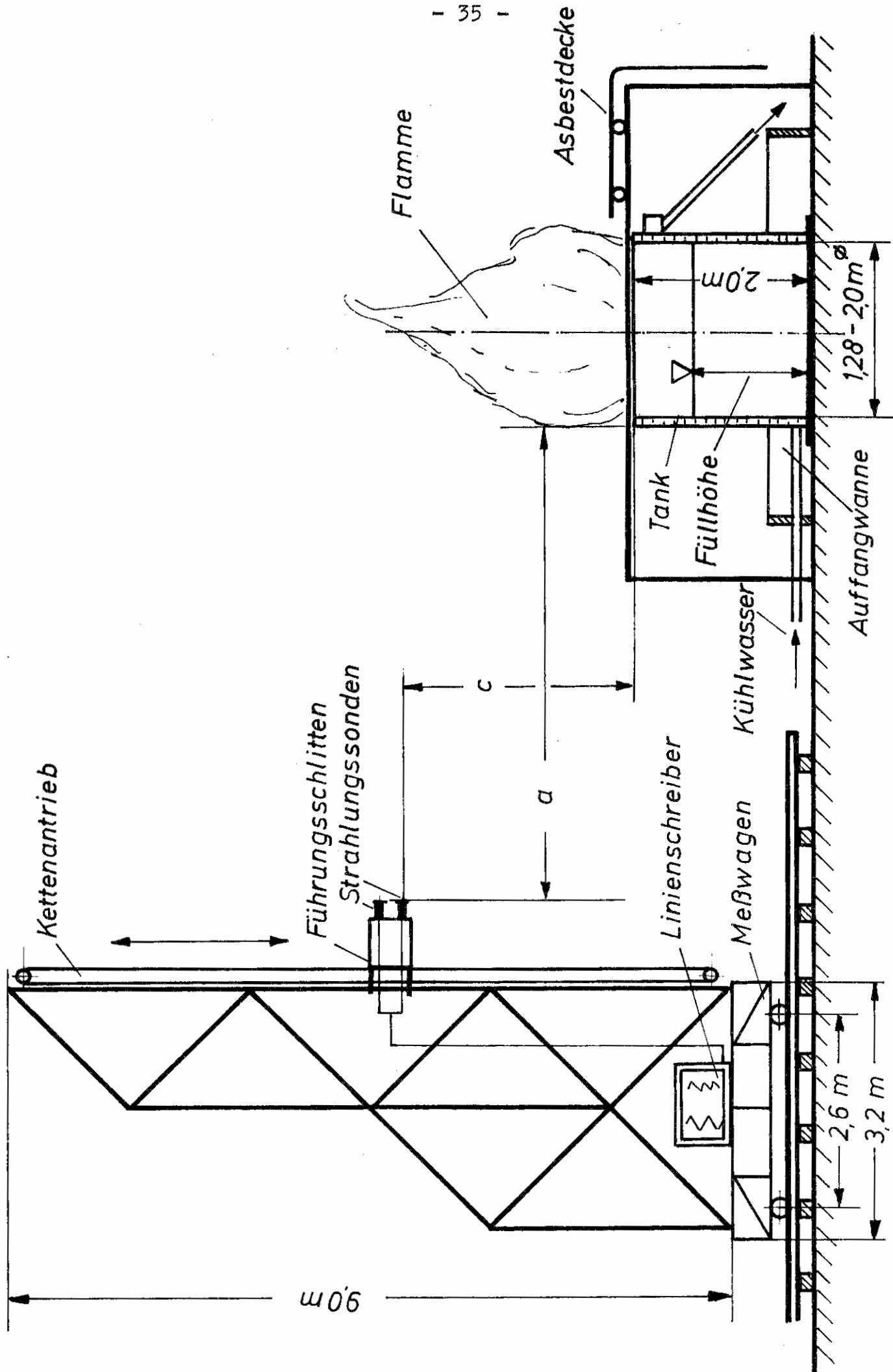


Bild 7

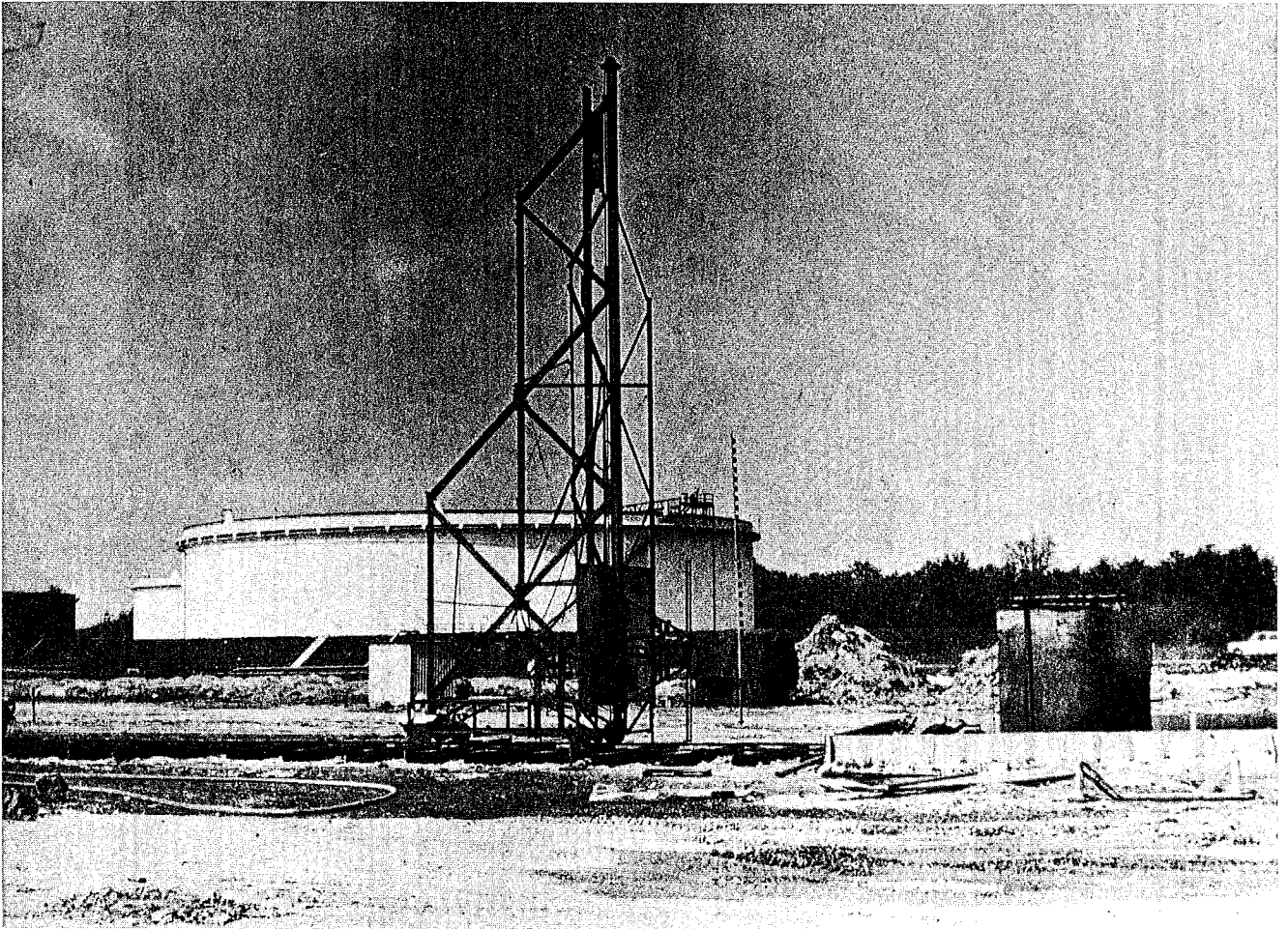
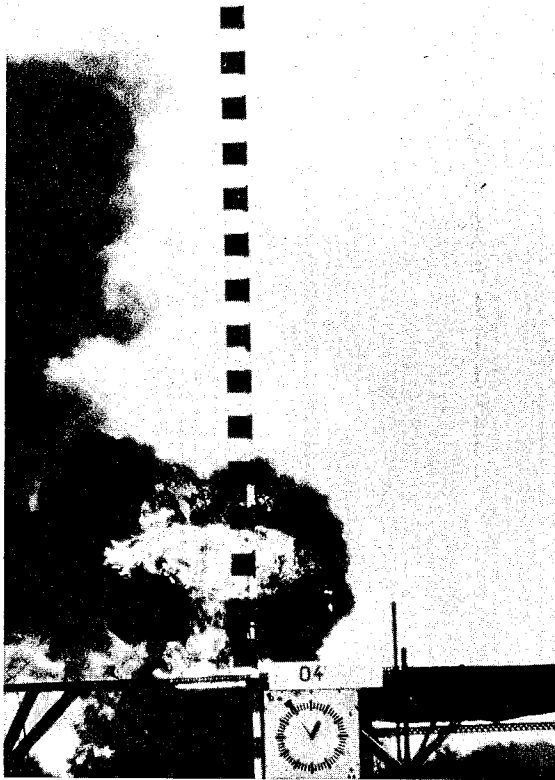


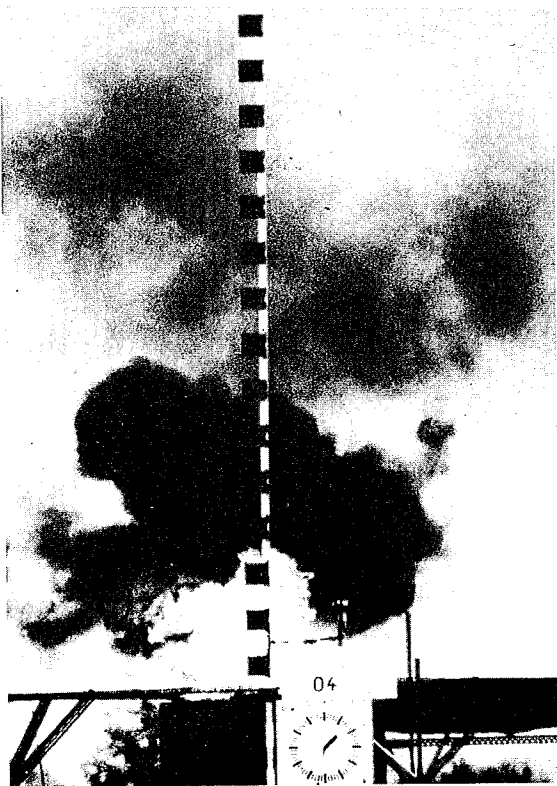
Bild 8



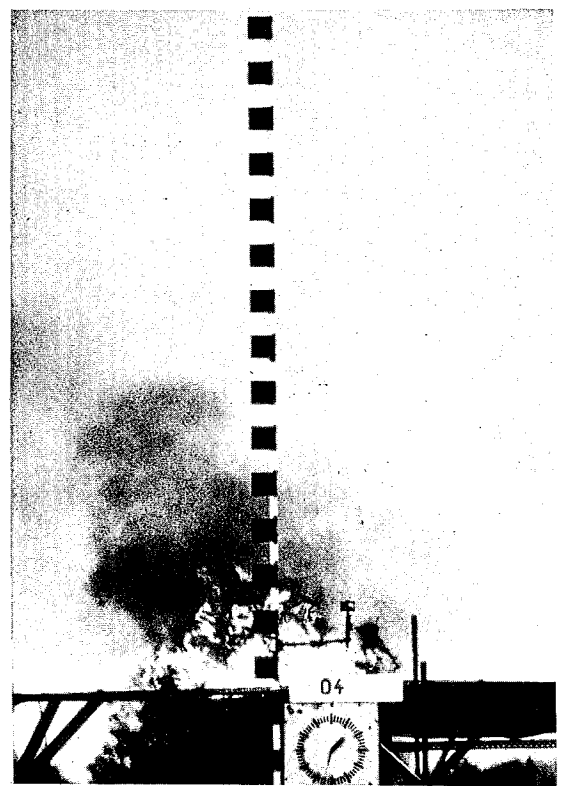
Versuch Nr.4
Versuchsdauer
seit Zündung 54,5 Minuten



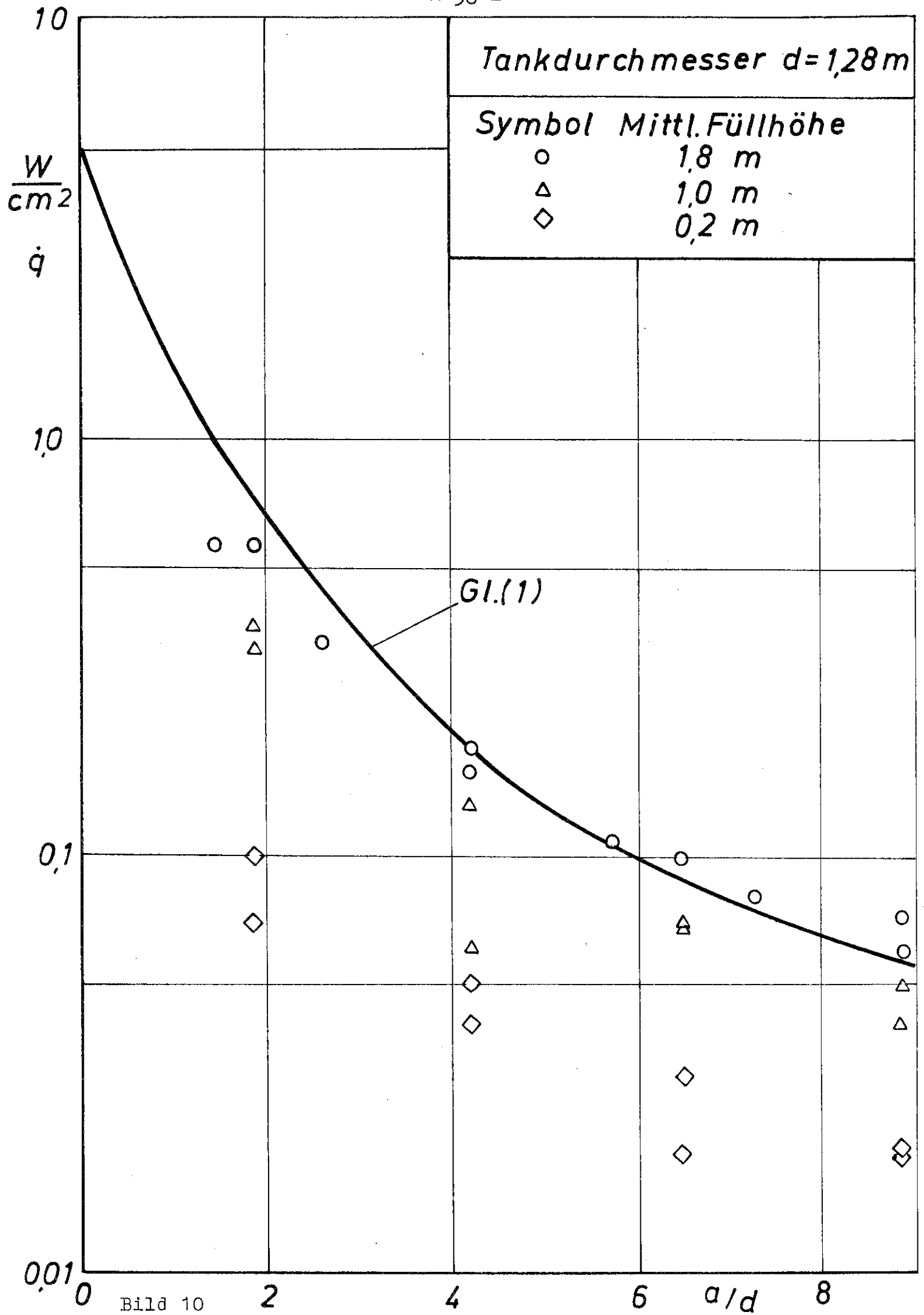
Versuch Nr.4
Versuchsdauer
seit Zündung 55,0 Minuten

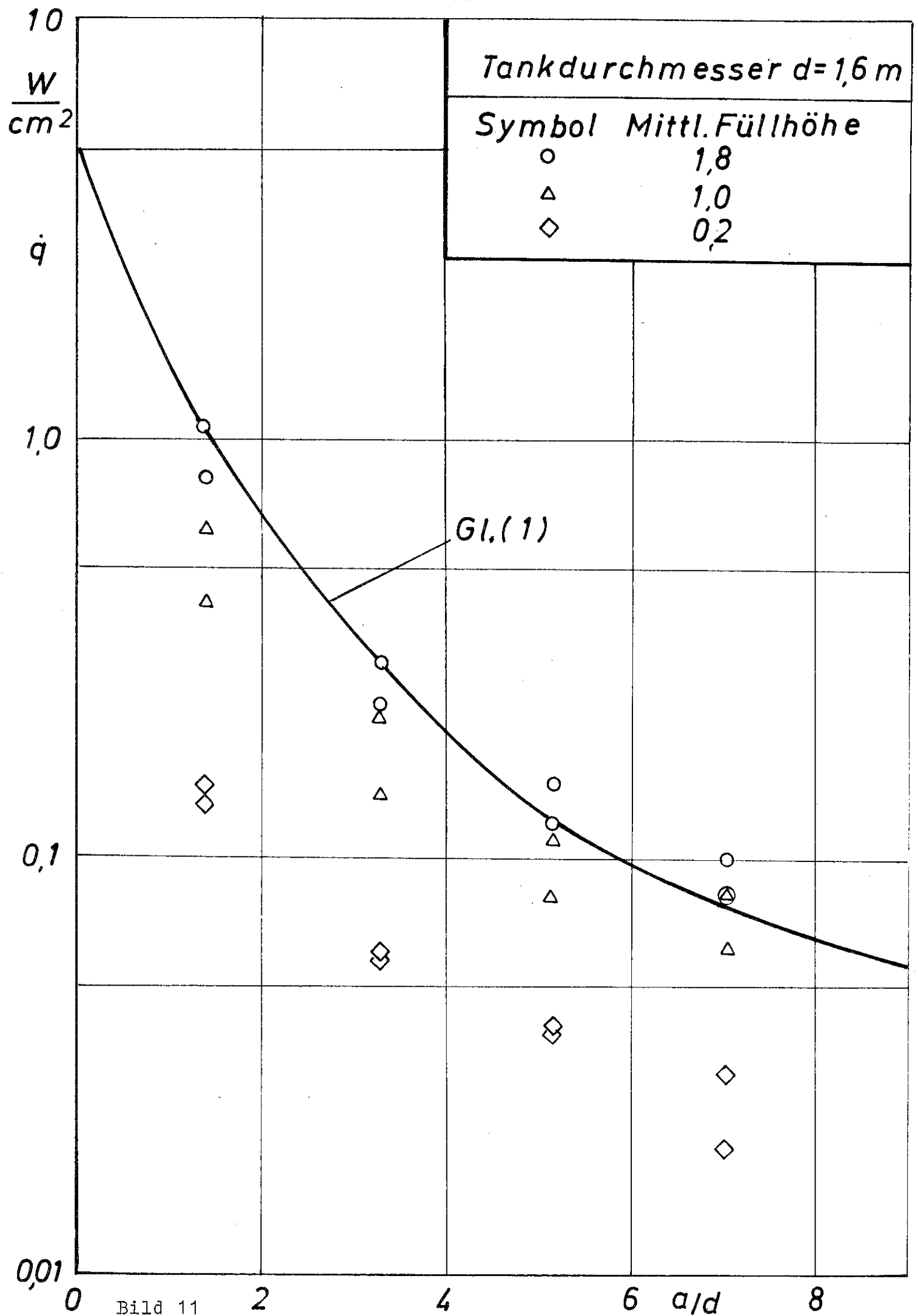


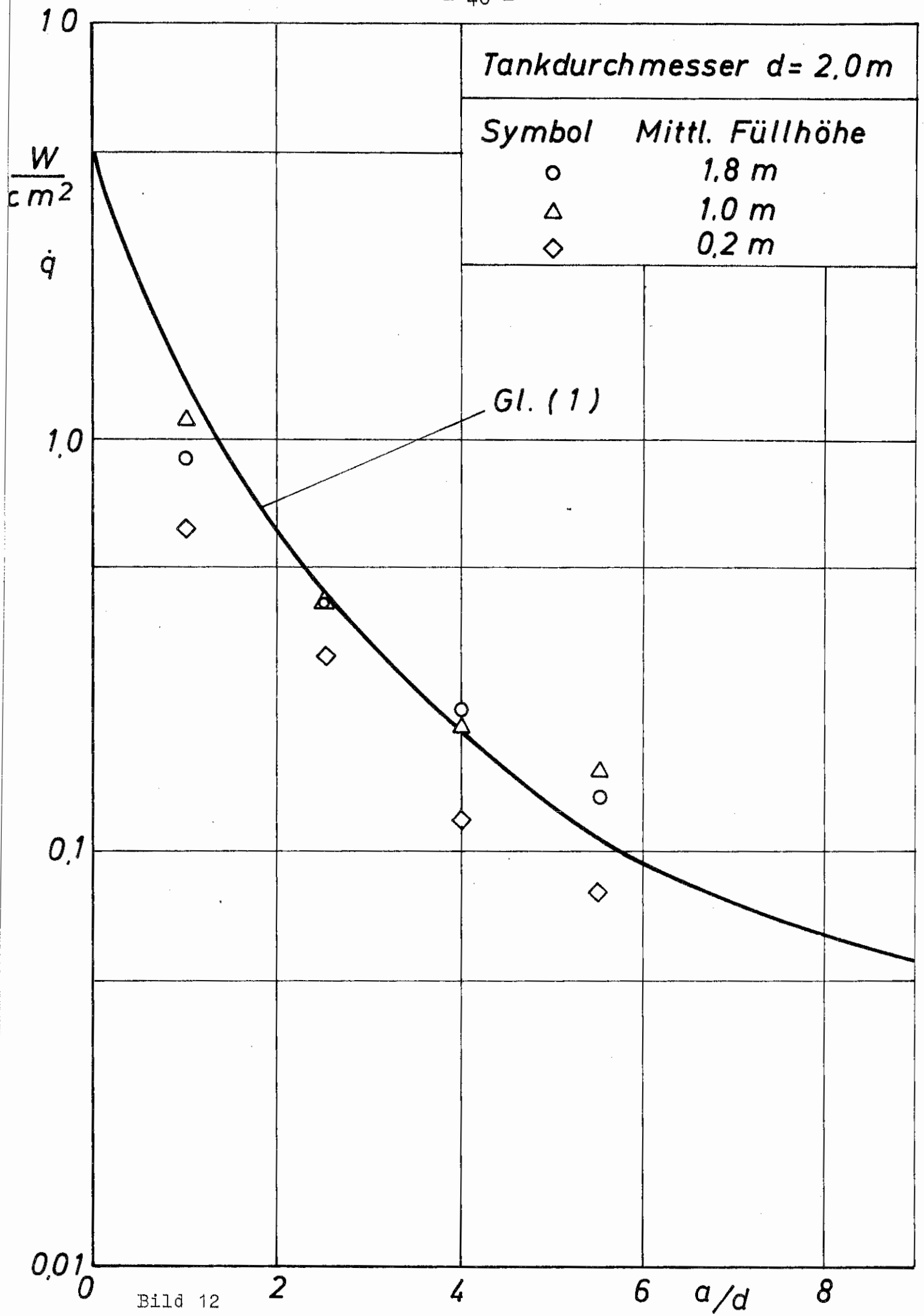
Versuch Nr.4
Versuchsdauer
seit Zündung 91,5 Minuten

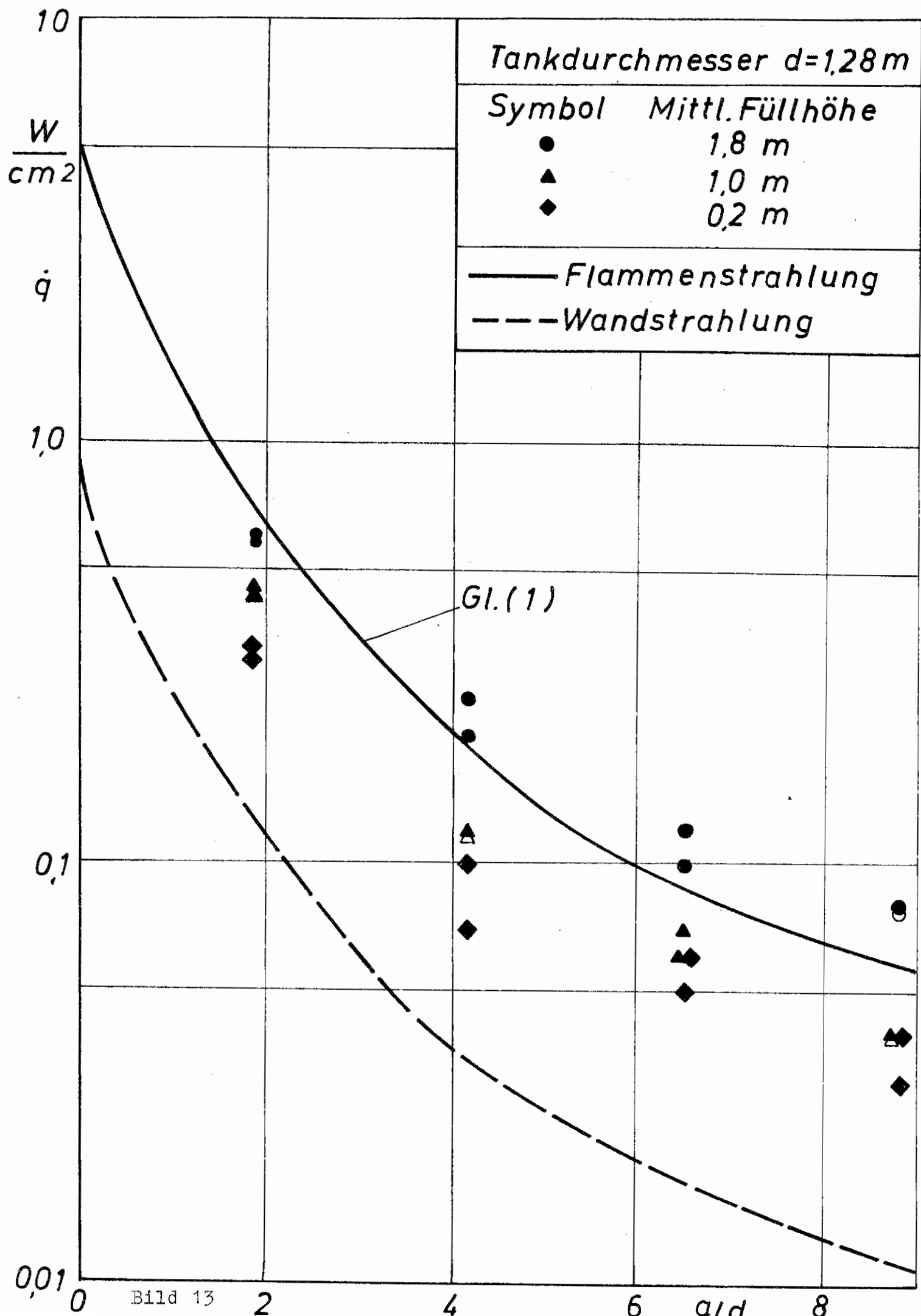


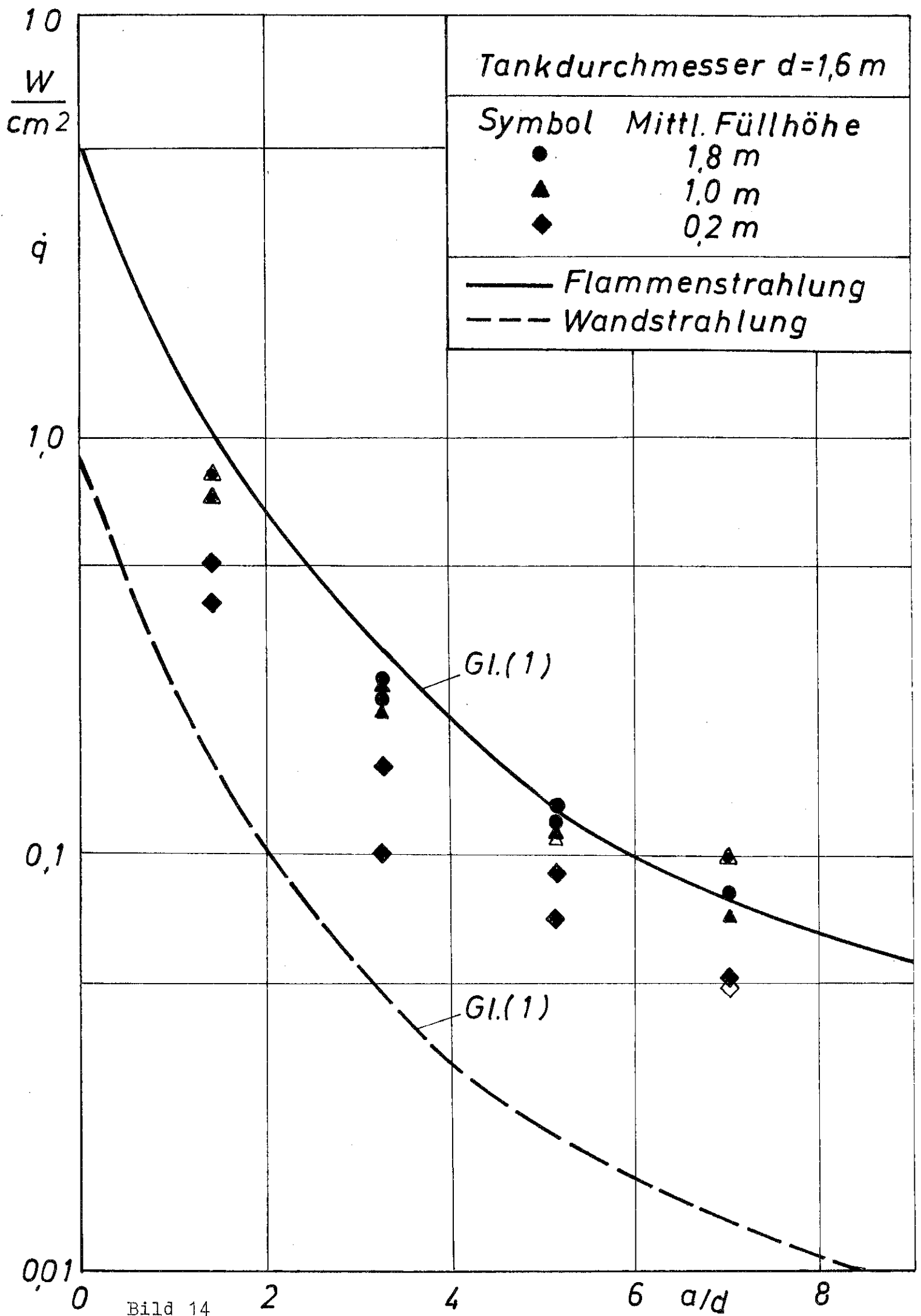
Versuch Nr.4
Versuchsdauer
seit Zündung 92,0 Minuten

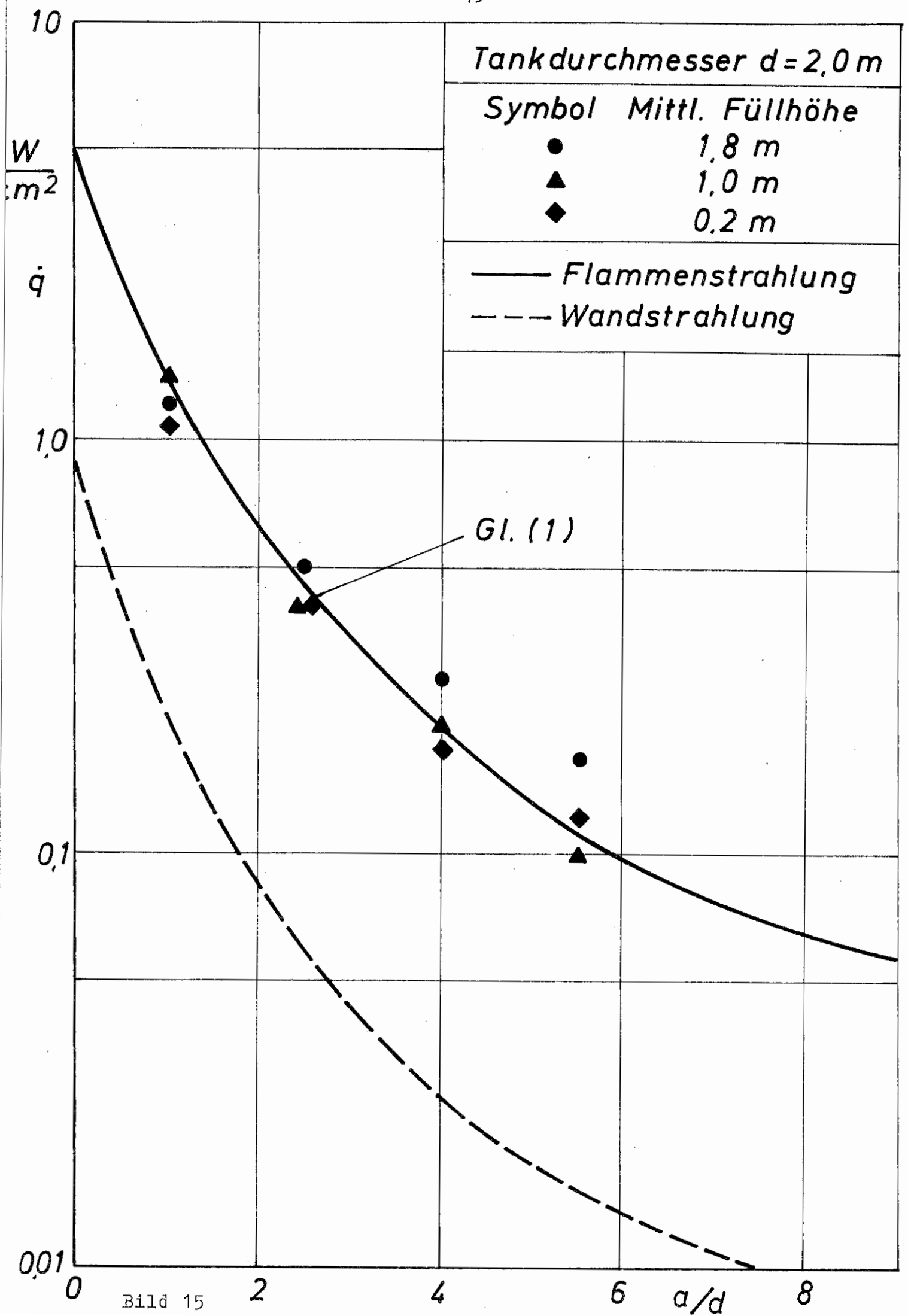












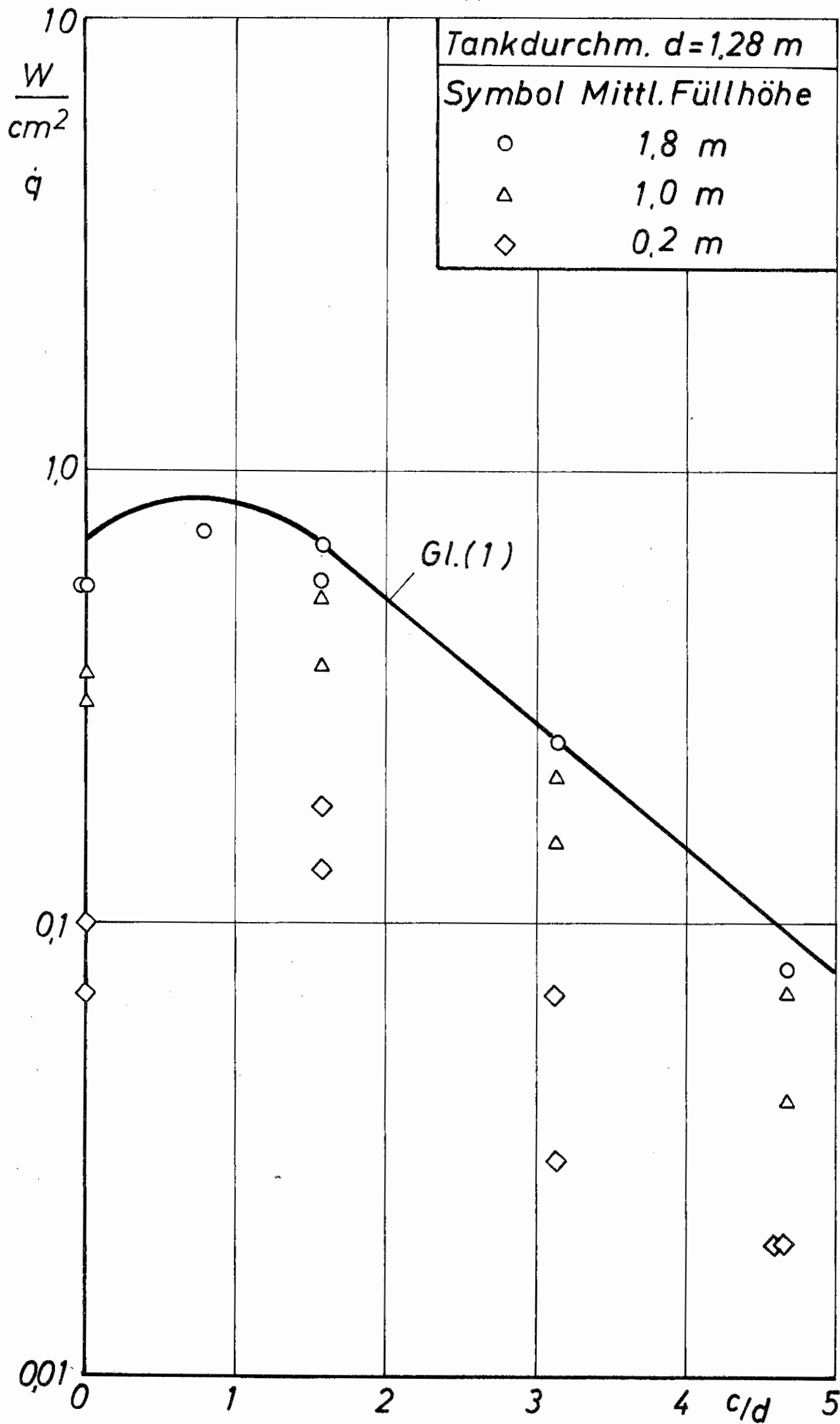


Bild 16

