

# **BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG**

**DER BUNDESLÄNDER**

**BERICHTE**

Modellbrandversuche zur Bestimmung des  
Brandablaufes von Feststoffbränden.

# **38**

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

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

Forschungsbericht Nr. 38

Modellbrandversuche zur Bestimmung des  
Brandablaufes von Feststoffbränden.

von

Dipl.-Ing. Dieter Brein

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe  
Juni 1979

FA. Nr. 75 ( 4/76 )

# INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. VERSUCHSPROGRAMM	2
3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSVERFAHREN	4
3.1. Versuchsaufbau	4
3.2. Messverfahren	5
3.2.1. Massenverlust	5
3.2.2. Geschwindigkeit der Flammenfrontausbreitung	6
3.2.3. Gasgeschwindigkeit	7
3.2.4. Dicke der Flammenzone	9
4. MODELL DER FLAMMENFRONTAUSBREITUNG	10
4.1. Beziehung zwischen Massenverlust und Ausbreitung der Flammenzone	11
4.1.1. Konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenzone	12
4.1.1.1. Länge der Flammenfront	13
4.1.1.2. Abnahme der Krippengrundfläche	14
4.1.1.3. Dauer des Abbrandes	15
4.1.1.4. Verlauf der Restmasse $R(x)$	16
4.1.2. Veränderliche Geschwindigkeit der Flammenfront	18
4.1.3. Dicke der Flammenzone	19
4.1.4. Massenverlust innerhalb der Flammenzone	20
4.1.5. Geschwindigkeit der Zersetzungsgase	21
4.1.6. Geschwindigkeit des Abgases	21
5. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION	22
5.1. Temperaturmessungen	22
5.2. Gasgeschwindigkeit	24
5.2.1. Meßergebnisse der Flammengase	24
5.2.2. Zersetzungsgasgeschwindigkeit	25
5.3. Vergleich des Modells zur Flammenfrontausbreitung mit Messungen	27
5.3.2. Messungen	27
5.3.3. Vergleich der gemessenen Massenverluste mit dem aus dem Modell bestimmten	29

6.	ZUSAMMENFASSUNG	31
7.	FORMELZEICHEN	32
8.	LITERATURVERZEICHNIS	34
9.	TABELLEN UND BILDER	36
9.1.	Tabellen	36
9.2.	Bilder	45

## 1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Das Feuerrisiko, und damit auch die besonderen Gefahren für die rasche Ausbreitung eines einmal entstandenen Schadenfeuers, welche die Ansammlung brennbarer Güter in sich birgt, können nur dann realistisch abgeschätzt werden, wenn Größen wie die Brandausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit nicht nur für vorhandene Objekte, sondern auch für noch nicht vorhandene, in der Planung befindliche Objekte vorhergesagt werden können. Der Begriff "Objekt" steht hierbei allgemein für Bau- bzw. Werkstoffe und daraus hergestellte Bauteile und Konstruktionselemente unter Berücksichtigung ihrer Menge, ihrer Anordnung, ihrer gegenseitigen Zuordnung und der Eigentümlichkeit ihrer Verwendung. Damit ist bereits ein Teilbereich des vorbeugenden Brandschutzes umrissen und insbesondere die Aufgabe der Forschung innerhalb des vorbeugenden Brandschutzes aufgezeigt, nämlich, Mittel und Wege zu finden, wie das Feuerrisiko erkannt und analysiert werden kann, und wie dann planende Maßnahmen getroffen werden können, um einen nach Maßgabe der Problemstellung optimalen vorbeugenden Brandschutz zu erreichen [1].

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit der Analyse der Brandausbreitung in der als Modell häufig verwendeten Holzkrippe. Die aus gleichmäßigen Holzstäben aufgebaute Krippe hat im Brandschutzwesen sowohl als Forschungsgegenstand wie auch als Prüfobjekt für Löscheräteprüfungen allgemeine Verbreitung gefunden.

Die Untersuchungen zur Bestimmung des Brandablaufes von Feststoffbränden in der vorliegenden Arbeit setzen fort und ergänzen Arbeiten, die an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik [2 bis 4] und an einer Reihe von überwiegend ausländischen Instituten durchgeführt wurden.

Es ist das Ziel des bei der Forschungsstelle für Brandschutztechnik über mehrere Jahre laufenden Forschungsvorhabens, durch Schaffung der experimentellen und rechnerischen Voraussetzungen eine vollständige Beschreibung der Brandentwicklung und Brandausbreitung in frei brennenden Holzkrippen zu erhalten. Die bislang durchgeführten Messungen zur Unterstützung des im letzten Bericht [4] entwickelten und noch zu verifizierenden Rechenmodells werden durch die im vorliegenden Bericht wiedergegebenen Messungen und durch eine eingehende Betrachtung des Ausbreitungsmechanismus` des Brandes in der Krippe ergänzt.

## 2. VERSUCHSPROGRAMM

Das Versuchsprogramm beinhaltete die Erfassung der folgenden Meßgrößen:

- Massenverlust während der Verbrennung,
- Geschwindigkeit der Flammenfront beim Durchqueren einer mit einer kleinen Zündquelle entzündeten Krippe,
- Gasgeschwindigkeit der Flamme bzw. ihres Abgases in verschiedenen Abständen über der Krippenoberfläche,
- Temperatur der Flammengase in verschiedenen Abständen über der Krippenoberfläche.

Die Messungen wurden an einer Reihe von Holzkrippen unterschiedlicher geometrischer Abmessungen durchgeführt. Zum Aufbau der Holzkrippen wurden Stäbe quadratischen Querschnitts aus Kiefernholz mit einer Holzfeuchte zwischen 9% und 12% und einer mittleren Dichte von  $0,583 \text{ g/cm}^3 \pm 0,024 \text{ g/cm}^3$  verwendet. Es wurden Holzkrippen sowohl aus Stäben der Abmessungen 1 cm x 1 cm x 13 cm bzw. 13,5 cm und solche aus Stäben der Abmessungen 2 cm x 2 cm x 42 cm hergestellt.

Die Stababstände wurden bei den aus den dünneren Stäben hergestellten Krippen zu 1 cm, 1,5 cm und 2 cm gewählt, entsprechend einem Verhältnis des Stababstandes  $s$  zur Stabdicke  $b$  von 1 bzw. 1,5 bzw. 2.

Bei den dickeren Stäben wurden entsprechende Werte  $s/b$  von 0,5 bis 2,5 in Schritten von 0,5 verwendet. Bei allen Holzkrippen entsprach die Krippenhöhe dem 8-fachen des Stabdurchmessers, d.h., es wurden Krippen mit 8 Stablagen verwendet. Die in der Literatur allgemein zur Kennzeichnung der Geometrie einer Krippe benutzten Kurzbezeichnungen  $b$ ,  $\frac{s}{b}$ ,  $\frac{L}{b}$  wurden beibehalten.

Die Versuche wurden bei Krippen mit einer Stabdicke von 2 cm bei Lufttemperaturen zwischen 0 °C und 13 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 63% und 87% innerhalb der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik und bei Krippen mit einer Stabdicke von 1 cm in einem Kleinbrand-Labor bei einer Lufttemperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70% durchgeführt.

Aufgrund der Inhomogenität des Materials, der Anisotropie der Stoffwerte und schließlich der Streuung der Stoffwerte des Holzes, auch innerhalb einer Holzart, die aus verschiedenen Lieferungen stammt, erschien es nicht notwendig, eine möglichst hohe Genauigkeit für die Meßwerte, etwa durch Mittelwertbildung aus vielen Wiederholungsversuchen, in dem Sinne zu fordern, daß die Meßwerte absolut zuverlässig das Abbrandverhalten von aus Kiefernholzern aufgesetzten Holzkrippen mit einer bestimmten Geometrie wiedergeben; es kam vielmehr darauf an, die typische Tendenz zu ermitteln, die die Meßwerte bei den geometrischen Veränderungen des Grundmodells annehmen. Aus diesem Grunde wurde von den in der Tabelle 1 angegebenen Versuchen mit Ausnahme der Massenverlustmessungen und der Bestimmung der Geschwindigkeit der Flammenfront, die bei mehreren Wiederholungen unter gleichen Versuchsbedingungen eine gute

Reproduzierbarkeit der Messungen bestätigten, jeweils nur ein Versuch gefahren.

Einige Holzkrippen wurden an einer Ecke und einige Holzkrippen wurden in der Mitte an der Unterseite der Krippe mit einer geringen Menge Brennspritus (bis zu 5 ml), die in eine Zündwanne mit den Abmessungen 5 cm x 5 cm x 1 cm (Stabdicke 2 cm) bzw. 3 cm x 3 cm x 0,8 cm (Stabdicke 1 cm) eingefüllt wurde, entzündet. Im vorliegenden Bericht werden nur die Messungen bei Entzündung der Krippen an einer Ecke wiedergegeben. Bei der Verwendung einer solchen lokal begrenzten Zündquelle entsteht eine zylinder- bis wannenförmige Flammenfrontausbreitung mit diagonal-horizontaler Hauptrichtung des Flammenfortschritts.

Aufgrund der Ergebnisse einer früheren Arbeit [2] und aufgrund der ohnehin vorhandenen Inhomogenität des Brandstoffes wurde darauf verzichtet, die Krippenhölzer mit Holzdübeln aufeinander zu fixieren; sie wurden dagegen mit Hilfe einer Schablone exakt ausgerichtet und dann an den äußersten Kreuzungspunkten verleimt, was nicht zuletzt aus Gründen des vereinfachten Transportes in die Versuchshalle (bei den Krippen mit der Stabdicke von 2 cm) vorgenommen wurde.

### 3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSVERFAHREN

#### 3.1. Versuchsaufbau

Bei den im Labor und den in der Versuchshalle durchgeführten Versuchen wurde prinzipiell der gleiche Versuchsaufbau verwendet wie bei [2,3]. Die Krippe wird dabei auf eine elektronische Abbrandwaage gesetzt und die benötigten Meßfühler werden mithilfe von Stativen bzw. Koordinatengeräten in die jeweils erforderliche Position gebracht. Es wird außerdem dafür gesorgt, daß die Abgase frei abströmen können und daß die Verbrennungsluft, die infolge



des durch die Auftriebskräfte erzeugten Unterdrucks angesaugt wird, ungehindert zuströmen kann.

### 3.2. Messverfahren

#### 3.2.1. Massenverlust

Der Zweck dieser Messungen war der Vergleich des gemessenen Massenverlustes mit dem aufgrund des Modells über die Ausbreitung der Flammenfront (siehe Abschnitt 4) berechneten Massenverlust.

Der zeitliche Massenverlust der Holzkrippe auf der Abbrandwaage (Restmassenverlauf in %) ergibt sich dabei aus der Beziehung:

$$R(t) = 1 - M(t) / M_0 \quad (3-1)$$

Dabei erhält man  $M(t)$  direkt aus dem Ausgangssignal  $U(t)$  des an die Kraftaufnehmer der Waagekonstruktion angeschlossenen Trägerfrequenzmeßverstärkers nach Umrechnung der Ausgangsspannung mit einem Eichfaktor  $c$ :

$$M(t) = c \cdot U(t) \quad (3-2)$$

Um trotz der Streuung der Versuchsergebnisse in Bezug auf den zeitlichen Ablauf die Meßwerte geometrisch gleicher Krippen besser vergleichen zu können, wurde jeweils der zeitliche Restmassenverlauf mit dem Zeitpunkt  $t_{50}$  normiert, bei dem die Hälfte der Masse verbrannt ist, d.h. also bei  $R(t_{50}) = 50\%$ . Damit wird aus der Gleichung (3-1):

$$R(t/t_{50}) = 1 - M(t/t_{50})/M_0 \quad (3-1a)$$

### 3.2.2. Geschwindigkeit der Flammenfrontausbreitung

Um die Geschwindigkeit der Flammenfrontausbreitung innerhalb der Krippen indirekt über Temperaturmessungen bestimmen zu können, wurden Mantelthermoelemente mit der Thermopaarung Chromel/Alumel und einem Inconelmantel mit einem Durchmesser von 1,6 mm verwendet (Einsatzbereich in reduzierender Atmosphäre nach Herstellerangabe bis 1100 °C). Diese Thermoelemente wurden an ihre Position in stabilisierenden Edelstahlröhrchen geführt, die ihrerseits an einer geeigneten Stativkonstruktion befestigt waren. Damit konnte eine unerwünschte Lageänderung der Thermoelemente, die ohne diese Führung während des Versuchs aufgrund der Beschaffenheit der Thermoelemente (federnder Stahlmantel) eingetreten wäre, vermieden werden.

Die Lage der Thermoelemente innerhalb der Krippen ist in den Bildern 1a bis 1f dargestellt, und zwar für die Krippen mit 1 cm Stabdicke in den Bildern 1a bis 1c und für die Krippen mit 2 cm Stabdicke in den Bildern 1d bis 1f. Da die Krippen für diese Messungen an einer Ecke entzündet wurden, war als Hauptrichtung der Flammenausbreitung die Diagonale zur gegenüberliegenden Ecke zu erwarten. Durch die besondere Anordnung der Thermoelemente in den 3 Ebenen A, B und C (siehe Bilder 1a bis 1f) innerhalb der Krippen und in 2 Richtungen "0" und "1", nämlich in diagonaler Richtung ("0") und in Richtung der Halbdiagonalen ("1"), sollte festgestellt werden, inwieweit die Ausbreitung der realen Flammenfront dem einfachen Modell aus Abschnitt 4, nämlich zylinderförmiger Ausbreitung der Flammenfront, folgt.

Durch die Anordnung der Thermoelemente in verschiedenen Abständen vom Zündort kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit

über die einfache Beziehung

$$\bar{v}_F = \Delta x / \Delta t \quad (3-3)$$

bestimmt werden. Diese Beziehung gibt damit die jeweils mittlere Geschwindigkeit der Flammenfront zwischen zwei benachbarten, die Wegstrecke  $\Delta x$  voneinander entfernten Thermoelementen an. Die dazu gehörende Zeitdifferenz  $\Delta t$  wurde in der in Bild 2 dargestellten Weise ermittelt, indem zur Bestimmung des Zeitpunktes  $t_{BF}$  für das Eintreffen der Flammenfront an der Meßstelle diejenige Temperatur genommen wurde, bei der innerhalb des von dem Thermoelement angezeigten zeitlichen Temperaturverlaufs der stärkste Temperaturanstieg, ausgehend von der Umgebungstemperatur, erfolgt.

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_F$  der Flammenfront vom zurückgelegten Weg in der Krippe wurden die nach der Gleichung (3-3) erhaltenen Werte  $\bar{v}_F$  jeweils der Mitte zwischen den jeweiligen Meßorten zugeordnet und durch Ausgleichskurven verbunden.

### 3.2.3. Gasgeschwindigkeit

Aus der Messung des dynamischen Drucks einer Strömung und der zugehörigen Temperatur kann die Geschwindigkeit eines Fluids bestimmt werden. Die Geschwindigkeit der aus der Krippe austretenden Flammen wurde an den folgenden Meßorten bei den in der Tabelle 1 angegebenen Krippen gemessen:

In einem Abstand von 4 cm, 8 cm, 16 cm, 24 cm und 32 cm über der Krippe und bei Abständen der Flammenfront von der Zündquelle in Richtung der Diagonalen von  $\varnothing = 1/4$ ,  $1/2$  und  $3/4$ . Der Wert  $\varnothing$  bezeichnet dabei das Verhältnis des von der Flammenfront zurückgelegten Weges zu der Länge der

Diagonalen der Krippengrundfläche, deren Wert  $L \cdot \sqrt{2}$  beträgt.

Bei einer Krippe mit einer Stablänge von 42 cm entspricht damit z.B.  $\varnothing = 1/4$  einer Entfernung von ca. 15 cm vom Zündort.

Wenn man Grenzschiebteinflüsse vernachlässigt, sind nach der Potentialtheorie der dynamische Druck und die kinetische Energie der Strömung im Gleichgewicht, sodaß sich die Gasgeschwindigkeit an der Meßsonde aus der Bernoulli-Gleichung

$$p_{\text{Dyn}} - \rho_G \cdot w_G^2 / 2 = 0 \quad (3-4)$$

berechnen läßt.

Da bei den hier betrachteten Brandgasen, im Gegensatz zu isothermen Strömungen, die Temperatur des Gases einer stetigen Änderung unterliegt, muß die daraus resultierende Änderung der Gasdichte des Gasgemisches in Abhängigkeit von der Temperatur berücksichtigt werden. Unter der Annahme des idealen Gasgesetzes und konstanten Druckes gilt für das Abgas:

$$\rho_1 / \rho_0 = T_0 / T_1 \quad (3-5)$$

Da bei den Versuchen die Gaszusammensetzung an den Meßorten unbekannt war, wurde als Vereinfachung für die temperaturabhängige Gasdichte die Dichte von Luft bei der entsprechenden Temperatur verwendet. Dies ist zulässig wegen des hohen Stickstoffgehaltes sowohl der Luft als auch der Brandgase. Die Temperaturen wurden mit einem Mantel-Thermoelement mit der Thermopaarung Chromel/Alumel und einem Inconelmantel mit einem Außendurchmesser von 1,6 mm gemessen. Die Spitze des Thermoelementes befand sich in Strömungsrichtung in einer Entfernung von 15 mm vom Staupunkt der im folgenden beschriebenen Drucksonde.

Zur Bestimmung des örtlichen dynamischen Druckes wurde ein Prandtlrohr verwendet, dessen Abmessungen aus den Bildern 3 und 4 hervorgehen. Die Sonde wurde in den jeweiligen Meßort mithilfe eines Koordinatengerätes positioniert. Die Differenzdrücke bis zu etwa 5 Pa wurden mit einem elektronischen Differenzdruckmikromanometer gemessen, dessen Ausgangssignal mit einem Linienschreiber registriert wurde.

Die Sonde wurde vor dem Durchgang der Flammenfront an einem bestimmten Meßort an diesen Meßort positioniert. Die Sonde verblieb solange an dieser Stelle, bis die Flammenfront vorbeigewandert war. Dadurch wurde auch im Bereich der Maximalgeschwindigkeit eine infolge der starken Meßwertschwankungen notwendige Mittelwertbildung über eine ausreichend lange Zeitspanne ermöglicht.

Die Gasgeschwindigkeit  $w_G$  ergibt sich aus (3-4) zu:

$$w_G = \sqrt{2p_{\text{Dyn}} / \rho_G} \quad (3-6)$$

#### 3.2.4. Dicke der Flammenzone

Aus den Temperaturmessungen nach Abschnitt 3.2.3. konnte zusätzlich die Dicke der Flammenzone bestimmt werden. Zur Veranschaulichung dient Bild 5, in welchem die drei Phasen:

- Anstieg der Temperatur, ausgehend von der Umgebungstemperatur, Bereich a
- Beharrung der Temperatur auf einem mittleren Maximalwert, Bereich b, und
- Abfall der Temperatur vom Maximalwert auf eine Temperatur, die durch die Wärmestrahlung der Restglut der Krippe bestimmt wird, Bereich c

schematisch dargestellt sind.

Die Grenztemperatur für den Bereich b ist von der Geometrie der Krippe abhängig und liegt bei ca. 600 °C bis 700 °C.

Aus der nach Abschnitt 3.2.2. bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_F$  (Gleichung 3-3) und der Zeitdifferenz  $\Delta t_{Fz}$  im Bereich b kann nun die Dicke der Flammenzone  $d_{Fz}$  über die Beziehung

$$d_{Fz} = v_F \cdot \Delta t_{Fz} \quad (3-7)$$

bestimmt werden.

#### 4. MODELL DER FLAMMENFRONTAUSBREITUNG

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die räumliche Ausbreitung der Flammenfront einer lokal (Ecke, Mitte oder Randbereich) entzündeten Krippe sind von den Faktoren Holzart, Holzfeuchte und Umgebungsbedingungen einerseits, wobei bei dieser Untersuchung diese Eigenschaften möglichst konstant gehalten wurden, und von der Geometrie der Holzkrippe andererseits abhängig, wobei als Parameter die Stablänge, die Stabdicke, die Stababstände sowie die Krippenhöhe verändert werden können.

Wie bereits in mehreren früheren Arbeiten über das Abbrandverhalten von Holzkrippen [5], [6] dargestellt wurde, ist die Physik des Vorganges aus dem Wechselspiel von im wesentlichen 2 Kräften zu erklären. Diese sind die Auftriebskraft einerseits, die im Schwerfeld durch den Dichteunterschied zwischen den heißen Rauchgasen und der Umgebungsluft hervorgerufen wird, und die Wandreibungskraft andererseits, die die Zufuhr von Verbrennungsluft von außen in die Krippe behindert und dies umsomehr, je größer der Oberflächenanteil im Einzelkanal einer Krippe bezogen auf die freie Querschnittsfläche, d.h. also, je kleiner die Porosität (entsprechend

dem Hohlraumvolumenanteil) ist. Die Konsequenz aus dieser Erkenntnis für die Massenverlustgeschwindigkeit in Holzkrippen, bei allerdings anderen Zündvoraussetzungen, sind ausführlich in [5] beschrieben; insbesondere die dort aufgrund von Abbrandmessungen entwickelte Vorstellung über die Abhängigkeit des Massenverlustes von den geometrischen Parametern bei "dicht" gepackten Krippen, also solchen geringen Hohlraumvolumenanteils bzw. großer innerer Strömungswiderstände und "locker" gepackten Krippen, also solchen großen Hohlraumvolumenanteils bzw. geringer innerer Strömungswiderstände, wurde verschiedentlich weiterentwickelt, z.B. in [6,7].

Im vorliegenden Bericht wird der Versuch unternommen, unterstützt durch Abbrand- und Temperaturmessungen von früheren Untersuchungen [2] und durch die hier durchgeführten Messungen, eine einfache Modellvorstellung des Abbrandverhaltens zu entwickeln und insbesondere aus der Art der Flammenfrontausbreitung bzw. Flammenzonenausbreitung Rückschlüsse auf die Abbrandgeschwindigkeit und auf die Gasgeschwindigkeit zu ziehen.

Die Lage der Flammenfront wird dabei durch die Stelle definiert, an welcher der im Bild 2 dargestellte und dort durch den Zeitpunkt  $t_{BF}$  kenntlich gemachte Temperaturanstieg erfolgt. Die Flammenzone beginnt bei der Flammenfront und reicht zurück bis zu einer zur Flammenfront parallelen, von dieser im Abstand  $d_{FZ}$  in Richtung des Zündortes gelegenen Ebene. Die Flammenzone breitet sich dabei mit der Geschwindigkeit der Flammenfront aus.

#### 4.1. Beziehung zwischen Massenverlust und Ausbreitung der Flammenzone.

Im Bild 6 ist der zeitliche Verlauf der Restmasse einer Krippe dargestellt, der als Folge der Ausbreitung der Flammenfront in einer Krippe zu interpretieren ist:

$$R = f(v_F) \quad (4-1)$$

Diese im Bild dargestellte Form des Restmassenverlaufs wird zunächst für den einfachen Sonderfall einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront von einer Ecke der Krippe zur diagonal gegenüberliegenden Ecke diskutiert. Weitere einschränkende Voraussetzungen sind im folgenden jeweils angegeben.

#### 4.1.1. Konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenzone

Die Proportionalität des zeitlichen Massenverlustes zur konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenzone im hier betrachteten Sinne setzt voraus, daß der Brennstoff innerhalb der Flammenzone bereits vollständig verbrennt, d.h., daß keine Restglut oder Asche außerhalb des eng begrenzten Flammenbereichs der Dicke  $d_{FZ}$  im bereits durchquerten Teil der Krippe übrigbleibt. Es wird später der Einfluß dieser Vernachlässigung diskutiert werden. Außerdem wird einschränkend vorausgesetzt, daß sich die Flammenzone streng zylinderförmig ausbreitet (Bild 7).

Die Abweichungen von dieser Modellvorstellung können durch Messungen des Abbrandvorganges mittels zeitlicher und örtlicher Temperaturverläufe (siehe Abschnitt 5) ermittelt werden. Die Ursache dieser Abweichungen wird ebenfalls später diskutiert werden.

Unter den so festgelegten Voraussetzungen läßt sich die Massenverlustkurve bzw. der Restmassenverlauf nach Bild 6 aus dem Massenverlust innerhalb der Flammenzone berechnen. Das Berechnungsverfahren hierzu wird im folgenden im Detail entwickelt.



#### 4.1.1.1. Länge der Flammenfront

Die Länge der Flammenfront  $L_F$  ergibt sich aufgrund der Geometrie am Kreis (Bild 8) für

$$0 \leq x \leq L: \quad L_F = \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{4} \quad (4-2a)$$

und für

$$L \leq x \leq L \cdot \sqrt{2}: \quad L_F = \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{4} - 2 \cdot L_1 \quad (4-2b)$$

Die Länge  $L_1$  ist gemäß der Skizze in Bild 8:

$$L_1 = \alpha \cdot x$$

mit

$$\alpha = \arctan \frac{\sqrt{x^2 - L^2}}{L}$$

also:

$$L \leq x \leq L \cdot \sqrt{2}: \quad L_F = 2 \cdot x \left( \frac{\pi}{4} - \arctan \frac{\sqrt{x^2 - L^2}}{L} \right) \quad (4-2c)$$

Werden  $L_F$  und  $x$  mit der Stablänge  $L$  dimensionslos gemacht:

$$l_F = \frac{L_F}{L} \quad \text{und} \quad x' = \frac{x}{L}$$

dann werden Gleichung (4-2a) und (4-2c):

$$0 \leq x' \leq 1: \quad l_F = \frac{2 \cdot \pi}{4} x' \quad (4-2d)$$

und

$$l_F = 2 \cdot x' \left( \frac{\pi}{4} - \arctan \sqrt{x'^2 - 1} \right) \quad (4-2e)$$

Die Abhängigkeit der Länge der Flammenfront  $l_F$  vom Weg  $x'$  diagonal durch die Krippe ist in Bild 9 dargestellt. Dieser Zusammenhang, der sich aus den geometrischen Überlegungen ergibt, ist noch unabhängig von der in 4.1.1. getroffenen Voraussetzung einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront wie auch die Zunahme der verbrannten Zylindergrundfläche beim Durchgang der Flammenfront durch die Krippe bzw. die dazu korrespondierende Größe des Flächenabbrandes davon unabhängig sind. Die zeitliche Abhängigkeit der Flammenfrontlänge erhält man, wenn der Zusammenhang zwischen dem Weg und der Geschwindigkeit gegeben ist (Abschnitt 4.2.).

#### 4.1.1.2. Abnahme der Krippengrundfläche

Unter den oben getroffenen Voraussetzungen einer kreisförmigen und horizontalen, d.h. durch Zylinderflächen beschreibbaren Flammenausbreitung ist die Zunahme der verbrannten Zylindergrundfläche gleich dem Integral von  $l_F$  über  $dx'$ , also

$$F_V = \int_0^{x'} l_F dx' \quad (4-3)$$

Der Korrespondenzwert

$$1 - F_V = 1 - \int_0^{x'} l_F dx' \quad (4-3a)$$

gibt die an der Stelle  $x'$  noch vorhandene Restgrundfläche an. Beide Kurven sind ebenfalls im Bild 9 dargestellt. Aus dem Verlauf von  $(1 - F_V)$  erkennt man die Verwandtschaft mit dem Restmassenverlauf (Bild 6).

Wie sich leicht nachweisen läßt, ist

$$\int_0^{\sqrt{2}} l_F dx' = 1 \quad (4-4)$$

d.h., die gesamte Masse ist verbrannt, sobald die Flammenfront die Krippe durchquert hat.

#### 4.1.1.3. Dauer des Abbrandes

Anhand der Temperaturmessungen in [2], die, wie im Abschnitt 3.2.2. angegeben, ausgewertet wurden, läßt sich ein Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Flammenfrontausbreitung und der Porosität der Krippe herleiten. Diese Messungen beziehen sich auf den Bereich um  $\phi \approx 1/2$ . Es wird hier vereinfachend angenommen, daß diese Messungen eine konstante Geschwindigkeit der Flammenfrontausbreitung repräsentieren, die für die gesamte Krippe gültig ist. Bild 10 zeigt die Abhängigkeit der solchermaßen bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit vom Stababstand. Sie läßt sich durch die Ausgleichskurve

$$v_{F, \text{const}} = 1,577 + 1,116 \ln (s/b) \text{ cm/min} \quad (4-5)$$

hinreichend genau wiedergeben.

Unter der Voraussetzung aus Abschnitt 4.1.1., daß sich die Flammenzone mit konstanter Geschwindigkeit ausbreitet, läßt sich die Gesamtbranddauer der Krippen  $t_{\text{ges}}$  berechnen zu:

$$t_{\text{ges}} = \frac{L \cdot \sqrt{2}}{1,577 + 1,116 \ln (s/b)} \quad (4-6)$$

Für Krippen mit  $b = 2$  cm und  $L = 42$  cm folgt daraus:

$s/b = 0,333$	1	1,5	2	2,5	
$t_{\text{ges}} = 169,55$	37,68	29,27	25,27	21,19	min

Diese Ergebnisse stimmen relativ gut mit gemessenen Werten überein (Tabelle 3, Abschnitt 5.3.). Die im Abschnitt 4.1.1. vorausgesetzten Vernachlässigungen sind also zunächst für eine überschlägliche Berechnung durchaus akzeptabel. Es ist beim derzeitigen Stand der Untersuchungen allerdings noch nicht der Einfluß einer Variation der Krippenhöhen berücksichtigt.

#### 4.1.1.4. Verlauf der Restmasse R(x)

Der zeitliche Massenverlust ist definiert als (vgl. Abschnitt 3.2.1.)

$$R(t) = 1 - M(t) / M_0 \quad (3-1)$$

M(t) ist dabei die beim Zeitpunkt t bereits verbrannte Masse. Analog dazu kann man die Restmassenfunktion abhängig vom Ort definieren:

$$R(x) = 1 - M(x) / M_0 \quad (4-7)$$

Dabei ist M(x) gleichzusetzen mit der Masse, die dann verbrannt ist, wenn die Flammenfront den Weg x zurückgelegt hat. Der Wert von M(x) ergibt sich dabei aus der Geometrie der Krippe:

$$M(x) = \int_0^x L_F dx \cdot H_0 \cdot \rho_H \cdot \frac{\text{Volumen aller Stäbe}}{\text{Volumen der Krippe}} \quad (4-8)$$

Da  $H_0 = b \cdot N$ , wird Gleichung (4-8):

$$M(x) = \int_0^x L_F dx \cdot \rho_H \cdot \frac{n \cdot N \cdot b^2}{L} \quad (4-8a)$$

und der Restmassenverlauf R(x) damit

$$R(x) = 1 - \frac{1}{L^2} \int_0^x L_F dx \quad (4-9)$$

Da für Werte von x:

$0 \leq x \leq L$  das Integral

$$\int_0^x L_F dx = \frac{\pi}{4} x^2 \quad (4-10)$$

und für Werte von x :  $L \leq x \leq L \cdot \sqrt{2}$  das Integral

$$\int_L^x L_F dx = \frac{\pi}{4} x^2 - 2 \int_L^x x \cdot \arctan \frac{\sqrt{x^2 - L^2}}{L} dx,$$

ist, ergibt sich für den Restmassenverlauf

$$R(x) = 1 - \frac{\pi x^2}{4 L^2} + \frac{2}{L^2} \int_L^x x \arctan \frac{\sqrt{x^2 - L^2}}{L} dx \quad (4-11)$$

für  $0 \leq x \leq L \cdot \sqrt{2}$

Im Falle der Entzündung der Krippe in der Mitte und der Lage der unteren Integrationsgrenze im Mittelpunkt der Krippe wird

$$R(x) = 1 - \frac{\pi x^2}{L^2} + \frac{8}{L^2} \int_{\frac{L}{2}}^x x \arctan \frac{\sqrt{4x^2 - L^2}}{L} dx \quad (4-12)$$

für  $0 \leq x \leq \frac{L}{2} \cdot \sqrt{2}$ .

Die Umrechnung von R (x) in R (t) erfolgt über die Beziehung

$$t = \frac{x}{v} \quad (4-13)$$

im Falle konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront durch die Krippe. Der allgemeine Fall einer nicht

konstanten Flammgeschwindigkeit wird im Abschnitt 4.1.2. behandelt.

#### 4.1.2. Veränderliche Geschwindigkeit der Flammenfront

Die allgemeine Beschreibung der Geschwindigkeit der Flammenfrontausbreitung ist

$$v_F = f ( s/b, x, H_0 ) \quad (4-14)$$

Wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront bei einer Krippe nicht, wie im Abschnitt 4.1.1. angenommen, konstant ist, sondern vom Weg  $x$  abhängig ist, dann werden davon sowohl die Dauer des Abbrandes als auch der Restmassenverlauf  $R (t)$  verändert.

Die Gesamtbranddauer für eine an der Ecke entzündete Krippe wird dann:

$$t_{\text{ges}} = \frac{L \cdot \sqrt{2}}{1} \cdot \frac{1}{L \sqrt{2}} \cdot \int_0^{L\sqrt{2}} v_F(x) dx \quad (4-15)$$

Die Umrechnung von  $R (x)$  nach  $R (t)$  wird über die Beziehung

$$t = \int_0^x \frac{dx}{v_F(x)} \quad (4-16)$$

vorgenommen. Wenn z.B.

$$v_F = ax + b \quad (4-17)$$

ist, wird

$$t = \frac{1}{a} \ln | ax + b | \quad (4-18)$$

Wenn man die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Höhenlage der Flammenzone innerhalb der Krippe vernachlässigt, also nach wie vor zylindrische Ausbreitung vorausgesetzt, dann ist  $a = f_1(s/b)$ ,  $b = f_2(s/b)$ . Mit der Beziehung

$$t_{50} = \int_0^{x_{50}} \frac{dx}{v_F(x)} \quad (4-19)$$

wird der Zeitpunkt berechnet, an dem die Flammenfront die Stelle  $x_{50}$  erreicht hat.  $x_{50}$  ist dabei der Abstand vom Zündort, bei dem die halbe Masse verbrannt ist. Damit wird in Anlehnung an Abschnitt 3.1. der Wert von  $R$  ( $t/t_{50}$ ) berechnet, um die so berechneten Werte mit Meßergebnissen vergleichen zu können. Für die hier untersuchten Krippen mit quadratischer Grundfläche ist bei Zündung an der Ecke

$$x_{50} = L \cdot \sqrt{2/\pi} = 0,798 L \quad (4-20)$$

#### 4.1.3. Dicke der Flammenzone

Bei Krippen, die sich nur im Verhältnis  $s/b$  unterscheiden, ist die Dicke der Flammenzone eine Funktion dieser Größe. Das von der Flammenzone eingenommene Krippenvolumen ist, wenn die Flammenfront die Stelle  $x$  erreicht hat,

$$V_{FZ}(x) = F_{FZ} \cdot H_C \quad (4-21)$$

mit

$$F_{FZ} = \int_{x-d_{FZ}}^x L_F dx \quad (4-22)$$

Also ist

$$V_{FZ}(x) = H_C \cdot \int_{x-d_{FZ}}^x L_F dx \quad (4-23)$$

mit

$$d_{FZ} = d_{FZ}(s/b) \quad .$$

4.1.4. Massenverlust innerhalb der Flammenzone

Unter Berücksichtigung der mittleren Krippenporosität ist die innerhalb der Flammenzone vorhandene Masse

$$M_{FZ}(x) = \rho_c \cdot H_c \cdot \int_{x-d_{FZ}}^x L_F dx \quad (4-24)$$

mit

$$\rho_c = \frac{n \cdot b}{L} \cdot \rho_H \quad (4-25)$$

Die dabei innerhalb der Flammenzone liegende Holzoberfläche ist

$$A_{S, FZ} = A_S \cdot \frac{F_{FZ}}{L^2} \quad (4-26)$$

mit der Holzoberfläche  $A_S$  nach [2]:

$$A_S = 2 n b (N ( 2 L+ b ) - bn (N-1) ) - nbL \quad (4-27)$$

Dabei wird aus (4-11) und (4-13) bzw. (4-16) der Wert von  $R(t)$  berechnet und über die Beziehung (3-1) der dazugehörige Wert  $M(t)$ . Durch Differentiation erhält man  $dM/dt$ . Der Massenverlust pro Zeiteinheit für eine bestimmte Position der Flammenzone ergibt sich zu:

$$\dot{M}_{FZ} = \left( \frac{dM}{dt} \right)_{FZ} = \frac{1}{d_{FZ}} \int_{x-d_{FZ}}^x \frac{dM}{dt} dx \quad (4-28)$$

Bildet man schließlich noch

$$\dot{m} = \dot{M}_{FZ} / A_{S, FZ} \quad (4-29)$$

dann ist der durch pyrolytische Zersetzung hervorgerufene Massenverlust pro Oberflächen- und Zeiteinheit in der betrachteten Zone innerhalb der Krippe ermittelt.



Anhand der Unterschiede zwischen dem im Versuch gemessenen Massenverlust und dem aufgrund der gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeit und der geometrischen Betrachtungen berechneten Massenverlust läßt sich nachprüfen, inwieweit die mit dem Modell getroffenen Vereinfachungen realistisch sind.

#### 4.1.5. Geschwindigkeit der Zersetzungsgase

Die Geschwindigkeit der Zersetzungsgase kann aus dem Massenverlust abgeschätzt werden. Dabei kann als Grundlage der Abschätzung sowohl die gemessene Massenverlustkurve als auch die nach 4.1.4. bestimmte verwendet werden. Die innerhalb der Flammenzone an der Oberfläche  $A_{S, FZ}$  freigesetzten Gase strömen aufgrund ihres Auftriebes entgegen der Richtung des Schwerfeldes und treten dabei durch die Fläche  $F_{FZ}$  aus der Krippe aus.

Der von den Gasen gebildete Volumenstrom ist

$$\dot{V}_Z = \bar{M}_{FZ} \frac{1}{\rho_Z} \quad (4-30)$$

und die resultierende Geschwindigkeit:

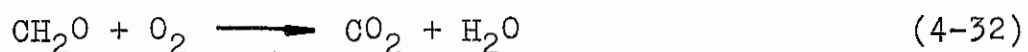
$$w_Z = \frac{\dot{V}_Z}{F_{FZ}} = \frac{\bar{M}_{FZ}}{\rho_Z F_{FZ}} \quad (4-31)$$

wobei  $\rho_Z$  die Dichte der Zersetzungsgase bei der Oberflächentemperatur der Stäbe einer Krippe darstellt.

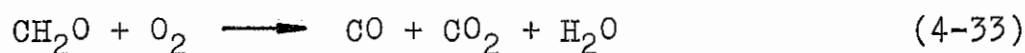
#### 4.1.6. Geschwindigkeit des Abgases

Durch Ansaugung von Umgebungsluft in den Zersetzungsgasstrom und Verbrennung der gemischten Gasströme erfolgt eine Vergrößerung des strömenden Volumens. Der Grad der Umsetzung von Zersetzungsgasen mit Luft zu Abgas kann mit Messungen der Abgaskonzentration nachgeprüft werden. Hierzu liegen jedoch noch keine ausreichenden Messungen vor.

Der aus der Krippe austretende Gesamtvolumenstrom besteht aus der Summe des noch nicht reagierten Zersetzungsgasstromes, der noch nicht reagierten Verbrennungsluft und dem Abgas aus der Reaktion von Zersetzungsgasen mit Verbrennungsluftsauerstoff, wenn vereinfachend angenommen wird, daß die Reaktionsgeschwindigkeit sehr viel größer als die Mischungsgeschwindigkeit der Gase ist und daß daher die Reaktionsgeschwindigkeit keinen Einfluß auf die Geschwindigkeit des Gesamtvorganges hat. Die für die Rechnung zugrundeliegende Reaktion in der Gasphase ist nach [4]:



Bei Sauerstoffmangel ändert sich Gleichung (4-32) zu:



im gasreichen Gemisch. Wie die Gleichung (4-33) zeigt, kann aus den Konzentrationen von CO und CO<sub>2</sub> sowie von H<sub>2</sub>O auf die an der Reaktion beteiligten Sauerstoff-(Luft-)mengen zurückgerechnet werden.

Wegen Mangels an Meßwerten wird allerdings hier auf eine Berechnung verzichtet.

## 5. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION

### 5.1. Temperaturmessungen

Wie bereits im Abschnitt 3.2.3. angegeben wurde, wurde die Meßsonde vor dem Eintreffen der Flammenfront am Meßort an diesen gebracht und solange dort belassen, bis die Flammenfront vollständig vorbeigewandert war. Das Meßsignal nahm dadurch einen typischen zeitlichen Verlauf an, der

drei Abschnitte aufwies:

Anstieg des Wertes von Umgebungsbedingungen auf einen quasi stationären, nur wenig schwankenden Maximalwert im Bereich der Flammenzone und nach dem Abbrand des Holzes unterhalb des Meßortes Abfall des Wertes auf die Einstrahlungstemperatur der verbleibenden Restholzkohle. Der in der Tabelle 2 angegebene Temperaturwert ist der mit den Schwankungen um den Maximalwert gebildete Mittelwert. Die Werte in der Tabelle zeigen, daß die Temperatur der Flamme resp. der Abgase von der Höhe des Meßortes über die Krippe, von der Lage der Flammenzone in Bezug auf den Zündpunkt und von dem Geometrieparameter  $s/b$  abhängig ist.

Zunächst sind einige allgemeine Beobachtungen zu den Temperaturniveaus in Abhängigkeit vom Stababstand angebracht. Die erste Beobachtung dabei ist eine Zunahme der Temperaturniveaus für zunehmende Stababstände von  $s/b = 0,5$  bis 2. Bei  $s/b = 2,5$  ist keine Zunahme mehr gegenüber den kleineren Werten von  $s/b$  festzustellen.

Die Erklärung für die Zunahme der Temperaturen mit zunehmendem Stababstand ist die, daß die Abbrandgeschwindigkeit mit wachsenden Stababständen ansteigt und damit auch die Verbrennungsintensität in der Flamme. Die Folge davon für die Geschwindigkeitsprofile (siehe Abschnitt 5.2.) ist die, daß auch diese Größen ansteigen, da eine höhere Gastemperatur eine verstärkte Expansion der Gase sowie einen erhöhten Auftriebseinfluß auf die Gase hervorruft und dadurch diese auf höhere Gasgeschwindigkeit beschleunigt.

Die Temperaturverteilungen weisen jedoch keine eindeutige Abhängigkeit von der fortschreitenden Verbrennung in diagonalen Richtung auf. Eine weitere Feststellung ist die, daß die Temperaturen beim Austritt des Gases aus den Krippen im Mittel etwas niedrigere Werte aufweisen als weiter stromab, weil die Gaszusammensetzung beim Austritt aus der

Krippe brennstoffreich und damit die Verbrennung innerhalb der Flammenzone noch nicht so intensiv ist wie etwas weiter stromab, etwa in doppelter Krippenhöhe (16cm). Hier wird infolge Luftansaugung durch den Auftrieb der Flammengase ausreichend Verbrennungsluft zugeführt. Die Temperaturabnahme noch weiter stromab ist dann auf den fortgeschrittenen Brennstoffverbrauch in Verbindung mit weiterer Außenlufteinsaugung, ähnlich wie beim Freistrahler mit geringem Anfangsimpuls, zurückzuführen.

## 5.2. Gasgeschwindigkeit

### 5.2.1. Meßergebnisse der Flammengase

Die den im Abschnitt 5.1. diskutierten Temperaturwerten entsprechenden und aus den Druckmessungen nach Gleichung (3-6) berechneten Gasgeschwindigkeiten sind ebenfalls in der Tabelle 2 angegeben.

In Bild 11 ist beispielhaft die Querverteilung der Geschwindigkeiten bei einer Krippe 2/1,5/21 und verschiedenen Meßhöhen angegeben. Bild 12 zeigt die Querverteilung der Geschwindigkeiten in einer Meßhöhe von 8 cm für die Krippen 2/0,5/21 bis 2/2,5/21. Im Bild 13 ist die Höhenabhängigkeit der Geschwindigkeiten für die drei Querebenen der Krippe 2/1,5/21 dargestellt. Bild 14 zeigt die Höhenabhängigkeit der Geschwindigkeiten für die Krippen 2/0,5/21 bis 2/2,5/21 in der Querebene  $\varnothing = 0,25$ .

Die in Bild 11 für die Krippe 2/1,5/21 dargestellte Abhängigkeit der Meßwerte von der Querverteilung in verschiedenen Höhen zeigt eine insgesamt betrachtet scheinbare Zunahme der Werte bei anwachsendem  $\varnothing$ . Die Meßwerte bei den anderen Krippen zeigen jedoch (Tabelle 2), daß hier keine Systematik vorhanden ist. Es kann also davon ausgegangen werden, daß kein wesentlicher Einfluß der Querebene auf die Geschwindigkeit besteht. Im Bild 12 ist ebenfalls keine Tendenz für eine Abhängigkeit der Geschwindigkeiten von der Querebene

bei verschiedenen Krippen festzustellen. Diese Aussage wird durch den Vergleich mit den in der Tabelle 2 aufgeführten Meßwerten bestätigt. Das Bild 13 zeigt die deutliche Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Flammengase von der Höhe des Meßortes über der Krippenoberfläche. Hier gilt natürlich entsprechend der Aussage bei Bild 11, daß die Unterschiede bei verschiedenen Werten von  $\phi$  nicht systematisch sind. Die im Bild 14 dargestellten Meßwerte zeigen, daß neben der Abhängigkeit von der Höhe ebenfalls die Meßwerte in Abhängigkeit vom Parameter  $s/b$  zunehmen. Die Meßwerte der Geschwindigkeit wurden durch Ausgleichskurven verbunden. Die Ausgleichskurven für die Krippen 2/1/21 bis 2/2/21 wurden für den Parameter  $\phi = 0,25$  im Bild 15 dargestellt. Sie können durch die folgende Regressionsgeradenschar dargestellt werden:

$$\bar{w}_{G,\max} = 0,08 + 0,21 s/b + 0,185 h \quad (5-1)$$

Der Wert von  $\bar{w}_{G,\max}$  ergibt sich dabei in m/s.

### 5.2.2. Zersetzungsgasgeschwindigkeit

Die theoretisch zu erwartende Gasgeschwindigkeit der Zersetzungsgase wurde nach dem im Abschnitt 4.1.5. dargestellten Verfahren bestimmt.

Die mittlere Zeitdauer  $\Delta t_{FZ}$ , die nach der Vorschrift im Abschnitt 3.2.4. (Bild 5) aus den Messungen zur Ermittlung der Gasgeschwindigkeit bestimmt wurde, ist im Bild 16 in Abhängigkeit von der Größe  $s/b$  für die Krippe mit einer Stabdicke von 2 cm aufgetragen. Die aus den Gleichungen (4-5) und (3-7) berechnete Dicke der Flammenzone  $d_{FZ}$  ist in Abhängigkeit von  $s/b$  im Bild 17 dargestellt. Die im Bild 16 dargestellte Kurve wird am besten durch die

folgende Gleichung wiedergegeben:

$$\Delta t_{FZ} = 4,68 \cdot (s/b)^{-0,6} \quad (5-2)$$

Daraus folgt für die Dicke der Flammenfront:

$$d_{FZ} = (1,577 + 1,116 \ln(s/b)) \cdot 4,68(s/b)^{-0,6} \quad (5-3)$$

Die mittlere Geschwindigkeit der Zersetzungsgase,  $w_z$ , innerhalb der Flammenzone in der Krippe beträgt (vgl. Gleichung 4-31)

$$w_z = \frac{1}{\rho_z F_{FZ}} \left( \frac{\overline{dM}}{dt} \right)_{FZ} = \frac{\overline{\dot{M}}}{\rho_z F_{FZ}} \quad (5-4)$$

Der zeitliche Verlauf der Massenverlustgeschwindigkeit  $dM/dt$  für Krippen mit  $s/b = 1, 1,5$  und  $2$  kann dem Bild 18 entnommen werden. Der zeitliche Verlauf von  $dM/dt$  wurde hierbei durch Umrechnungen von  $M(x)$  in  $M(t)$  unter Zugrundelegung der Gleichung (5-5) mit nachfolgender Differentiation von  $M(t)$  nach  $t$  bestimmt.

Die Flammenfläche  $F_{FZ}$  entspricht dem Integral

$$\int_{x-d_{FZ}}^x L_F dx.$$

Die Oberflächentemperatur der Stäbe beträgt zwischen  $600^\circ\text{C}$  und  $700^\circ\text{C}$ . Die Dichte von Formaldehyd ( $\text{CH}_2\text{O}$ , vgl. Gleichung (4-32)) bei  $650^\circ\text{C}$  ist  $0,4 \text{ kg/m}^3$ .

Damit wird  $w_z$

s/b:	$w_z$ in m/sec
1	0,39
1,5	0,62
2	0,68

Ohne daraus quantitativ auf die Geschwindigkeit der Flammengase zu schließen, läßt sich feststellen, daß die Tendenz aus den Geschwindigkeitsmessungen nach Abschnitt 5.2.1. bestätigt wird.

### 5.3. Vergleich des Modells zur Flammenfrontausbreitung mit Messungen

Mithilfe von Temperatur- und Massenverlustmessungen an Holzkrippen verschiedener Stabgrößen und Stababstände wird das im vorigen Abschnitt dargestellte einfache Modell der Flammenfrontausbreitung überprüft. Es wurden 2 Stabdicken verwendet, 1 cm und 2 cm. Die Länge bei den dünneren Stäben betrug 13 cm und bei den dickeren Stäben 42 cm. Es wurden von beiden Stabsorten Krippen angefertigt, wobei das Verhältnis von Stababstand zu Stabdicke den Werten 1, 1,5 und 2 entsprach (vgl. Tabelle 1 und Abschnitt 2).

#### 5.3.2. Messungen

Es wurden mit den "kleinen" Krippen insgesamt 33 Versuche durchgeführt. Mit den "großen" Krippen wurden insgesamt 19 Versuche durchgeführt. Die Untersuchungen unterteilten sich in die Abschnitte:

- Messung des zeitlichen Massenverlustes und
- Messung der Temperaturen im Inneren der Krippe.

Der Verlauf der Geschwindigkeiten von einer Ecke zur diagonal gegenüberliegenden Ecke wurde für die beiden Ausbreitungsrichtungen ( $45^\circ$  und  $22,5^\circ$ ), die drei Ebenen (A, B und C) längs des Weges  $x$  bestimmt und ist exemplarisch für eine Krippe im Bild 19 angegeben.

Aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den beiden Richtungen ( $45^\circ$  und  $22,5^\circ$ ) wurden für die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit zum Vergleich mit dem Modell aus Abschnitt 4 die Mittelwerte aus diesen Messungen verwendet. Im Bild 20 ist die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit für die 3 "großen" Krippen dargestellt. Die Abhängigkeit der Geschwindigkeit vom Weg für die untersuchten Krippen läßt sich durch die empirische Gleichung

$$\bar{v}_F = 1,42 + ( 0,043 ( s/b ) - 0,042 ) x \quad (5-5)$$

darstellen. Ein Vergleich der mittleren Geschwindigkeit in etwa Diagonalmitte zeigt eine gute Übereinstimmung mit Ergebnissen in [2] (vgl. Bild 10 ).

Nach der im Abschnitt 4.1.2. angegebenen Beziehung ( Gleichung 4-15 ) läßt sich die mittlere Abbrandzeit für den Durchgang der Flammenfront vom Zündort an das Ende der Krippe bestimmen. Die Berechnung ergab etwas unter den gemessenen Abbrandzeiten liegende Werte (siehe Tabelle 3). Dafür sind zwei Ursachen maßgebend. Die eine Ursache ist die, daß die Abhängigkeit des Geschwindigkeitsverlaufes vom Weg nicht für die gesamte Diagonale bestimmt werden konnte, da über dem Zündort keine Thermoelemente angeordnet waren. Daher wurde die Geschwindigkeit von den weiter in der Diagonale bzw. in der Krippenmitte gelegenen Meßpunkten auf den Ort der Zündquelle linear extrapoliert. Das bedeutet aber, daß die Abbrandgeschwindigkeit an dieser Stelle nicht genau bekannt ist, da sich bei der Entzündung einer Krippe mit einer kleinen Zündquelle die Flamme je nach der Geometrie langsamer entwickelt, als es bei der diesem Ausbreitungsmodell extrapolierten Geschwindigkeit aus Temperaturmessungen entspricht.



Aufgrund der Messungen läßt sich jedoch zeigen, daß das Verhältnis zwischen Entwicklung der Flammenfront im Zündbereich zur Gesamtabbranddauer für diesen verwendeten Krippentypus in etwa konstant ist. Die Abbrandzeiten und das Verhältnis  $t_{\text{gemessen}} / t_{\text{theoretisch}}$  sind zum Vergleich in der Tabelle 3 dargestellt.

Bei den "kleinen" Krippen zeigt sich nicht diese bei den "großen" Krippen festgestellte Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit vom Weg (Bild 21). Die Ursache hierfür konnte noch nicht ermittelt werden.

Aus diesem Grunde wurde zur überschläglichen Berechnung der Ausbreitungszeiten der über den Weg gemittelte Wert aus den Geschwindigkeitsmessungen der jeweiligen Krippe verwendet. Die entsprechenden Vergleichswerte von  $t_{\text{gemessen}}$  und  $t_{\text{theoretisch}}$  sind in der Tabelle 4 aufgeführt.

In den Bildern 22a bis f wurde die Abweichung der Form der Flammenfront von der im Abschnitt angenommenen Zylinderform dargestellt. In den Bildern für die "kleinen" Krippen ist ein von den "großen" Krippen abweichendes Verhalten festzustellen. Es konnte jedoch auch hier noch nicht geklärt werden, wovon diese Unterschiede in der Kontur zwischen den "großen" und den "kleinen" Krippen herrühren.

### 5.3.3. Vergleich der gemessenen Massenverluste mit dem aus dem Modell bestimmten.

Der Zweck des Vergleiches war, festzustellen, ob der gemessene Massenverlust sich von dem, den man aufgrund einer einfachen Modellvorstellung ( Abschnitt 4 ) bestimmt, wesentlich unterscheidet.

In den Bildern 23a bis f sind gemessene und berechnete Massenverlustkurven bei Entzündung der Krippen an einer Ecke dargestellt. Es zeigt sich im allgemeinen eine befriedigende Übereinstimmung zwischen den gemessenen Massenverlustkurven und den Massenverlustkurven, die unter Zugrundelegung der Ausbreitung der Flammenfront in einer zylindrischen Ebene mit den Vereinfachungen aus Abschnitt 4 gewonnen wurden. Die Massenverlustkurven wurden bei den "großen" Krippen sowohl mit konstanter als auch mit wegabhängiger Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront berechnet, bei den "kleinen" Krippen mit der konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Die Bilder 24a bis c zeigen zum Vergleich Messungen der Massenverlustkurven bei "kleinen" Krippen und Zündung in der Mitte im Vergleich zu den mit konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit berechneten.

Es zeigt sich, daß die im Abschnitt 4.1.1. getroffene Voraussetzung für die Restkohleverbrennung in den Bereichen, wo die Flammenzone bereits durchgewandert ist, keinen wesentlichen Einfluß auf den Restmassenverlauf ausübt.

Die Versuche werden fortgesetzt, um die Abhängigkeit der Flammenfront und die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront von verschiedenen Krippenhöhen, anderen Stababmessungen und auch größeren Krippenausdehnungen festzustellen. Ein weiteres Ziel ist es, den Abbrandverlauf auch von Krippen mit zentralem Zündort zu beschreiben.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wird über ein Modell berichtet, mit dem der zeitliche Massenverlust von mit kleinen Zündquellen lokal (an einer Ecke, am Rand oder in der Mitte) entzündeten Holzkrippen beschrieben werden kann. Das Modell stützt sich auf Messungen, die zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenzone bei Holzkrippen durchgeführt wurden. Bei diesen Krippen wurde das Verhältnis des Stababstandes zur Stabdicke variiert. Es wurden für den Aufbau der Holzkrippen zwei Stabgrößen verwendet.

Ein weiteres Ziel der Untersuchungen war die Bereitstellung von Meßergebnissen der Abgasgeschwindigkeit und -temperatur der aus der Flammenzone der Krippe austretenden Rauchgase. Diese Messungen wurden durchgeführt, um die Ergebnisse eines noch zu verifizierenden Rechenmodells, das im Rahmen des Gesamtforschungsvorhabens früher entwickelt wurde und die in einer Holzkrippe ablaufenden Vorgänge auf die innere Oberfläche eines Hohlzylinders abstrahiert, mit den Lösungen dieses Modells zu vergleichen.

Die Berechnungen aufgrund des Modells zur Ausbreitung der Flammenzone zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen, sodaß es gerechtfertigt erscheint, die getroffenen Vereinfachungen, wie z.B. eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenzone durch die Krippe oder ein Flammenfrontprofil, das einer Zylindermantelfläche entspricht, anzunehmen.

Es wird nachgewiesen, daß die Tendenz der vom Parameter  $s/b$  abhängigen Zersetzungsgasgeschwindigkeit mit den Messungen der Abgasgeschwindigkeit übereinstimmt.

## 7. FORMELZEICHEN

$A_S$	Summe der Staboberflächen einer Krippe
$a$	Faktor
$b$	Stabdicke, Faktor
$c$	Faktor
$d_{FZ}$	Dicke der Flammenzone
$F_{FZ}$	In der Flammenzone vorhandene Krippengrundfläche
$F_V$	Verbrannte Zylindergrundfläche
$H_0$	Krippenhöhe
$L$	Stablänge
$L_1$	Länge (Gleichung 4-2b)
$L_F$	Länge der Flammenfront
$l_F$	$L_F / L$
$M$	Masse
$M(t)$	Bis zum Zeitpunkt $t$ verbrannte Masse der Krippe
$M_{FZ}$	Innerhalb der Flammenzone vorhandene Masse
$M_0$	Anfangsmasse der Krippe
$\dot{m}$	Flächenbezogener zeitlicher Massenverlust
$N$	Anzahl der Lagen einer Krippe
$n$	Anzahl der Stäbe pro Lage
$p_{Dyn}$	Dynamischer Druck
$R(t)$	Zeitabhängiger Restmassenverlauf
$s$	Stababstand
$T$	Temperatur
$t$	Zeit
$t_{BF}$	Zeitpunkt, an dem die Flammenfront eine Meßstelle erreicht
$t_{ges}$	Gesamtbranddauer
$t_{50}$	Branddauer bei 50% Abbrand ( $R = 0,5$ )
$\Delta t_{FZ}$	Verweilzeit der Flammenzone
$U$	elektrische Meßspannung
$u_{max}$	$w_{G,max}^*$
$V_{FZ}$	Volumen innerhalb der Flammenzone
$\dot{V}_Z$	Zersetzungsgasstrom
$v_F$	Geschwindigkeit der Flammenfrontausbreitung

$w_G$	Geschwindigkeit der Gase
$w_Z$	Geschwindigkeit der Zersetzungsgase
$x$	Weg
$x'$	$x/L$
$x_{50}$	bei $x_{50}$ ist die halbe Anfangsmasse verbrannt
$\rho$	Dichte
$\rho_H$	Dichte von Holz
$\rho_Z$	Dichte von Zersetzungsgas
$\rho_G$	Gasdichte
$\varnothing$	auf die Länge der Diagonalen der Krippengrundfläche bezogener Abstand von der Zündquelle

#### INDIZES

$c$	Krippe
$F$	Flammenfront
$F_Z$	Flammenzone
$G$	Gas
$H$	Holz
$Z$	Zersetzungsgas

8. LITERATURVERZEICHNIS

- [ 1 ] Herterich, O.                    Denkschrift zur Lage der  
         Seeger, P.G.                    Brandschutzforschung.  
         et al.:                         Hamburg: Vereinigung zur  
   Förderung des Deutschen Brand-  
   schutzes e.V. (1974)
- [ 2 ] Brein, D.                         Modellbrandversuche zur  
         Schatz, H.:                     Bestimmung des Brandab-  
   laufs von Feststoffbränden.  
   Forschungsbericht Nr. 27  
   der Arbeitsgemeinschaft  
   Feuerschutz (AGF) (1975)
- [ 3 ] Brein, D.:                         Modellbrandversuche zur  
   Bestimmung des Brandab-  
   laufs von Feststoffbränden.  
   Forschungsbericht Nr. 30  
   der Arbeitsgemeinschaft  
   Feuerschutz (AGF) (1976)
- [ 4 ] Brein, D.:                         Modellbrandversuche zur  
   Bestimmung des Brandab-  
   laufs von Feststoffbränden.  
   Forschungsbericht Nr. 34  
   der Arbeitsgemeinschaft  
   Feuerschutz (AGF) (1978)
- [ 5 ] Gross, D.:                         Experiments on the burning  
   of cross piles of wood.  
   Journal of Research of the  
   National Bureau of Standards,  
   Vol. 66 C, No. 2, April - June 1962,  
   S. 99 - 105

- [ 6 ] Smith, P.G.                   The rate of burning of cribs  
          Thomas, P.H.:               of wood.  
                                      Fire Research Note No. 728,  
                                      Borehamwood: Fire Research  
                                      Station (1968)
- [ 7 ] Block, J.A.:                   A theoretical and experimental  
                                      study of nonpropagating free-  
                                      burning fires.  
                                      Cambridge, Harvard Univ.,  
                                      Diss.(1970), und 13 th Sympo-  
                                      sium (International) on  
                                      Combustion, S. 971-978,  
                                      Pittsburgh: The Combustion  
                                      Institute (1971)

## 9. TABELLEN UND BILDER

### 9.1. Tabellen

- Tabelle 1: Versuchsprogramm
- Tabelle 2: Abgastemperatur und -geschwindigkeit  
für Krippen 2/0,5/21 bis 2/2,5/21
- Tabelle 3: Vergleich der Abbrandzeiten bei Krippen  
mit  $L = 42$  cm,  $b = 2$  cm und  $H_G = 16$  cm
- Tabelle 4: Vergleich der Abbrandzeiten bei den  
"kleinen" Krippen  
mit  $L = 13$  cm bzw.  $13,5$  cm,  $b = 1$  cm und  
 $H_G = 8$  cm



Tabelle 1: Versuchsprogramm

Krippe	Massenverlust Eckenzündung	Massenverlust Mittenzündung	Flammenfront- geschwindigkeit	Abgas- geschwin- digkeit	Abgas- tempe- ratur
1/1/13	3 x	5 x	3 x		
1/1,5/13	3 x	5 x	3 x		
1/2/13	3 x	5 x	3 x		
2/0,5/21				x	x
2/1/21	3 x		3 x	x	x
2/1,5/21	3 x		3 x	x	x
2/2/21	3 x		3 x	x	x
2/2,5/21				x	x

Die Zahlen geben die Anzahl der Wiederholungsversuche an.

Tabelle 2: Abgastemperatur und -geschwindigkeit für Krippen 2/0,5/21

Versuchs Nr.	1a	2a	3a	4a	5a
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
$u_{\max}$ in m/s	0,55	0,67	0,775	0,794	0,824
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	799	807	781	679	608
Versuchs Nr.	1b	2b	3b	4b	5b
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
$u_{\max}$ in m/s	0,557	0,619	0,783	0,832	0,85
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	685	763	774	705	632
Versuchs Nr.	1c	2c	3c	4c	5c
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
$u_{\max}$ in m/s	0,586	0,705	0,801	0,845	0,85
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	742	769	769	655	630

Tabelle 2: Abgastemperatur und -geschwindigkeit für Krippen 2/1/21

Versuchs Nr.	6a	7a	8a	9a	10a
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
$u_{\max}$ in m/s	0,364	0,391	0,618	0,98	0,866
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	804	828	804	823	756

Versuchs Nr.	6b	7b	8b	9b	10b
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
$u_{\max}$ in m/s	0,266	0,373	0,651	0,92	0,818
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	876	792	828	781	828

Versuchs Nr.	6c	7c	8c	9c	10c
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
$u_{\max}$ in m/s	0,61	0,566	0,768	0,91	0,804
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	756	792	792	781	804

Tabelle 2: Abgastemperatur und -geschwindigkeit für Krippen 2/1,5/21

Versuchs Nr.	11a	12a	13a	14a	15a
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
$u_{\max}$ in m/s	0,501	0,456	0,735	0,941	0,916
$T_{\text{Gas,max}}$ in °C	780	852	876	876	816
Versuchs Nr.	11b	12b	13b	14b	15b
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
$u_{\max}$ in m/s	0,49	0,592	0,713	0,945	0,838
$T_{\text{Gas,max}}$ in °C	768	864	864	864	840
Versuchs Nr.	11c	12c	13c	14c	15c
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
$u_{\max}$ in m/s	0,869	0,752	0,892	0,961	0,995
$T_{\text{Gas,max}}$ in °C	816	840	804	780	816

Tabelle 2: Abgastemperatur und -geschwindigkeit für Krippen 2/2/21

Versuchs Nr.	16a	17a	18a	19a	20a
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
$u_{\max}$ in m/s	0,655	0,577	0,831	0,888	1,131
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	840	864	924	864	864
Versuchs Nr.	16b	17b	18b	19b	20b
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
$u_{\max}$ in m/s	0,508	0,813	0,815	0,779	0,988
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	924	936	924	852	840
Versuchs Nr.	16c	17c	18c	19c	20c
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
$u_{\max}$ in m/s	0,586	0,773	0,770	0,713	0,952
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	696	960	828	684	744

Tabelle 2: Abgastemperatur und -geschwindigkeit für Krippen 2/2,5/21

Versuchs Nr.	21a	22a	23a	24a	25a
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
$u_{\max}$ in m/s	0,99	1,02	1,04	1,09	1,17
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	872	872	891	891	830
Versuchs Nr.	21b	22b	23b	24b	25b
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
$u_{\max}$ in m/s	1,04	0,732	0,818	1,06	1,086
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	866	948	900	842	846
Versuchs Nr.	21c	22c	23c	24c	25c
Höhe der Sonde in cm	4	8	16	24	32
Querlage der Sonde	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
$u_{\max}$ in m/s	0,89	0,89	0,80	0,91	1,10
$T_{\text{Gas, max}}$ in °C	876	884	732	721	762

Табелле 3: Vergleich der Abbrandzeiten bei Krippen  
mit  $L = 42$  cm,  $b = 2$  cm und  $H_G = 16$  cm

s/b	$\bar{t}_{\text{gemessen}}$ in min	$t_{\text{theor}}$ (Gl.4-6) in min	$t_{\text{theor}}$ (Gl.4-15) in min	$\bar{t}_{\text{gem}} / t_{\text{theor}}$ (4-15)
1	50	37,68	41	1,22
1,5	35	29,27	29,5	1,19
2	27,75	25,27	23,75	1,17

Tabelle 4: Vergleich der Abbrandzeiten bei den "kleinen" Krippen  
mit  $L = 13$  cm bzw.  $13,5$  cm,  $b = 1$  cm und  $H_G = 8$  cm

s/b	$\bar{t}$ gemessen in min	$t_{\text{theor}}$ (Gl. 4-6) in min
1	22,4	22,1
1,5	16,1	15,0
2	11,8	9,7



9.2. Bilder

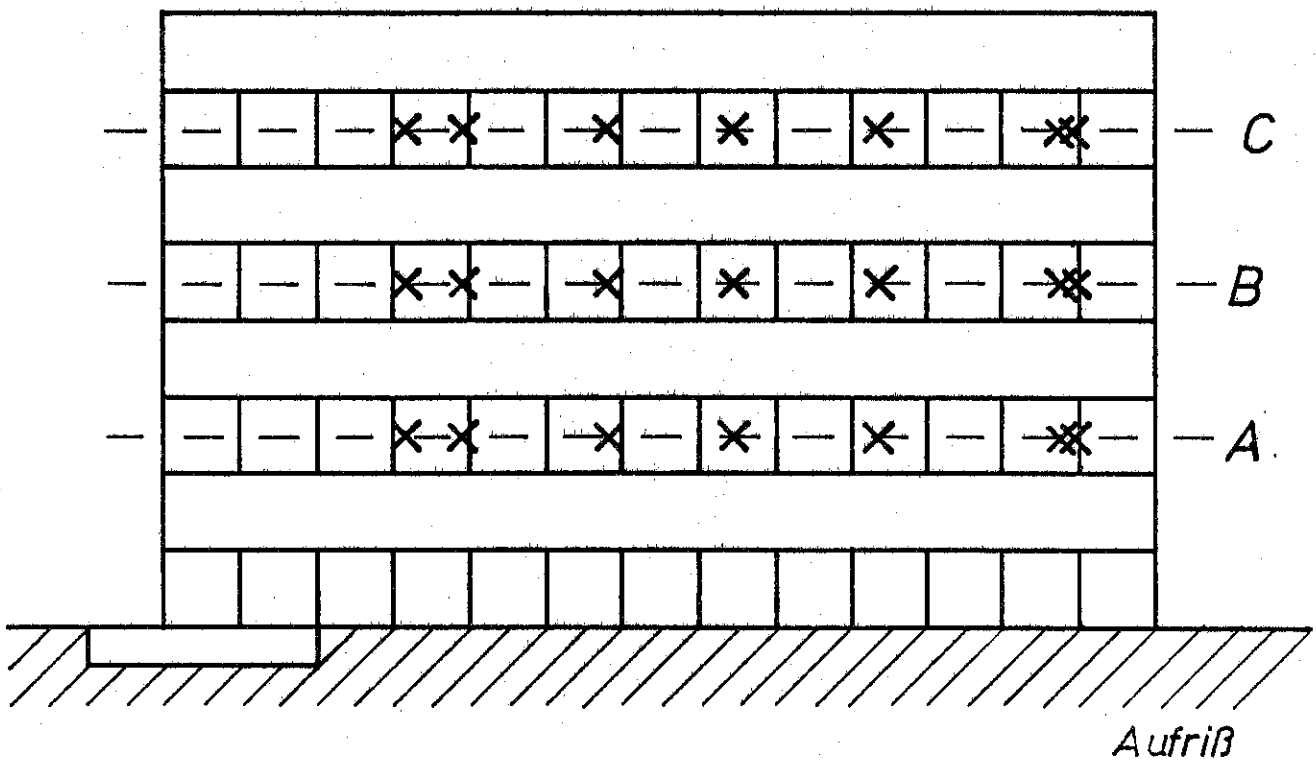
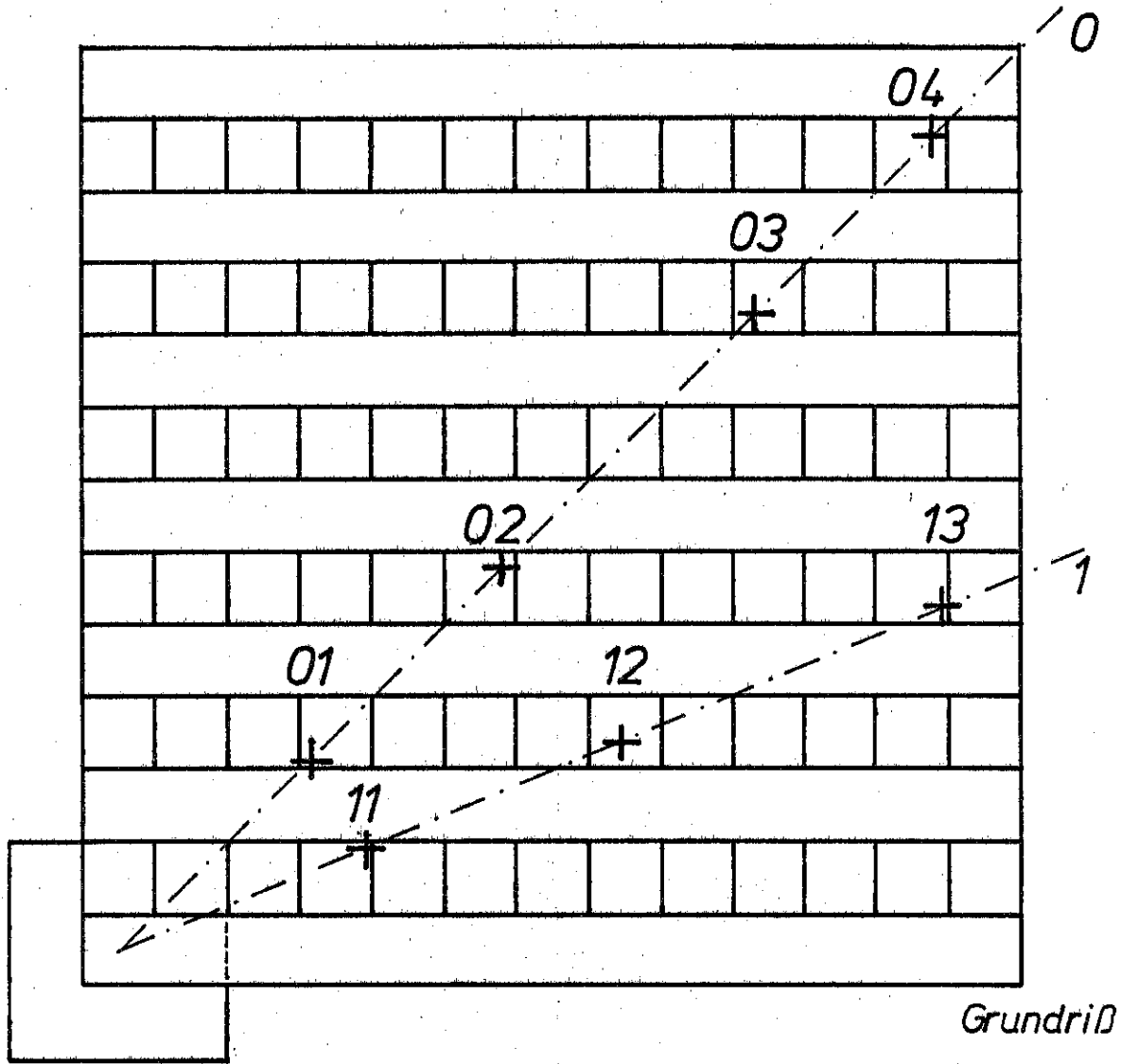


Bild 1a Verteilung der Thermoelemente in Krippen 1/1/13

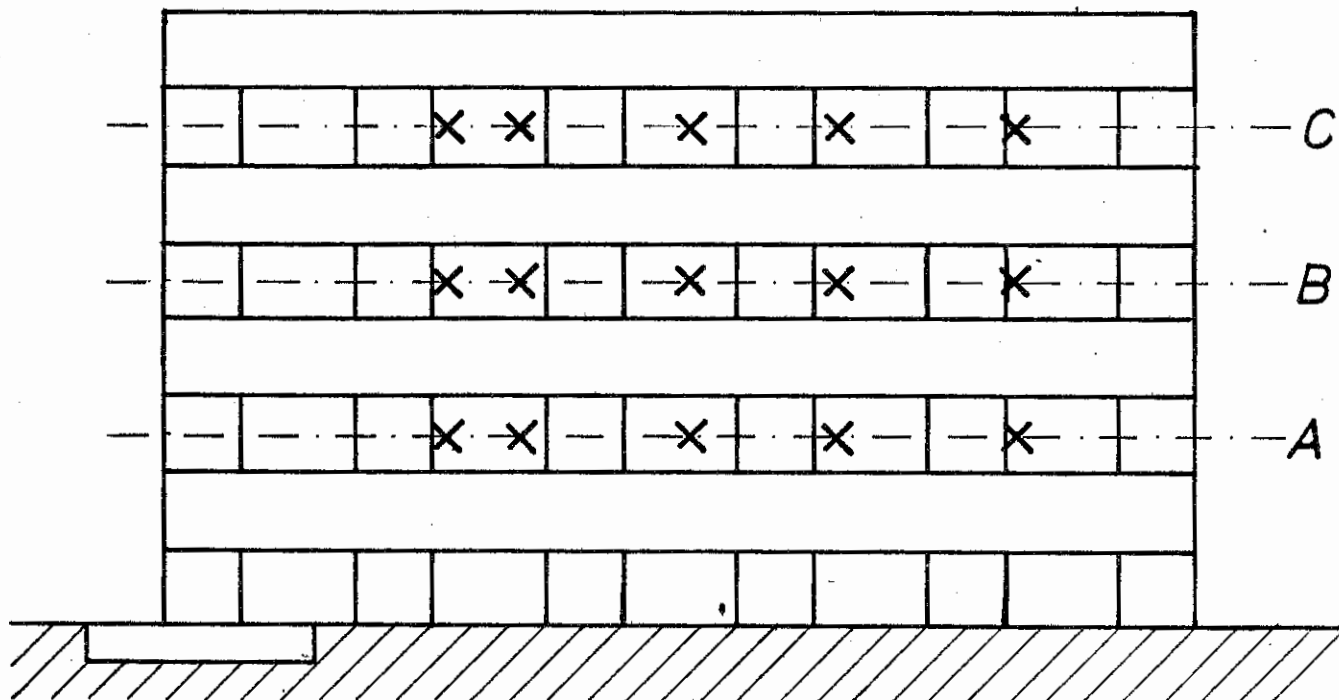
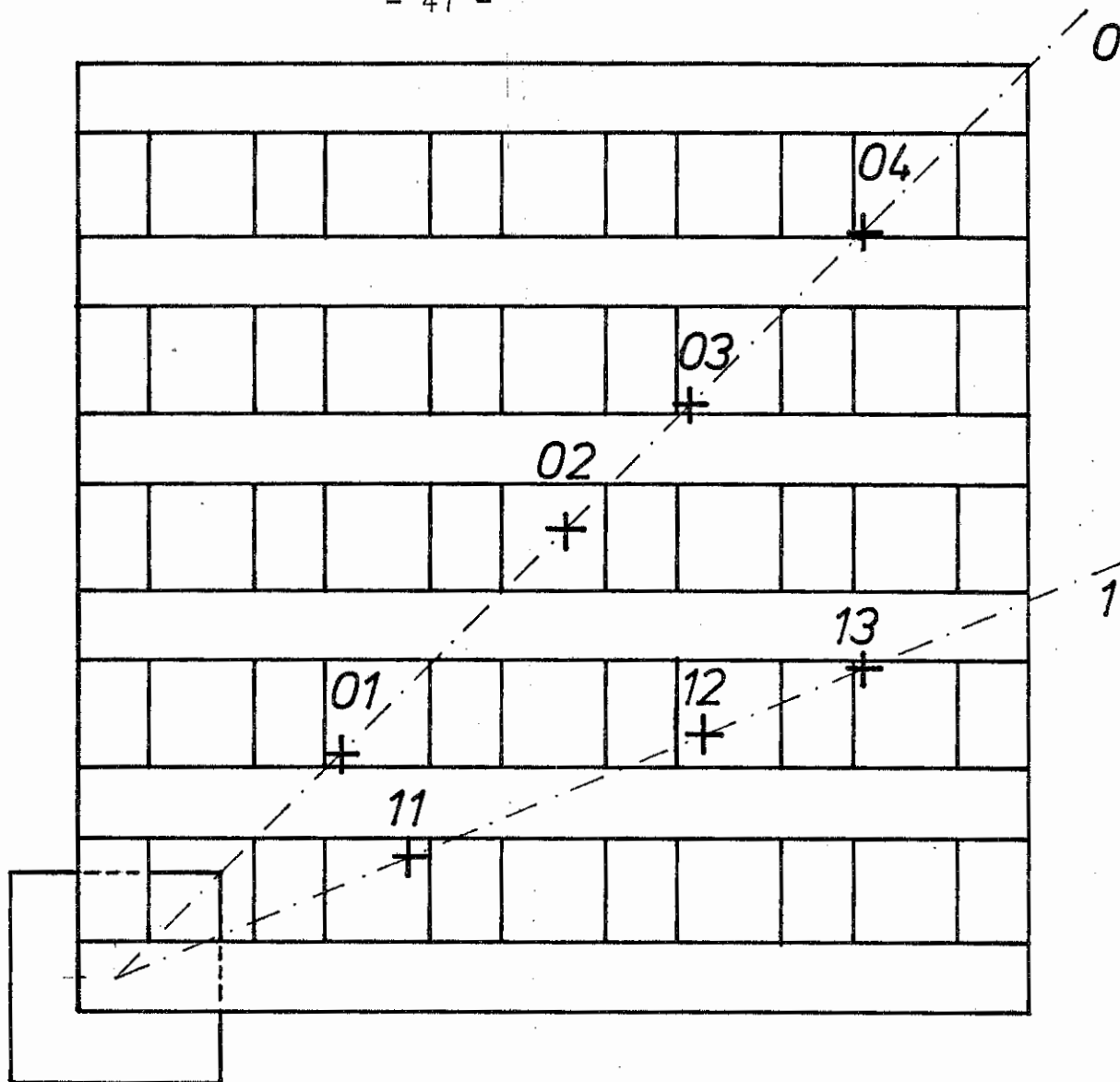


Bild 1b Verteilung der Thermoelemente in Krippen 1/1,5/13,5

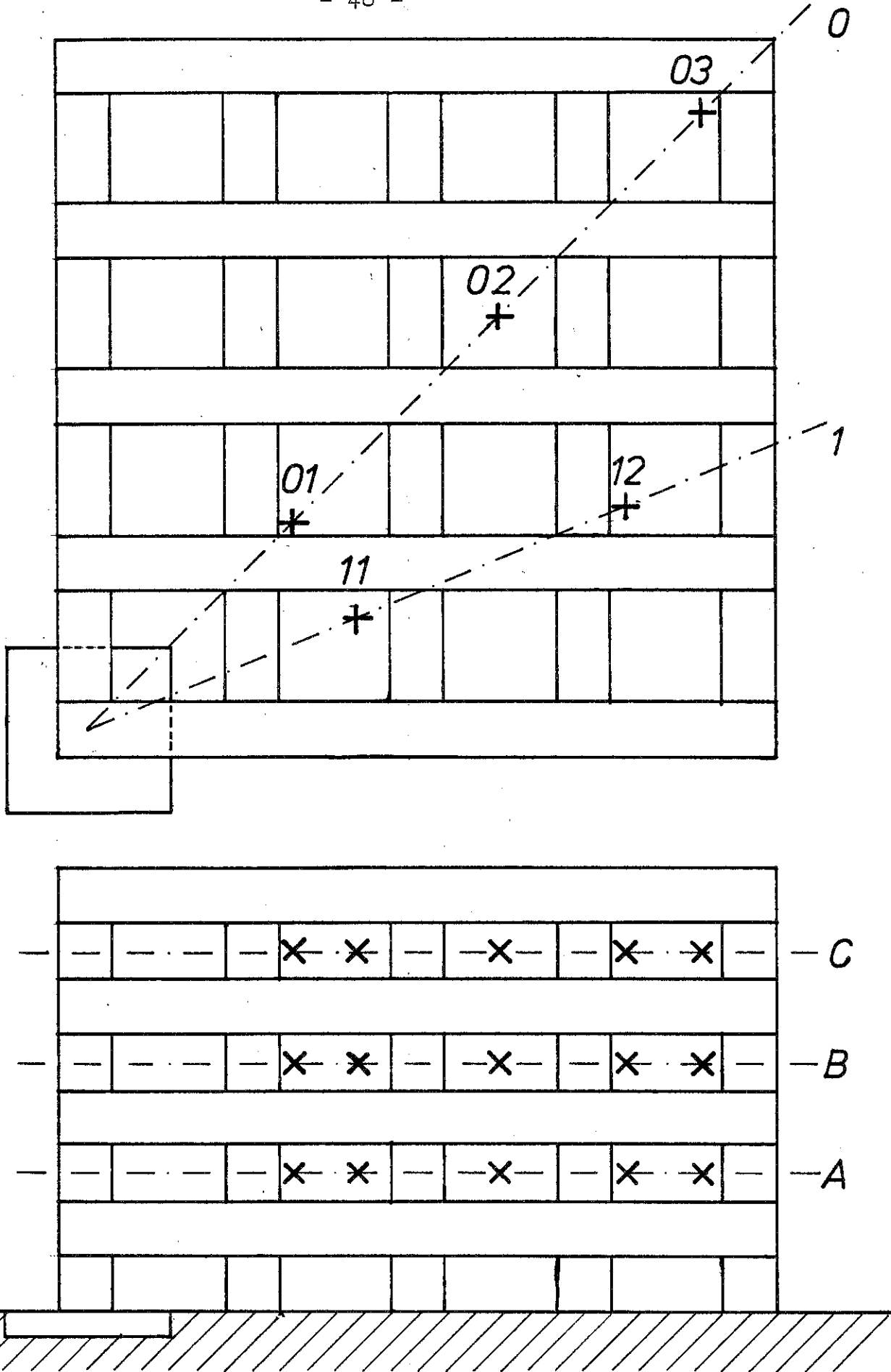


Bild 1c Verteilung der Thermoelemente in Krippen 1/2/13

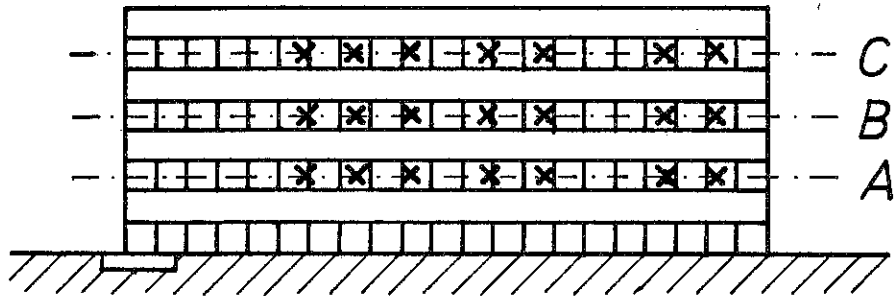
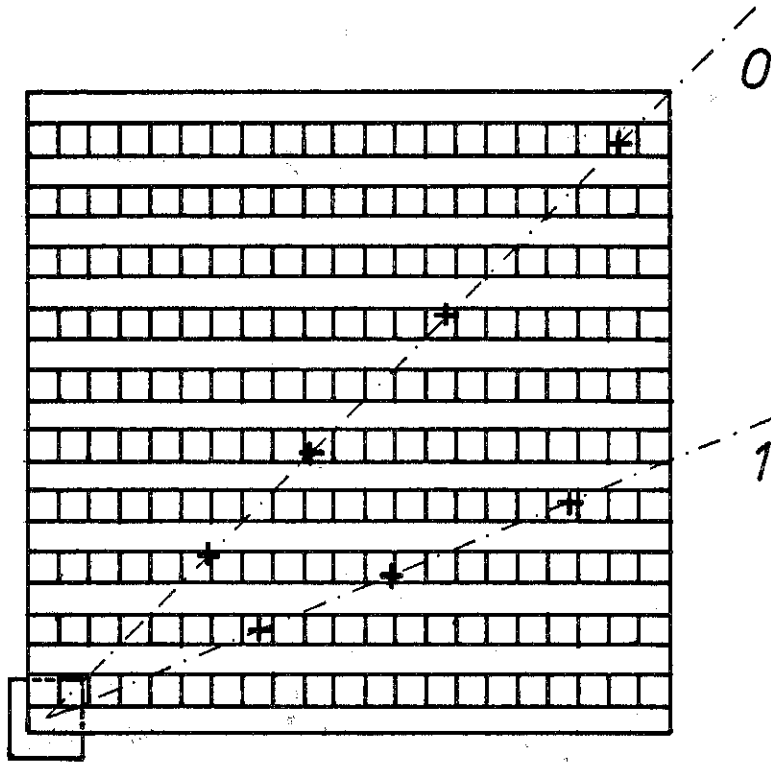


Bild 1d Verteilung der Thermoelemente in Krippen 2/1/21

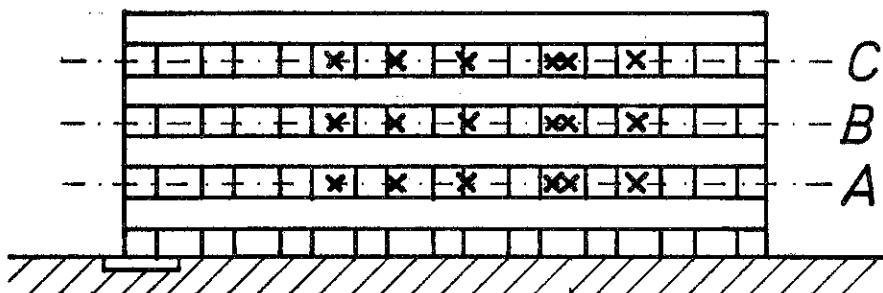
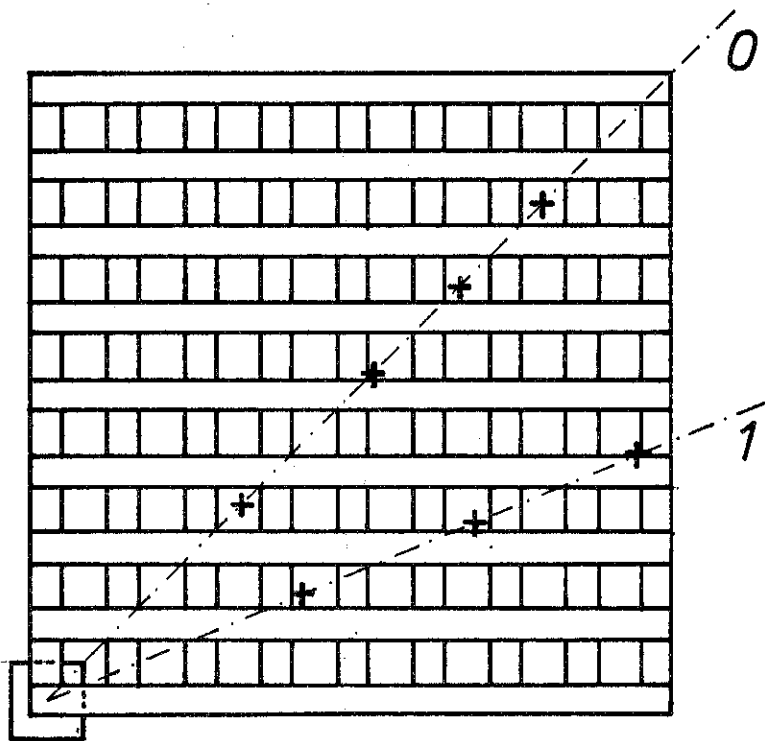


Bild 1e Verteilung der Thermoelemente in Krippen 2/1,5/21

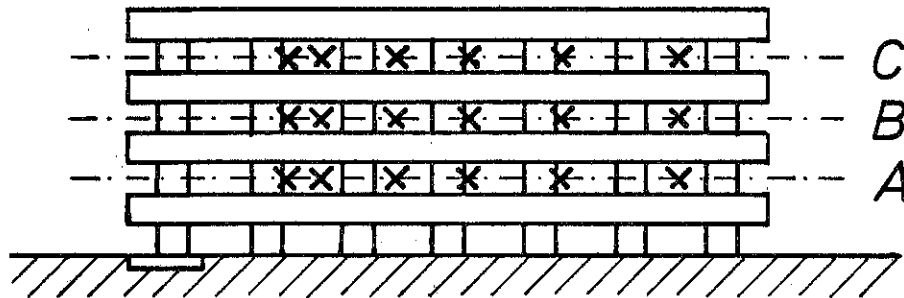
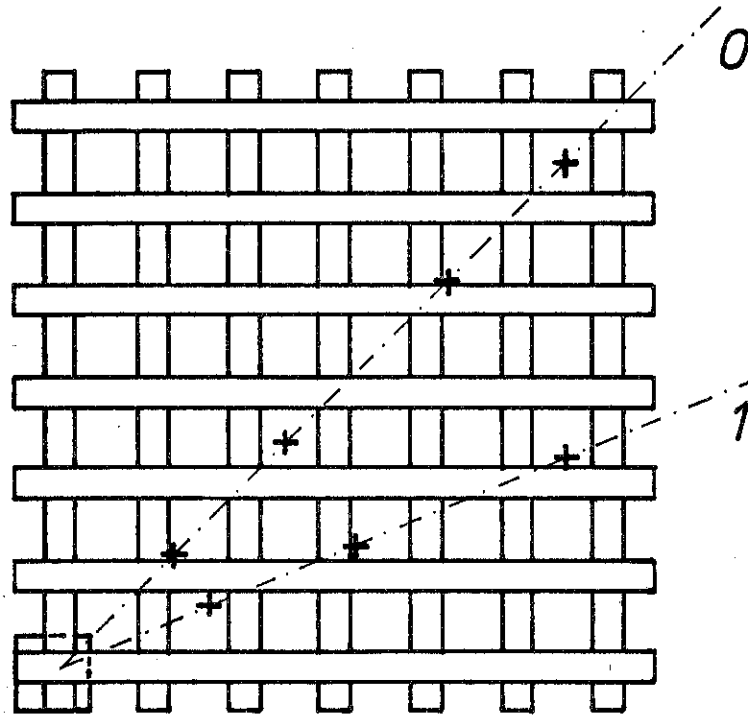


Bild 1f Verteilung der Thermoelemente in Krippen 2/2/21

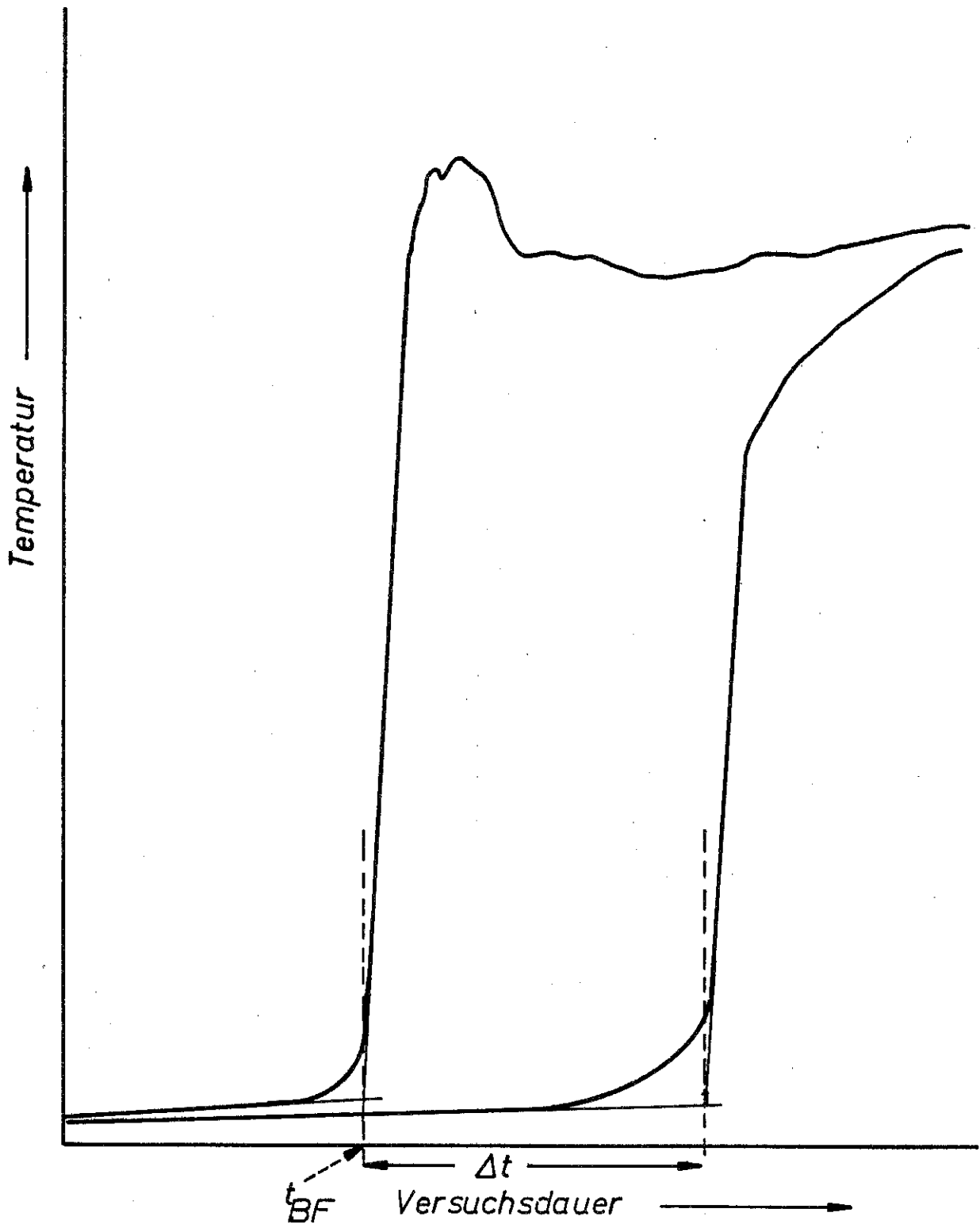


Bild 2. Bestimmung der charakteristischen Zeitdifferenz für die Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenzone



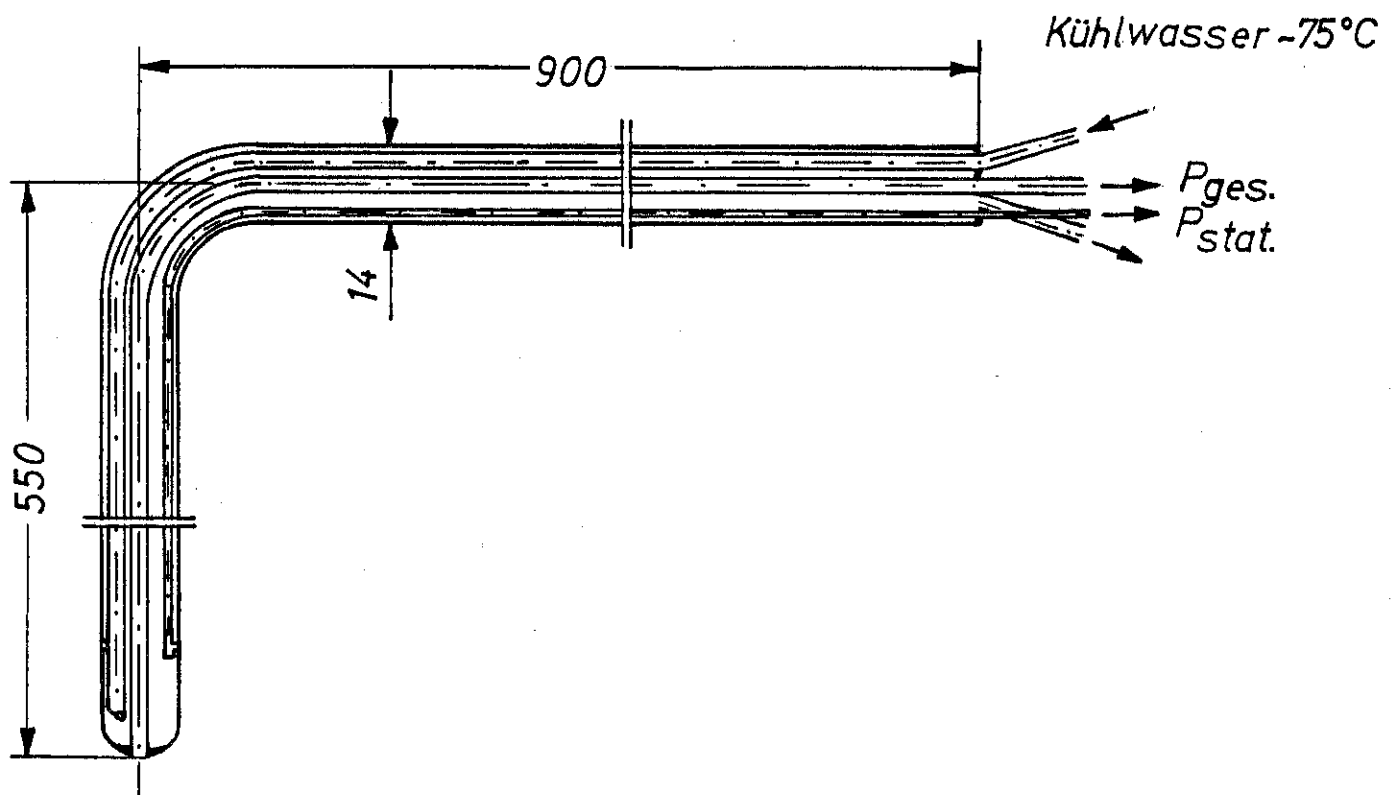
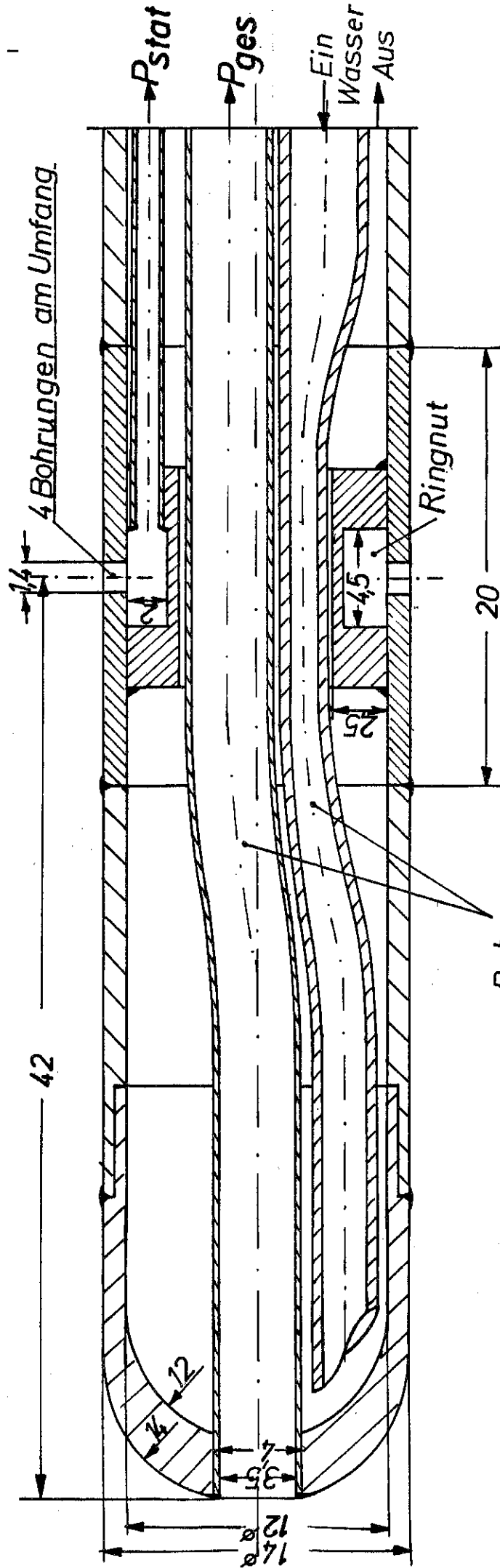


Bild 3 Abmessungen des verwendeten Prandtlrohres

Maßstab 4 : 1

# Spitze der Drucksonde



- Rohr  $P_{stat}$  :  $\emptyset 1,5 \times 0,15$
- "  $P_{ges}$  :  $\emptyset 4 \times 0,25$
- Wasser Ein :  $\emptyset 4 \times 0,5$
- " Aus :  $\emptyset 4 \times 0,25$

Bild 4 Sondenspitze des Prandtlrohres

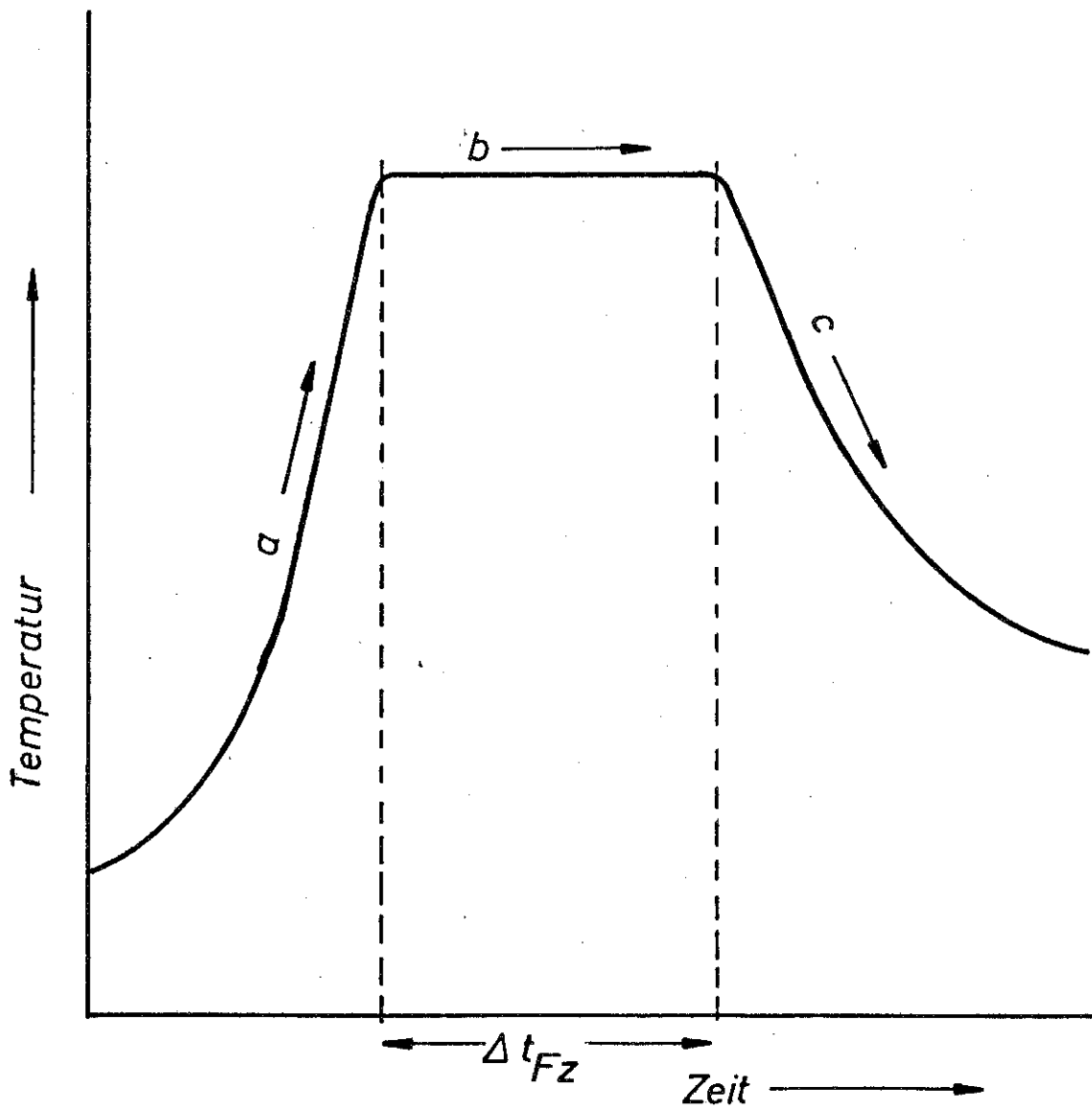


Bild 5 Zur Bestimmung der Dicke der Flammenzone

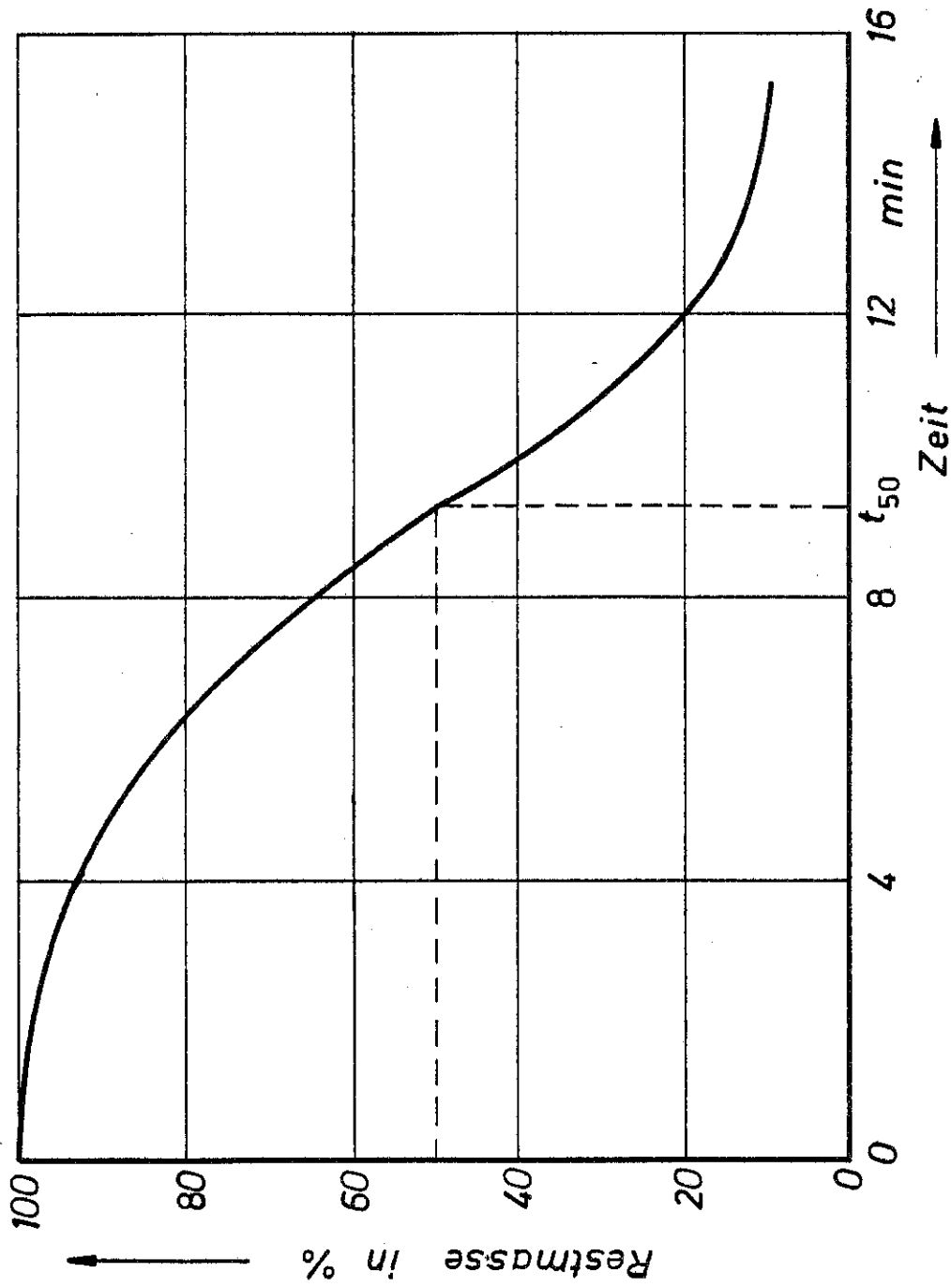


Bild 6 Zeitlicher Restmassenverlauf einer Krippe bei Eckenzündung

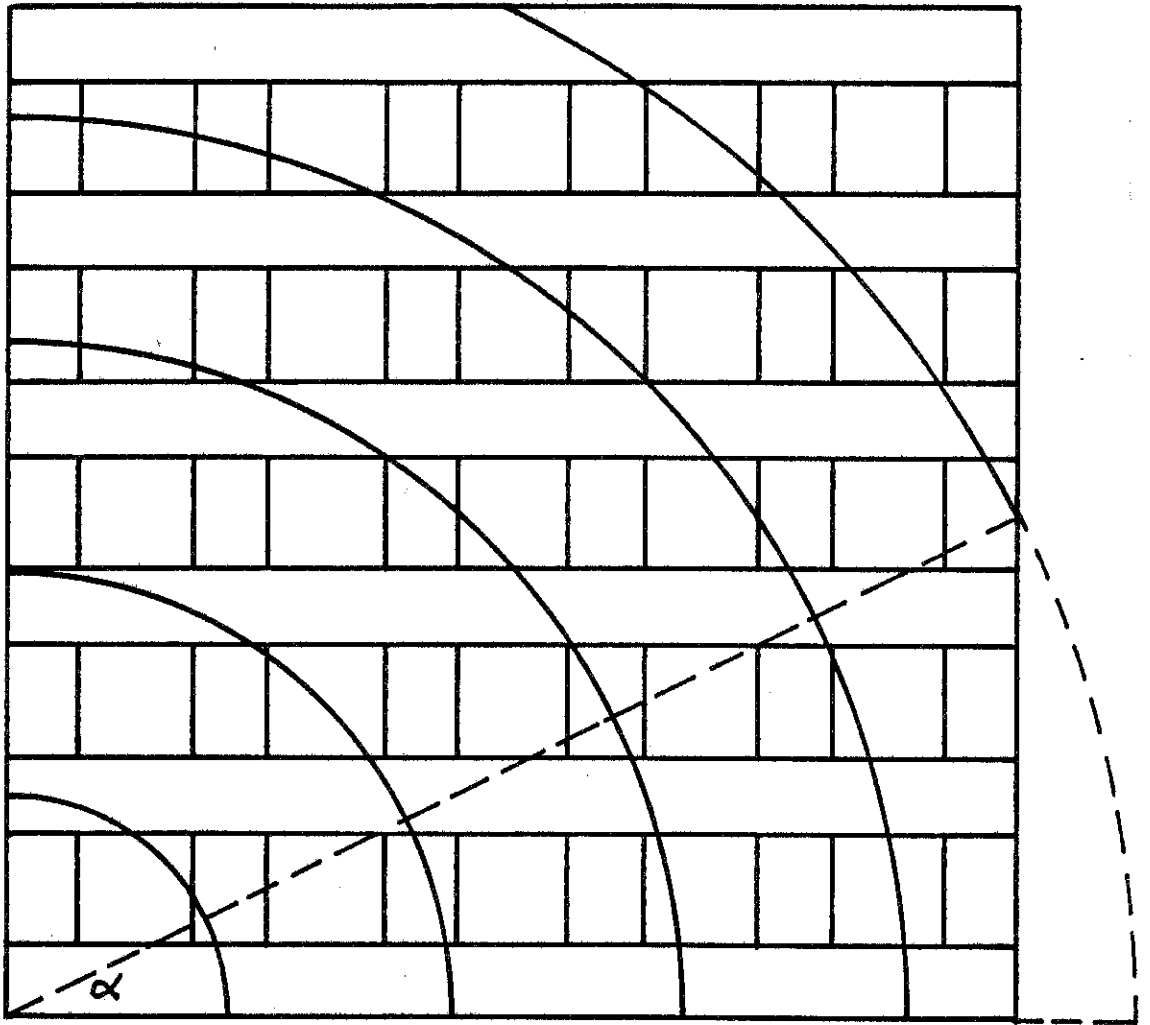


Bild 7 Zylindrische Ausbreitung der Flammenfront

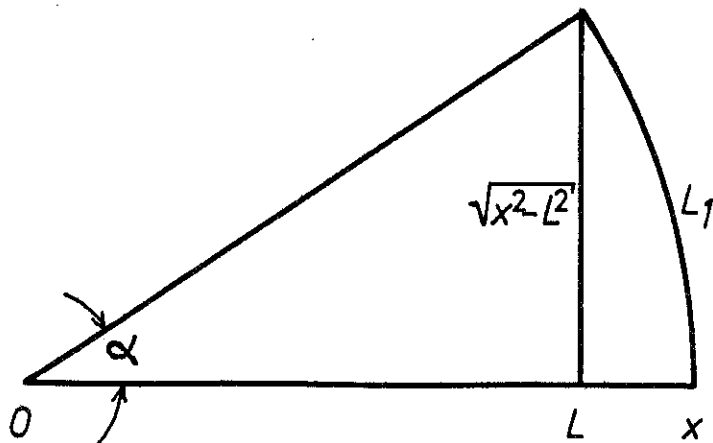


Bild 8 Zur Erklärung des Längenmaßes  $L_1$

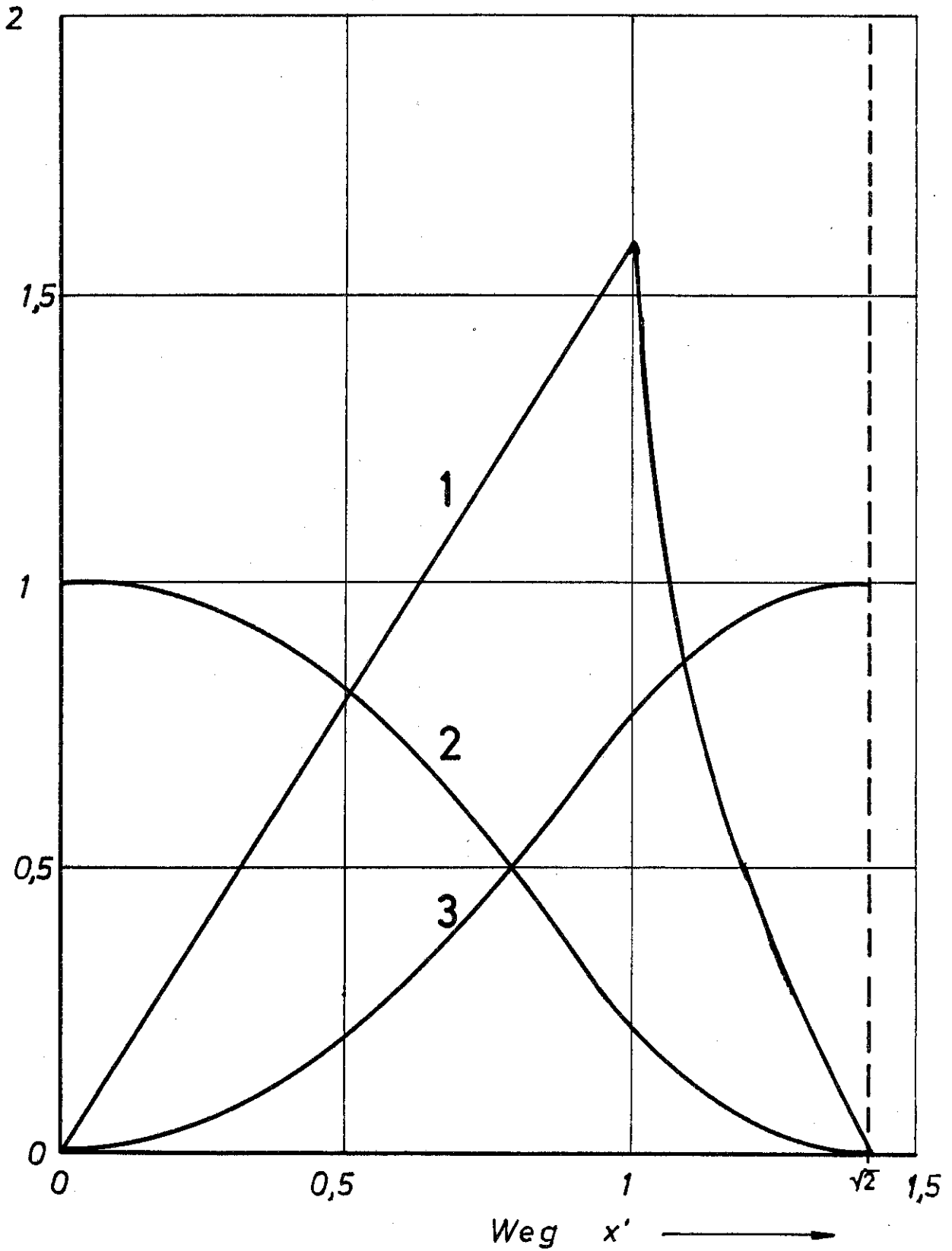


Bild 9 Darstellung der Ortsabhängigkeit von:  
 $l_F$  --- Kurve 1,  $1-F_V$  ---- Kurve 2 und  
 $F_V$  --- Kurve 3

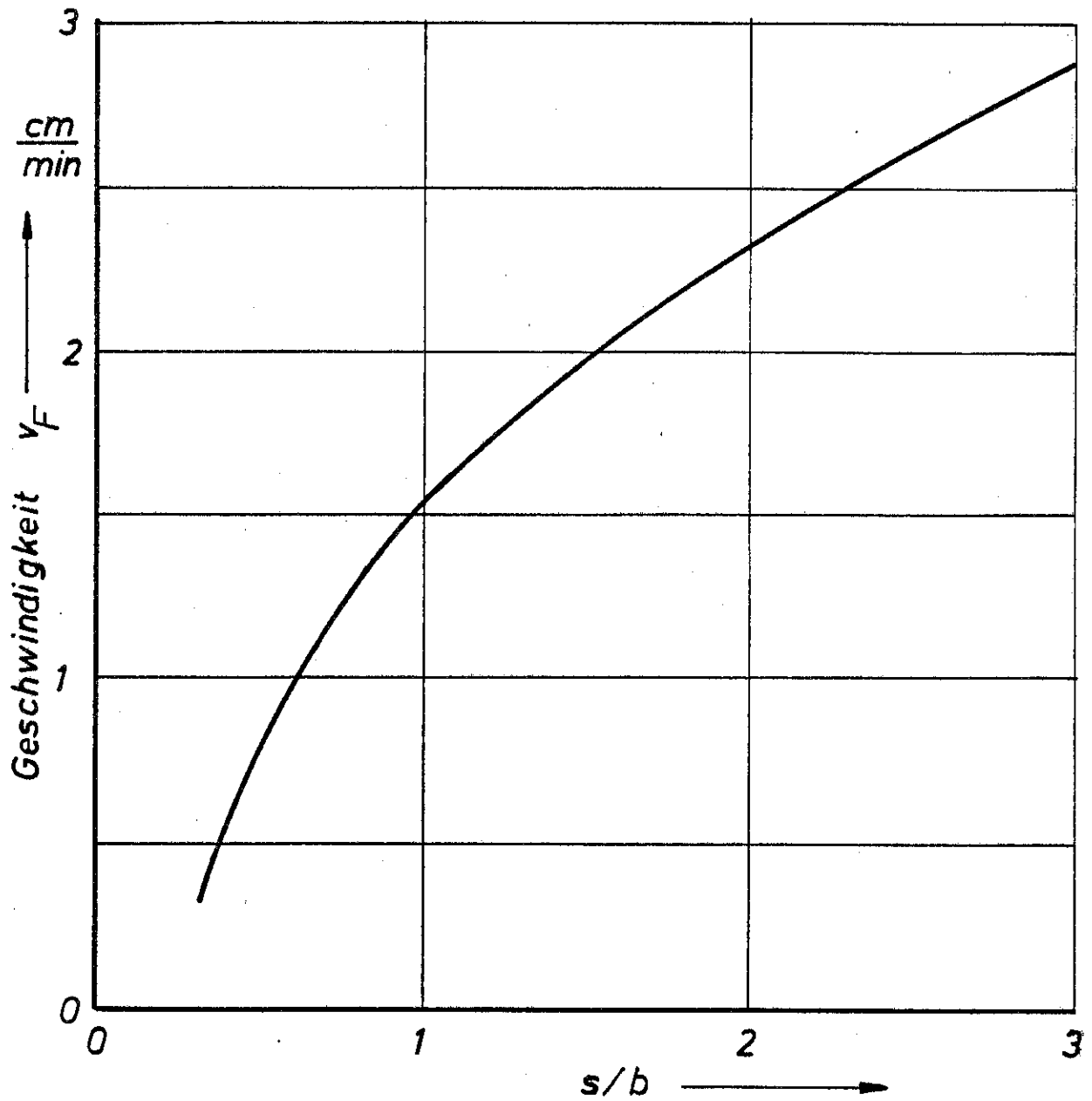


Bild 10 Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der  
Flammenfront vom Geometrieparameter  $s/b$  nach  
Messungen in [2]

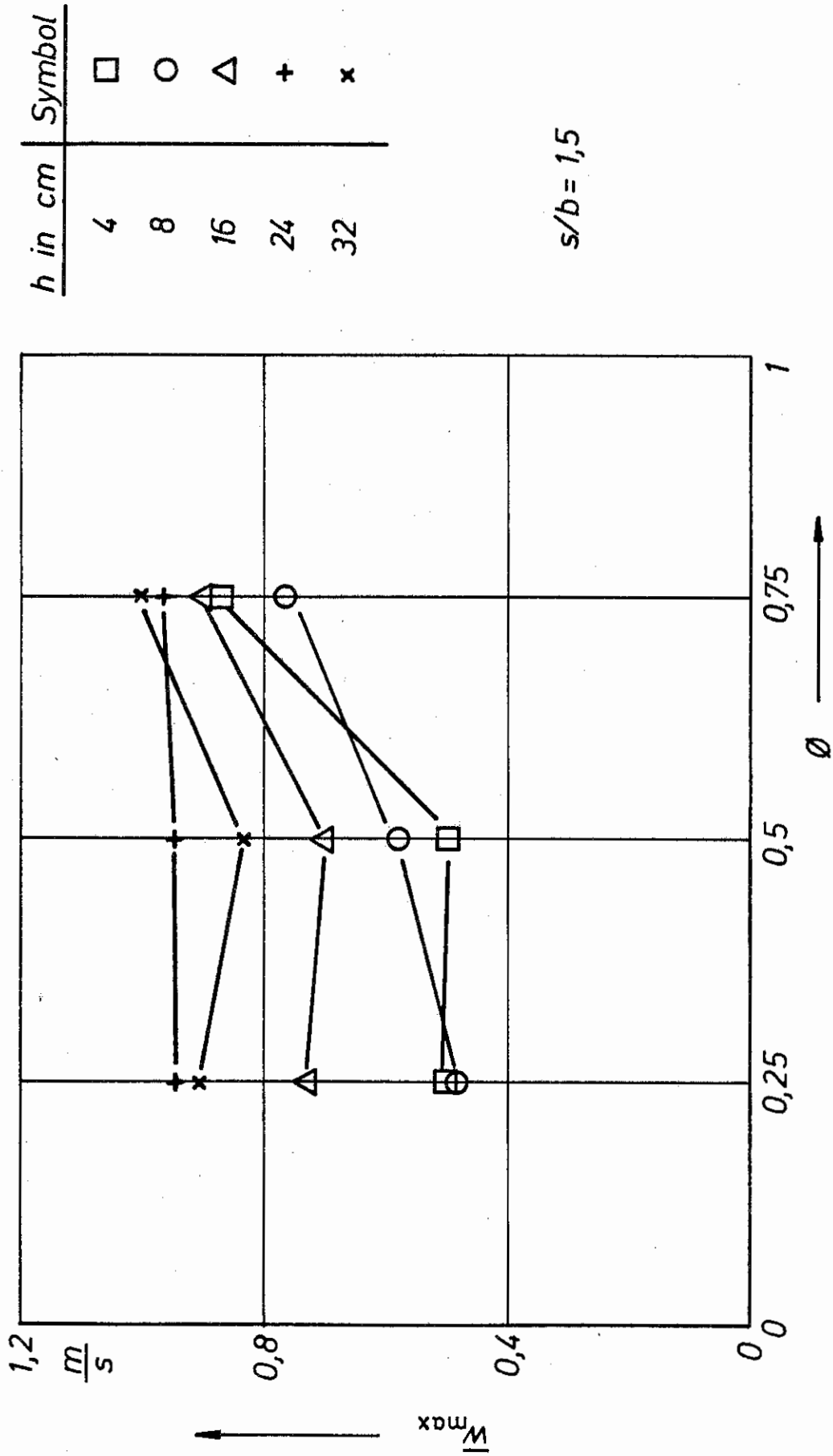
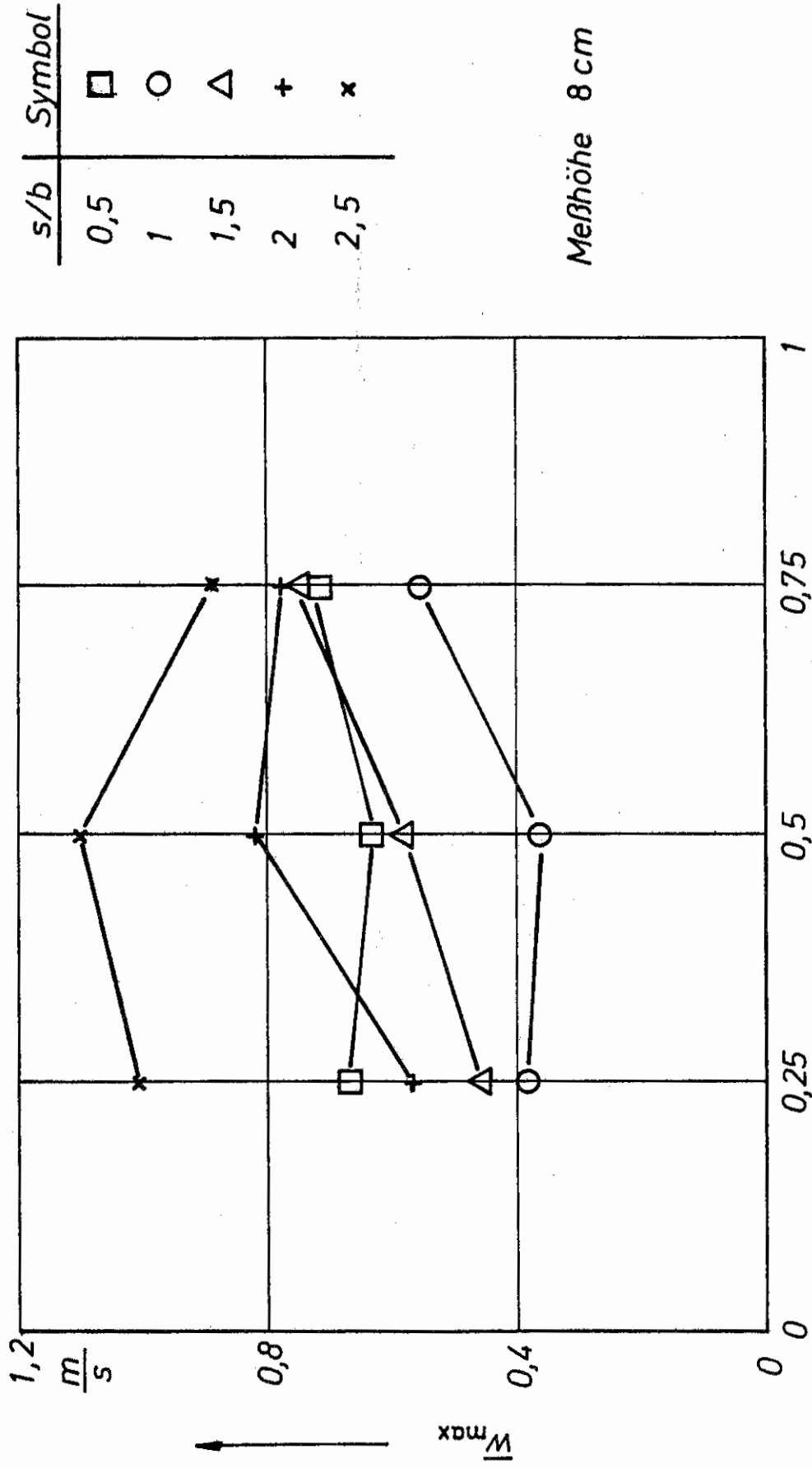


Bild 11 Querverteilung der Gasgeschwindigkeit in verschiedenen Meßhöhen über der Krippe 2/1,5/21





Messhöhe 8 cm

Bild 12 Querverteilung der Gasgeschwindigkeit bei Veränderung des Geometrieparameters  $s/b$  in der Messhöhe 8 cm

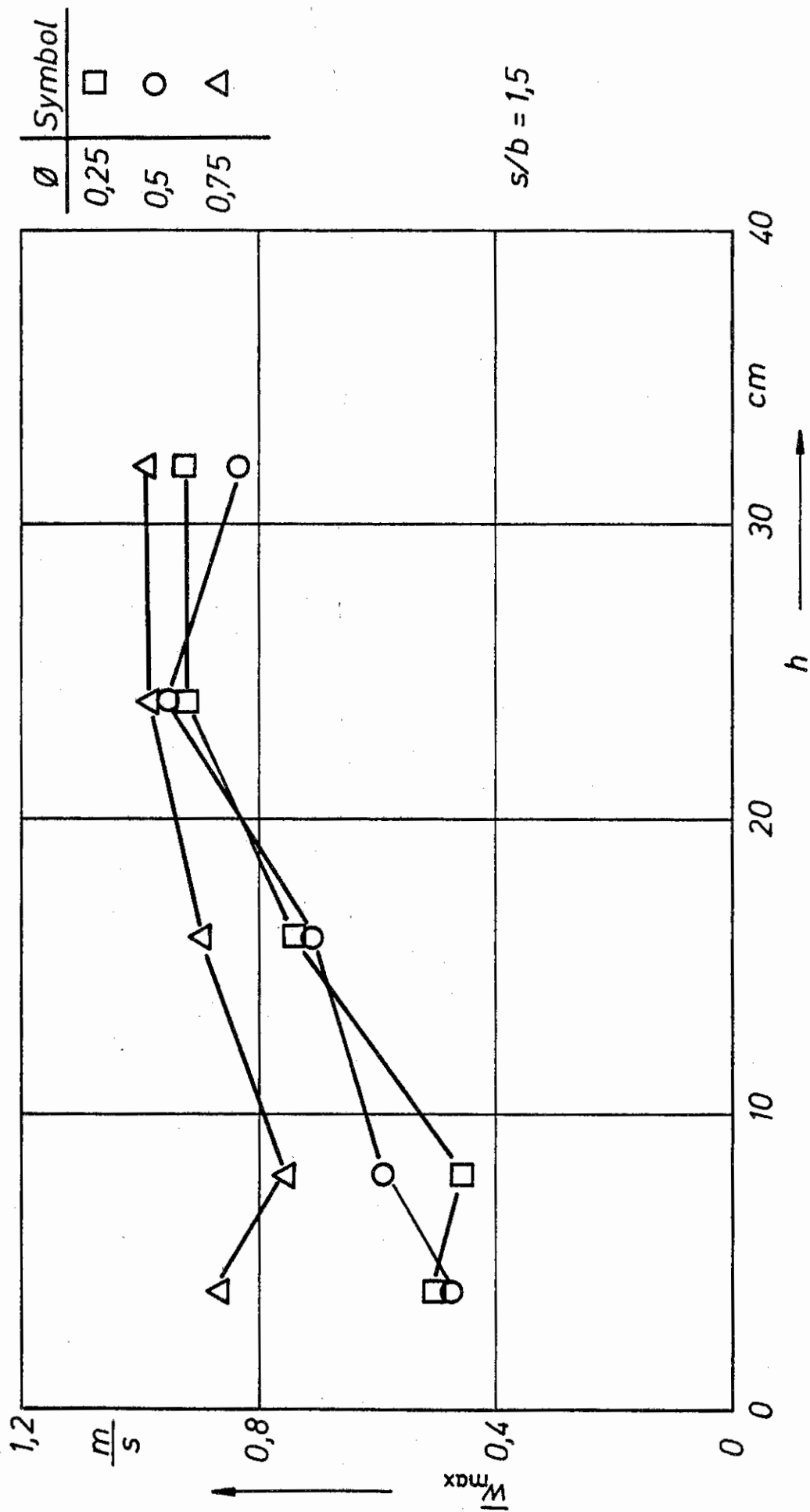


Bild 13 Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit von der Meßhöhe für verschiedene Querlagen der Sonde bei einer Krippe 2/1,5/21

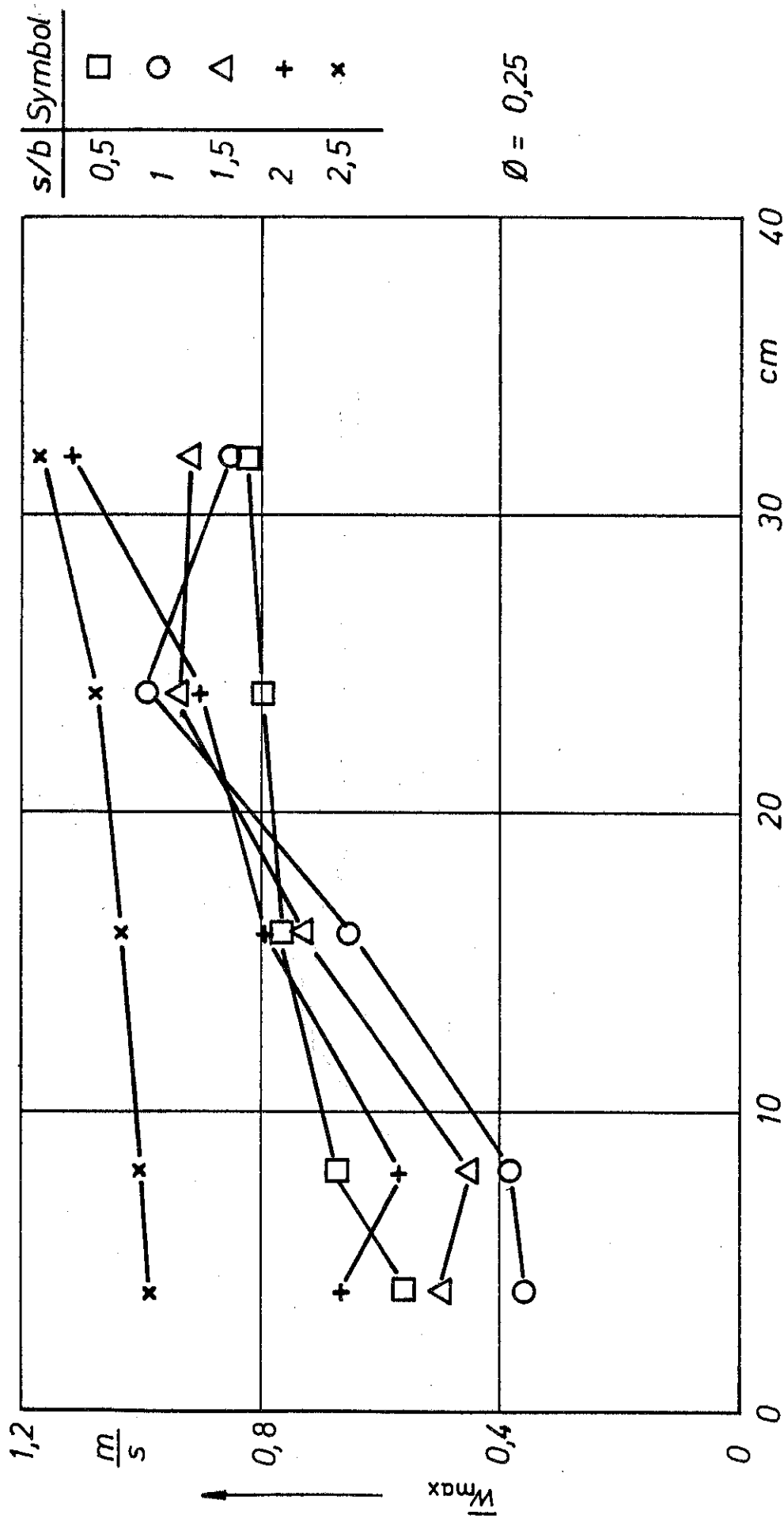


Bild 14 Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit von der Meßhöhe bei Veränderung des Geometrieparameters  $s/b$  in der Querebene  $\theta = 0,25$

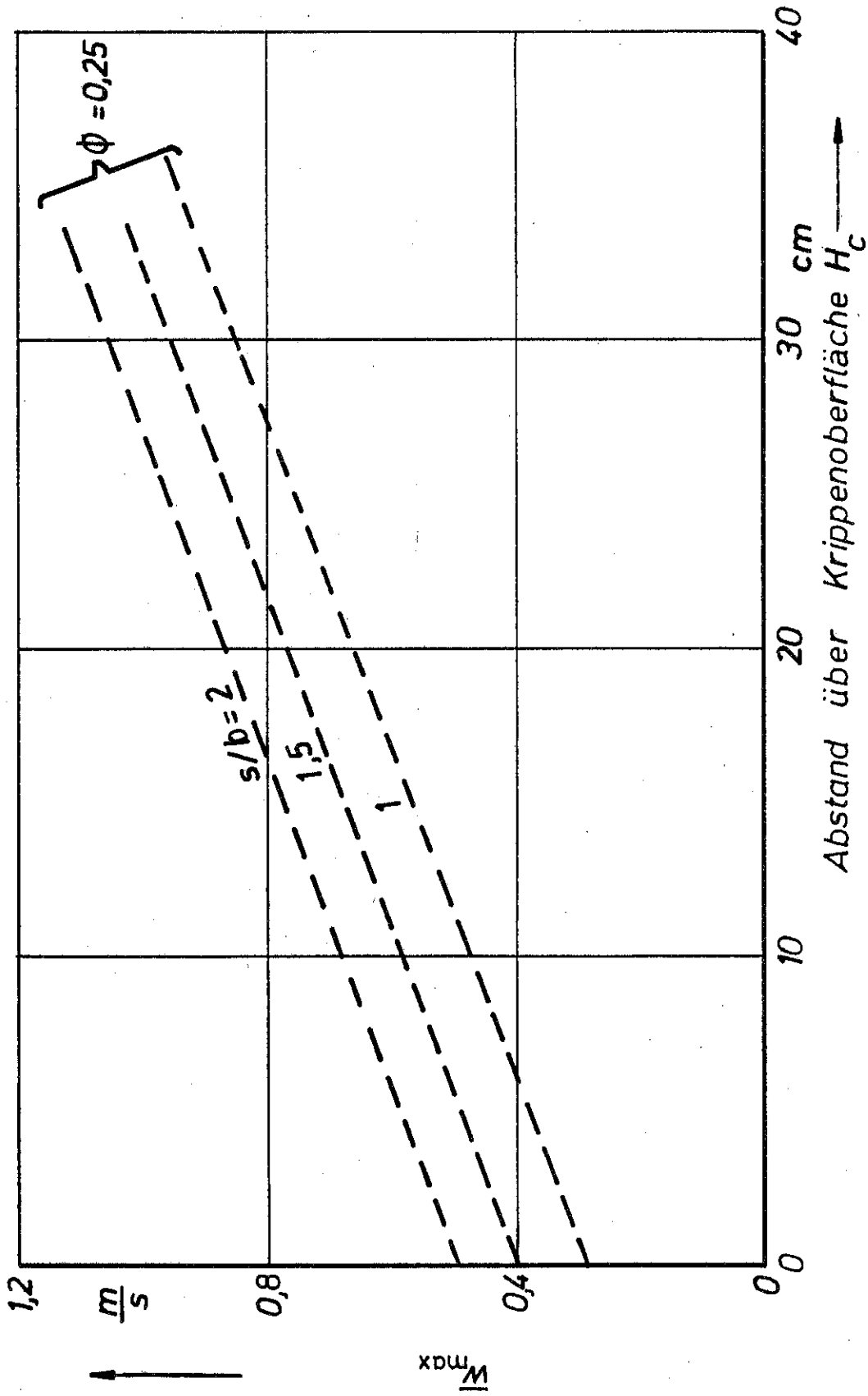


Bild 15 Ausgleichsgeraden der Messwerte aus Bild 14 für Krippen 2/1/21 bis 2/2/21

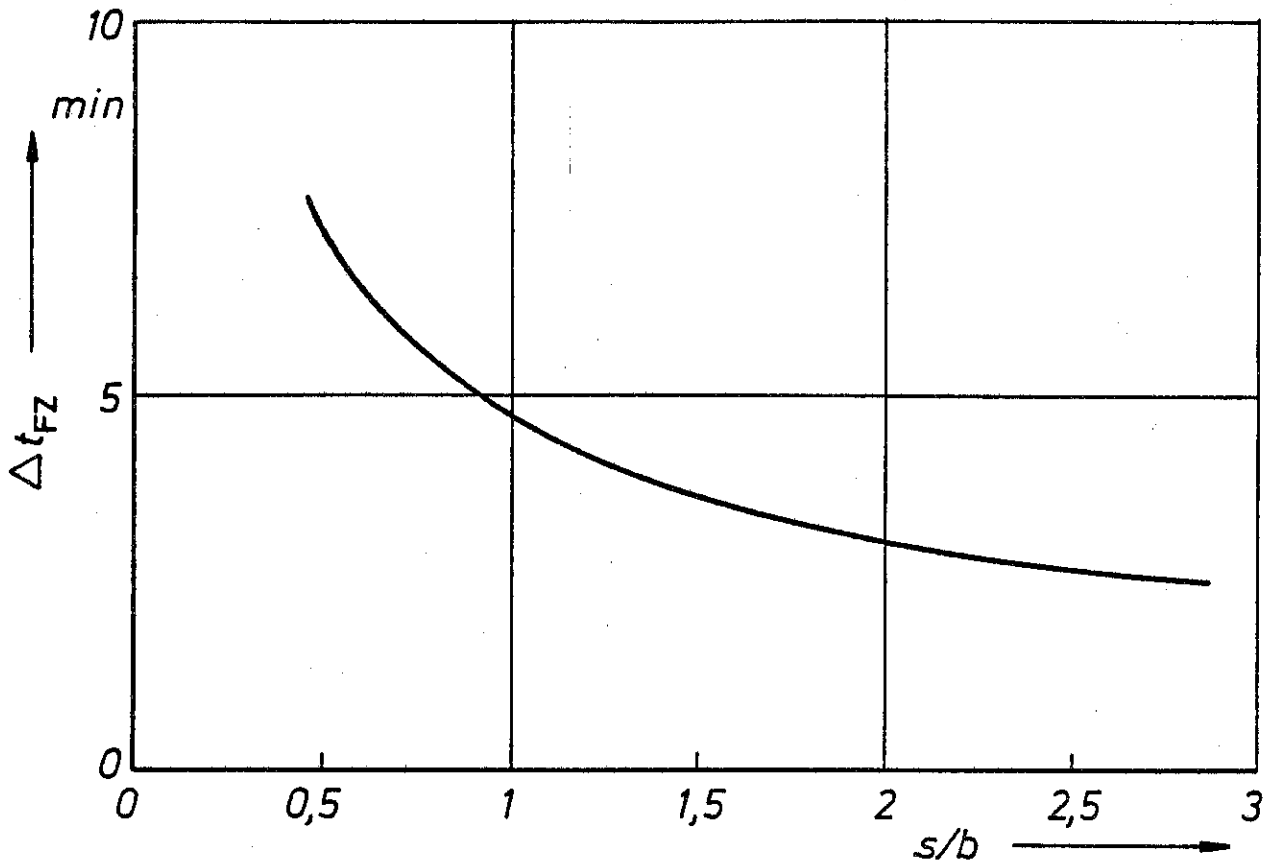


Bild 16 Abhängigkeit der Zeitdauer  $\Delta t_{FZ}$  von  $s/b$

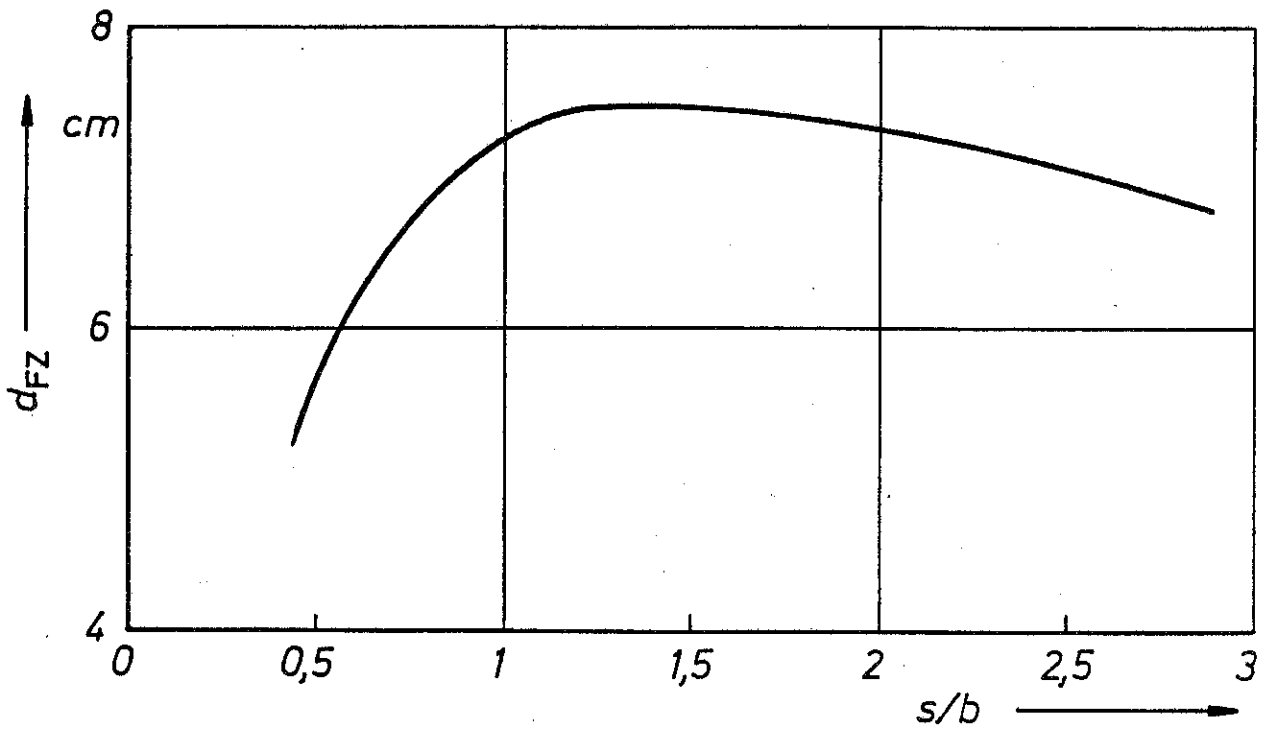


Bild 17 Abhängigkeit der Dicke der Flammenzone  $d_{FZ}$  von  $s/b$

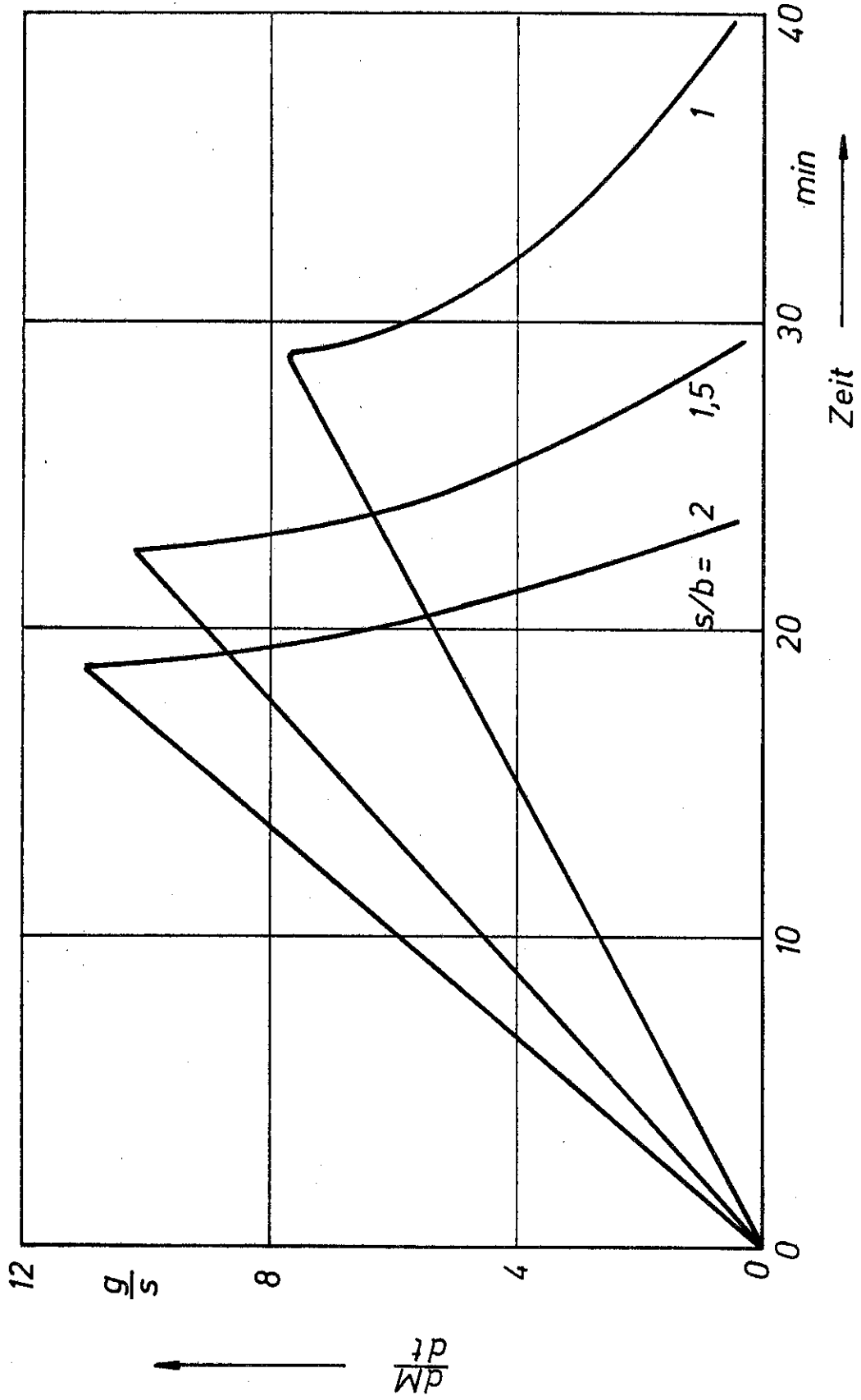


Bild 18 Zeitlicher Verlauf der Abbrandgeschwindigkeit  $\frac{dM}{dt}$  für  $s/b = 1$  bis 2

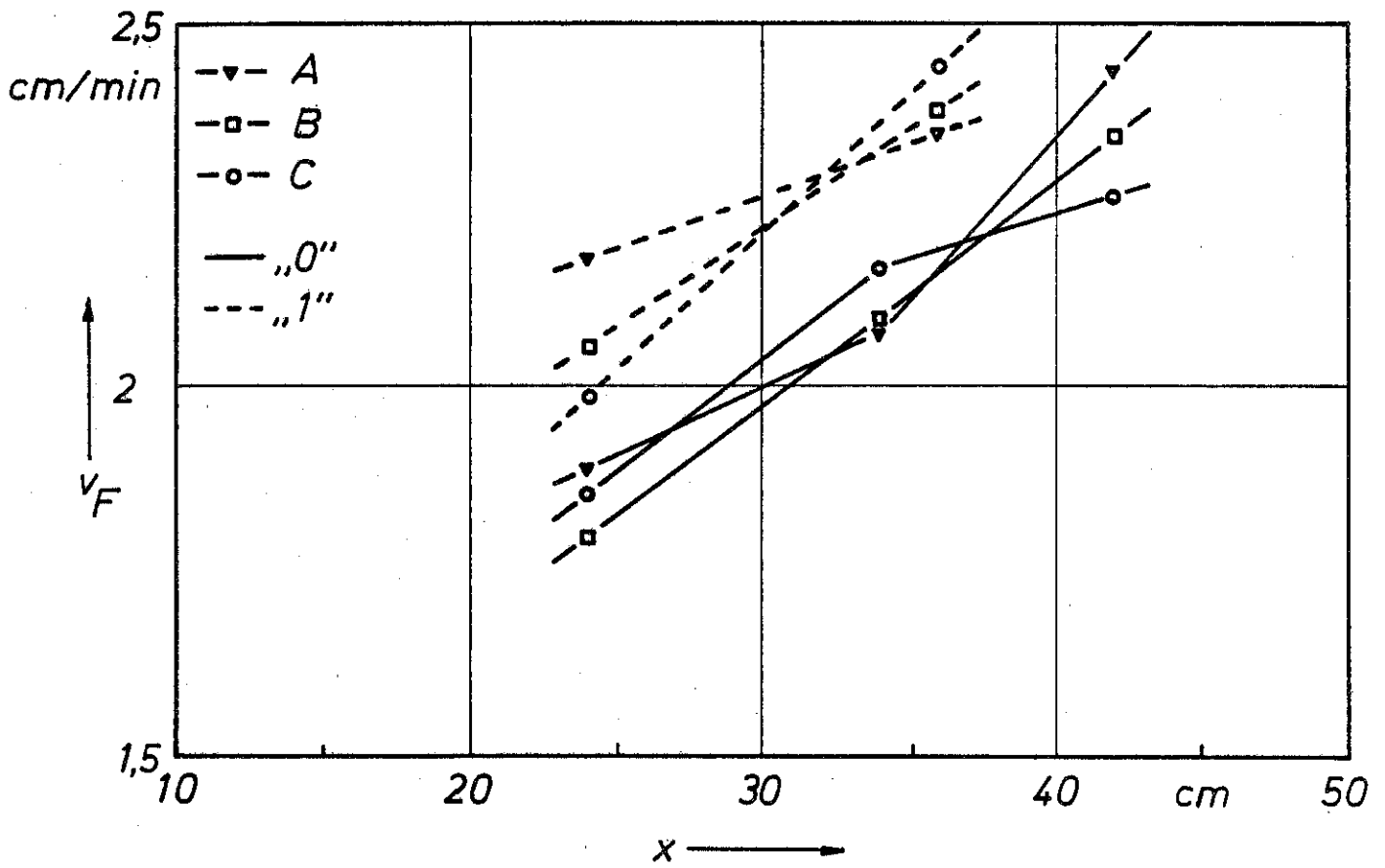


Bild 19 Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront am Beispiel der Krippe 2/1,5/21

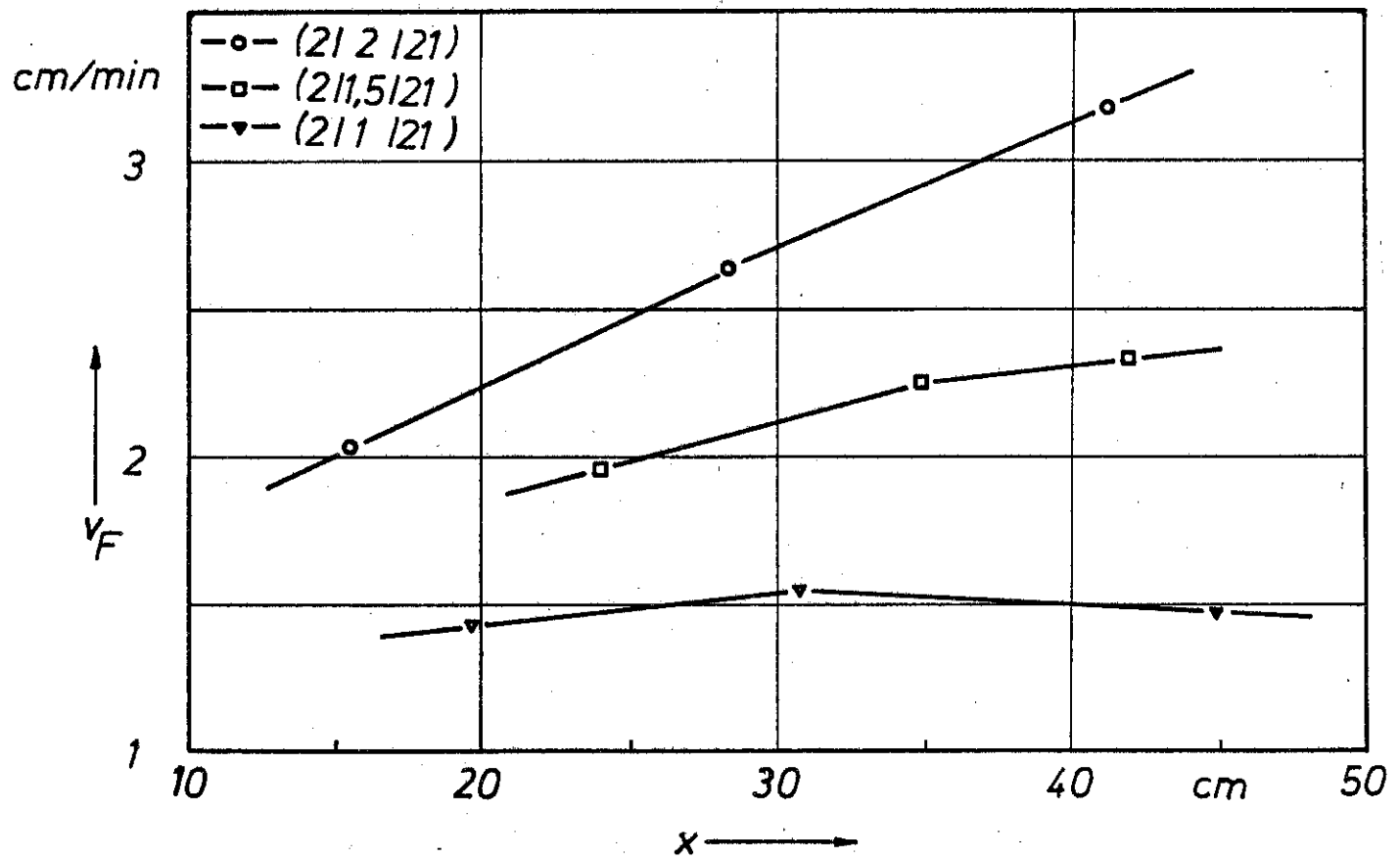


Bild 20 Mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront bei den drei untersuchten Krippen mit 2 cm Stabdicke



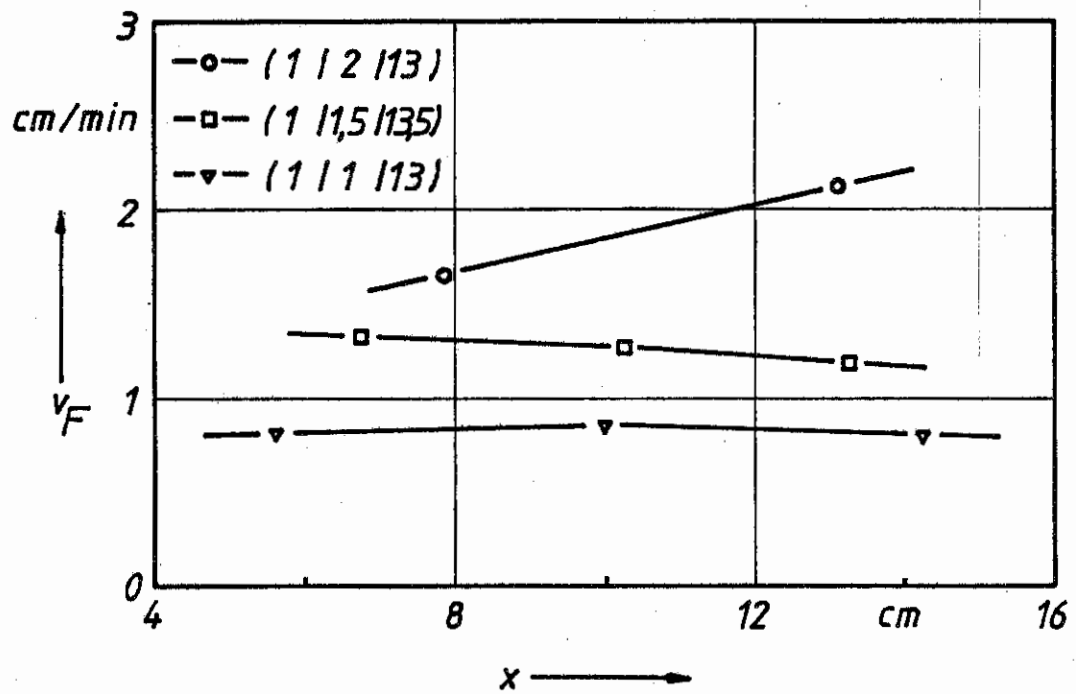
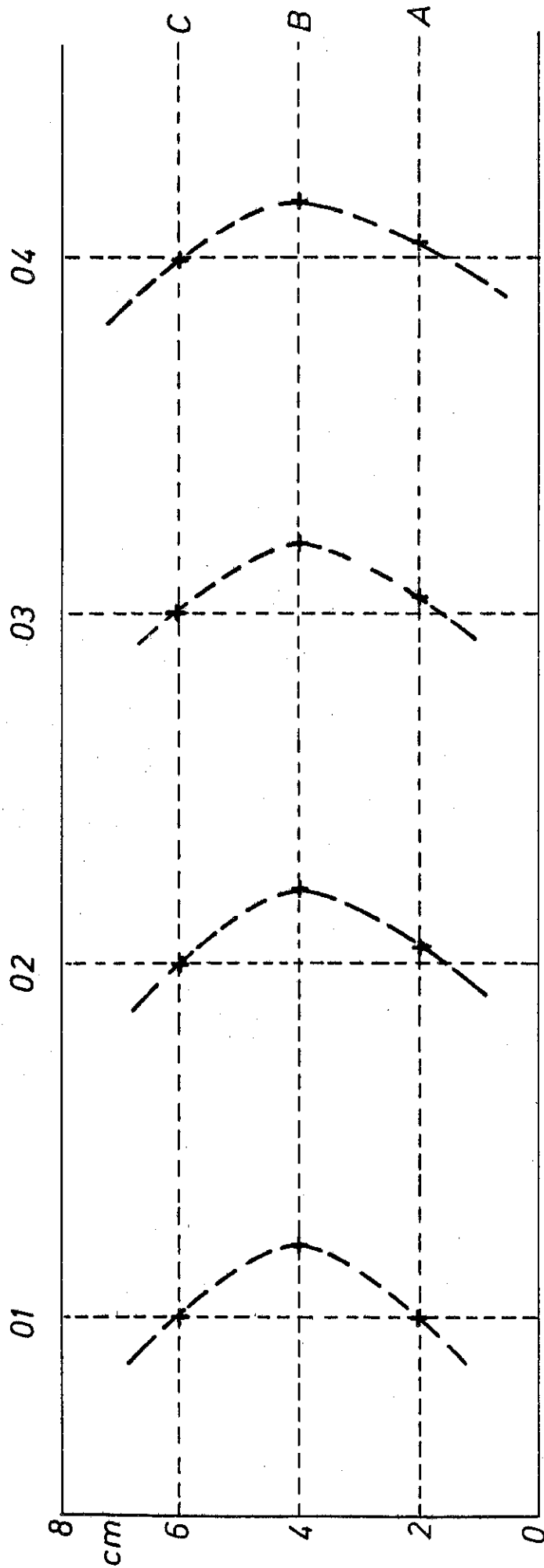
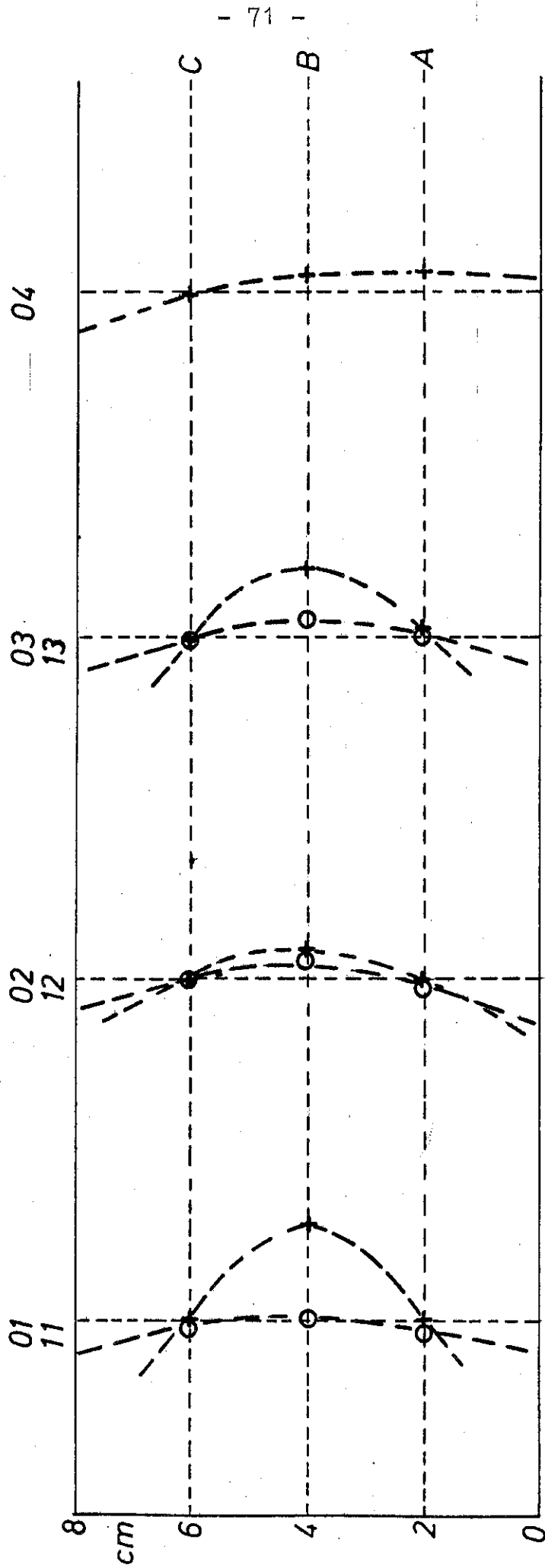


Bild 21 Mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der  
Flammenfront bei den drei untersuchten  
Krippen mit 1 cm Stabdicke



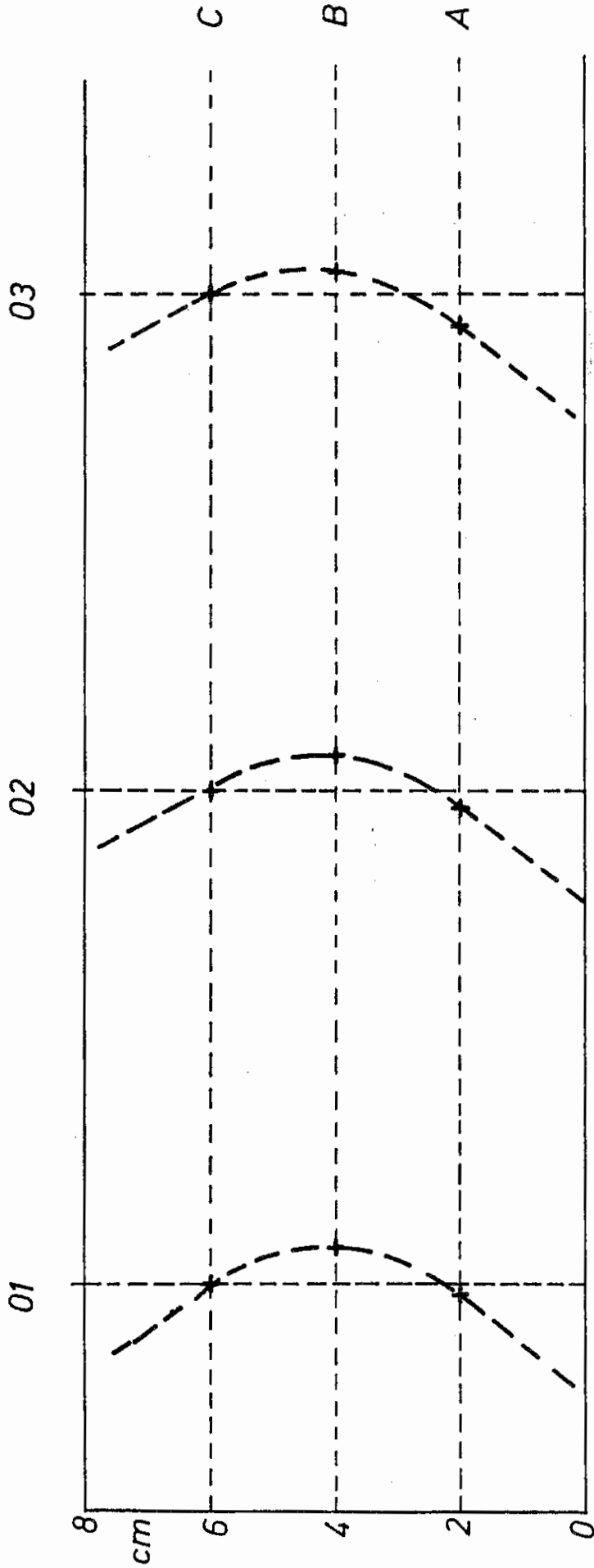
Krippe (1/1/13)

Bild 22a Abweichung der Kontur der Flammenfront von der Zylinderform bei den Krippen 1/1/13  
\* Pos. 01 bis 04



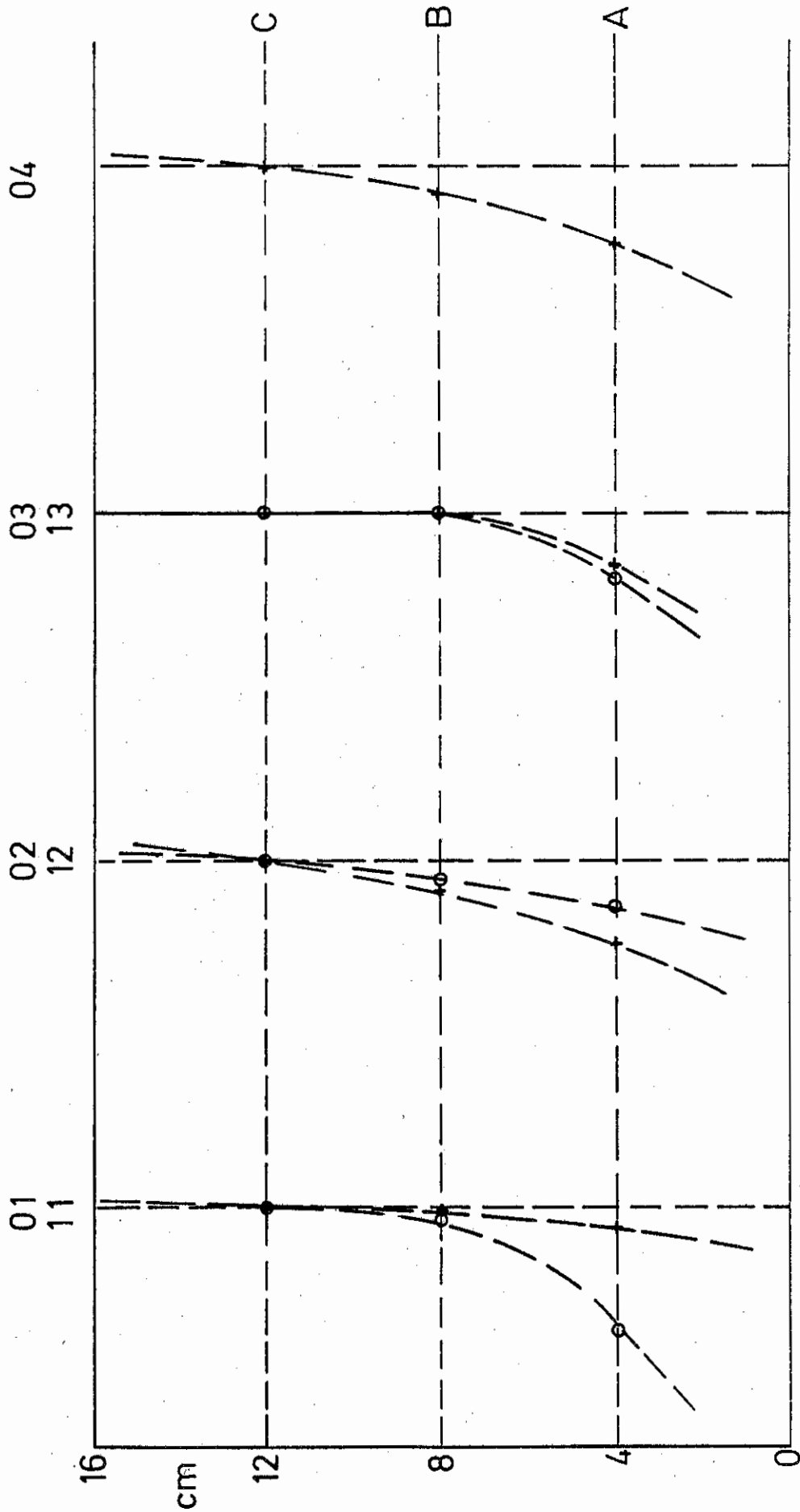
Krippe (11,5/13,5)

Bild 22b Abweichung der Kontur der Flammenfront von der Zylinderform bei den Krippen 1/1,5/13,5  
 + Pos. 01 bis 04 , o Pos. 11 bis 13

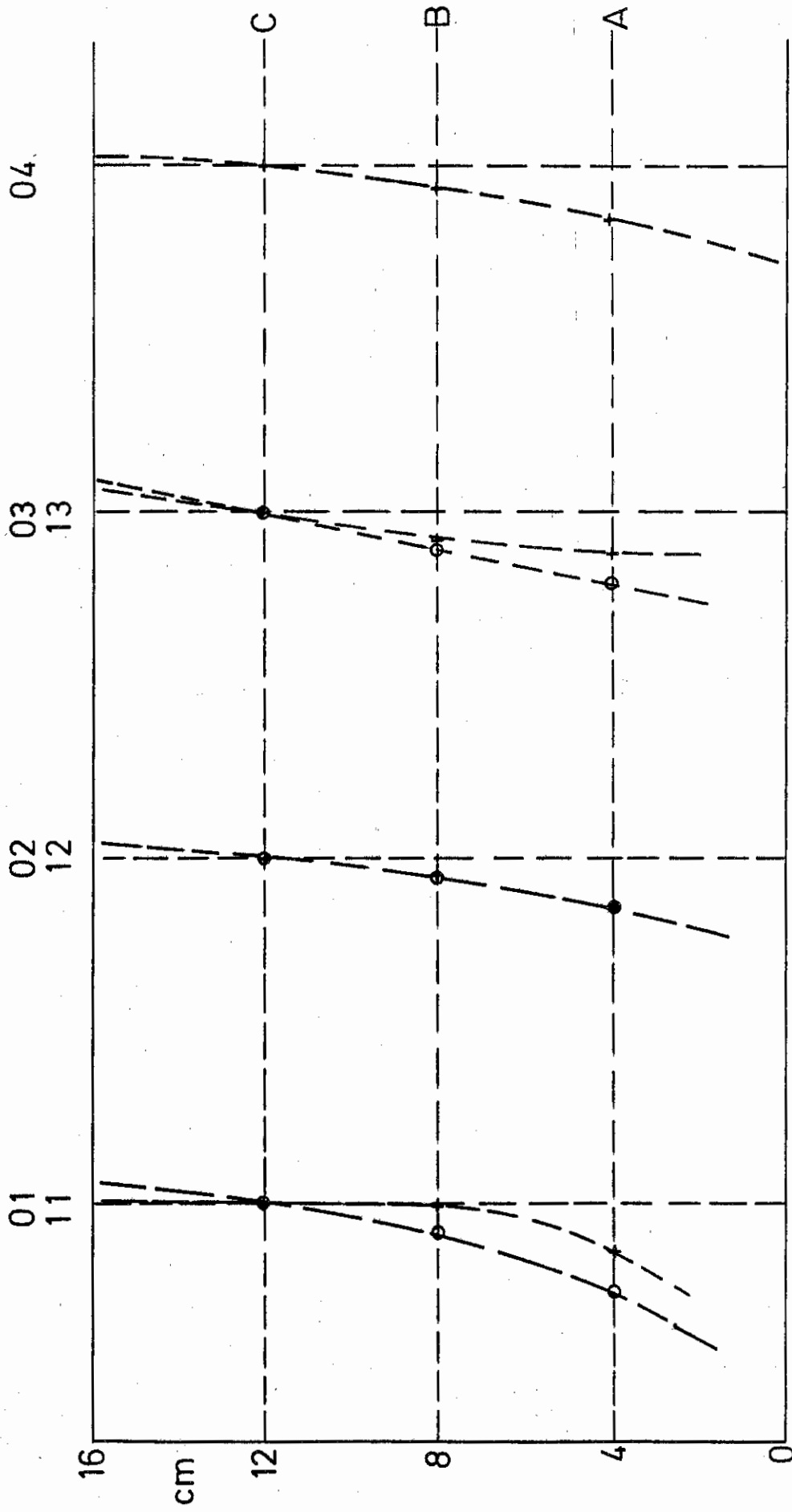


*Krippe (1/2/13)*

Bild 22c Abweichung der Kontur der Flammenfront von der Zylinderform bei den Krippen 1/2/13 + Pos. 01 bis 03

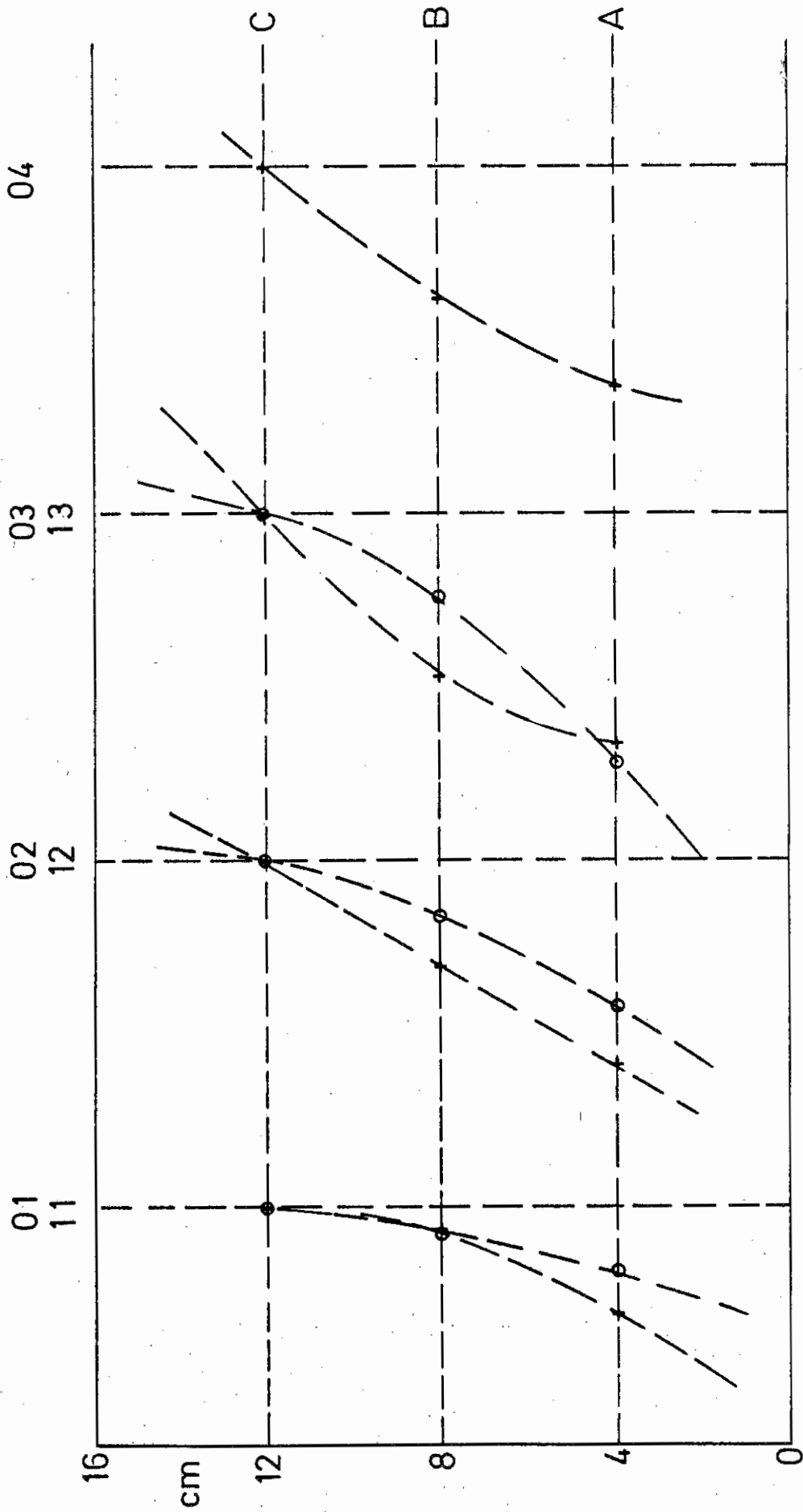


Krippe (2/1/21)  
Bild 22d Abweichung der Kontur der Flammenfront von der Zylinderform bei den Krippen 2/1/21  
+ Pos. 01 bis 04 , o Pos. 11 bis 13



Krippe (2/1,5/21)

Bild 22e Abweichung der Kontur der Flammenfront von der Zylinderform bei den Krippen 2/1,5/21 + Pos. 01 bis 04 , o Pos. 11 bis 13



Krippe (2/2/21)  
Bild 22f. Abweichung der Kontur der Flammenfront von der Zylinderform bei den Krippen 2/2/21  
+ Pos. 01 bis 04 ; o Pos. 11 bis 13

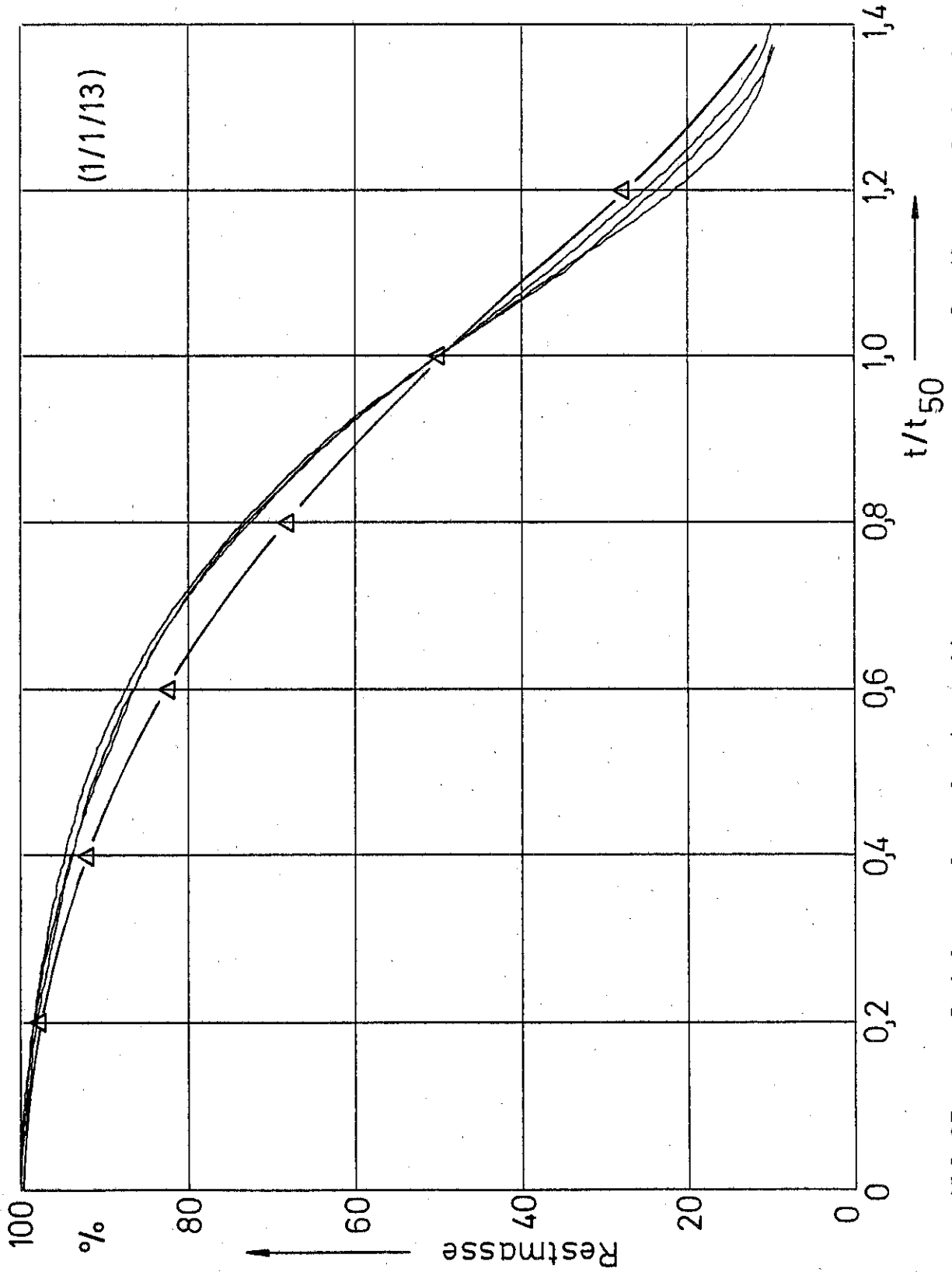


Bild 23a Vergleich von berechneten mit gemessenen Massenverlustkurven bei Eckenzündung von Krippen 1/1/13. Berechnung mit  $v_{F, const.}$  ( $\Delta$ )



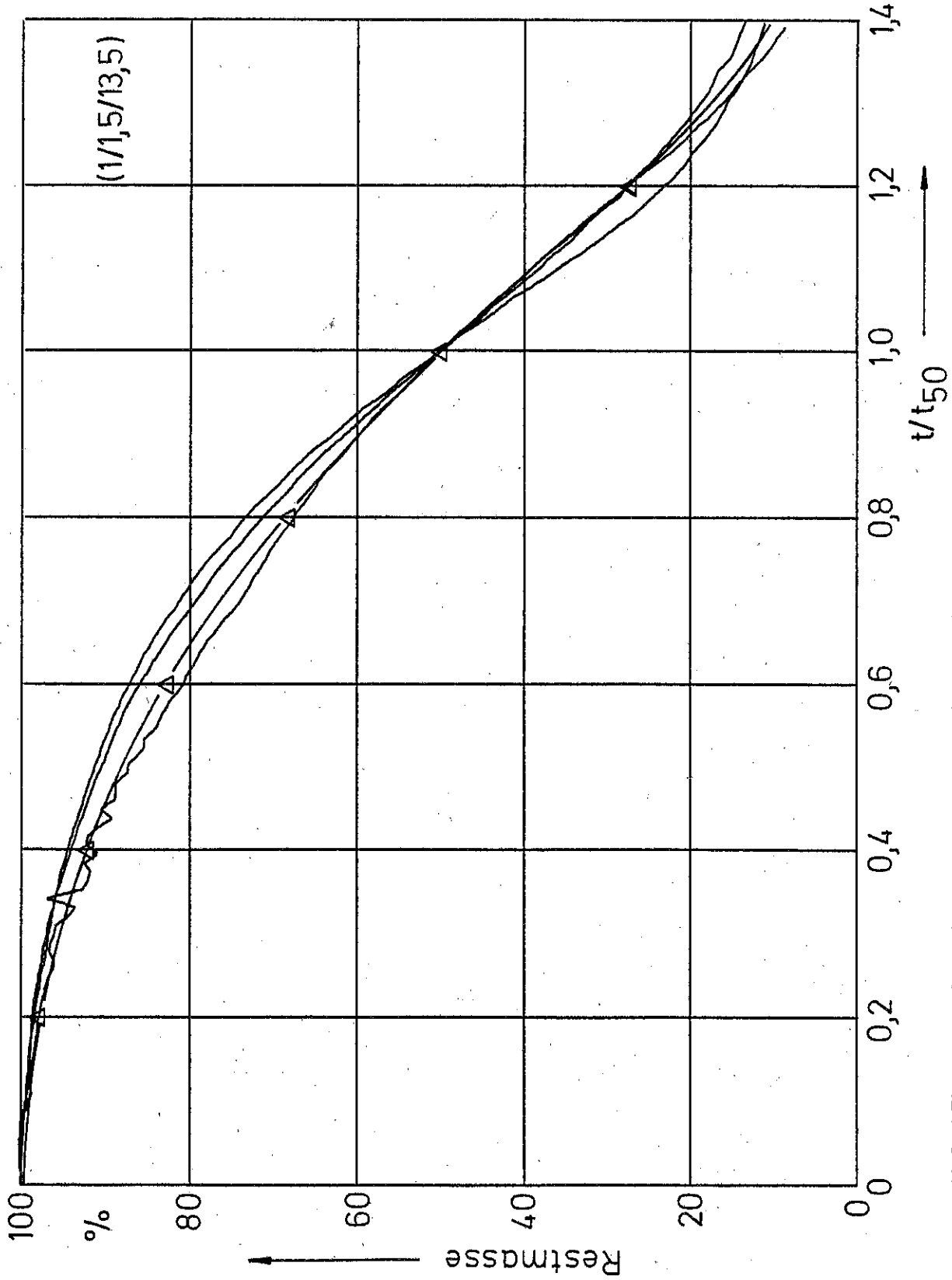


Bild 23b Vergleich von berechneten mit gemessenen Massenverlustkurven bei Eckenzündung von Krippen 1/1,5/13,5 . Berechnung mit  $v_{F, const.}$  ( $\Delta$ )

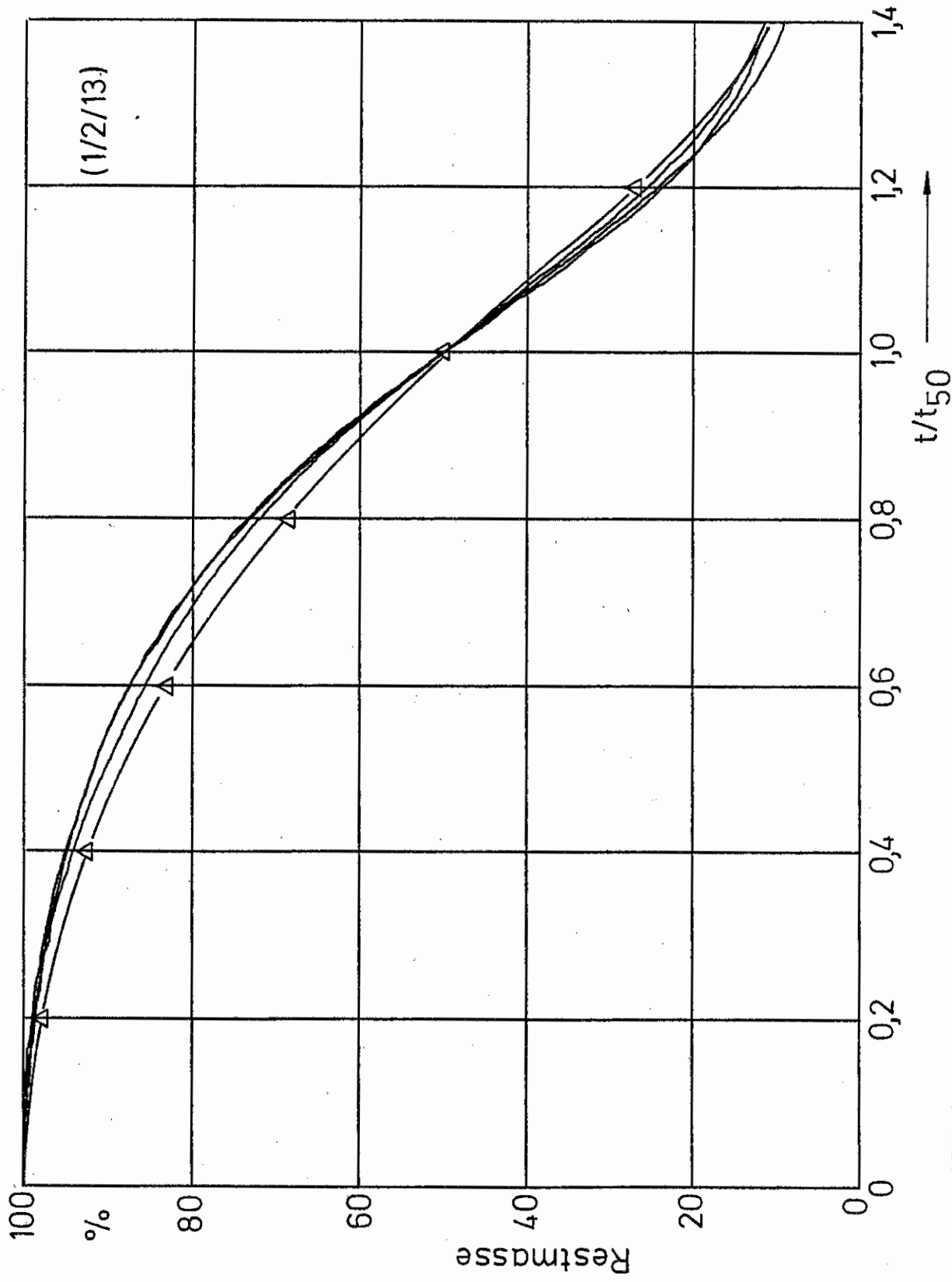


Bild 23c Vergleich von berechneten mit gemessenen Massenverlustkurven bei Eckenzündung von Krippen 1/2/13. Berechnung mit  $v_{F, const.}$  ( $\Delta$ )

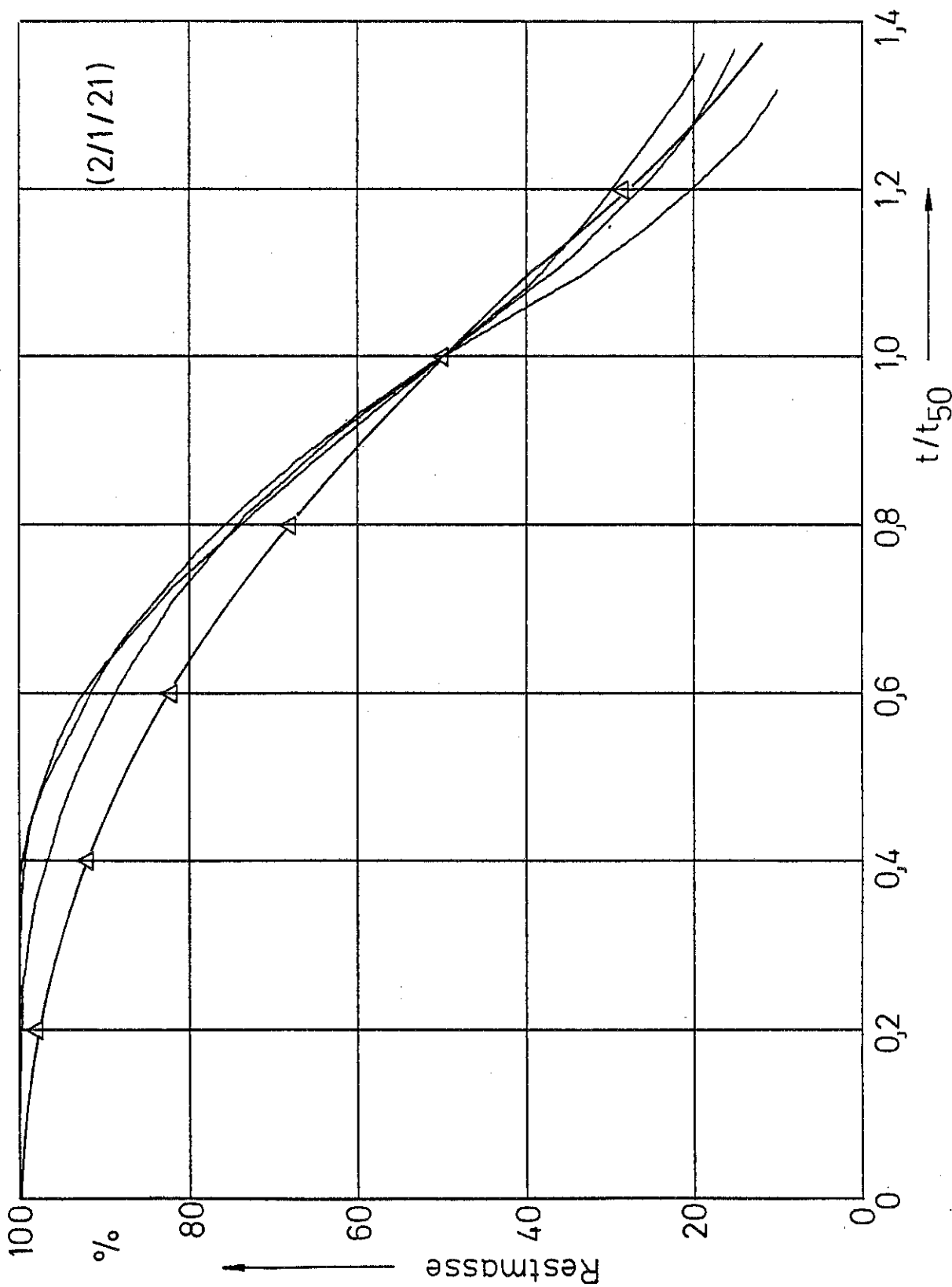


Bild 23d Vergleich von berechneten mit gemessenen Massenverlustkurven bei Eckenzündung von Krippen 2/1/21. Berechnung mit  $v_F, const.$  identisch mit  $v_F(x)$ . ( $\Delta$ )

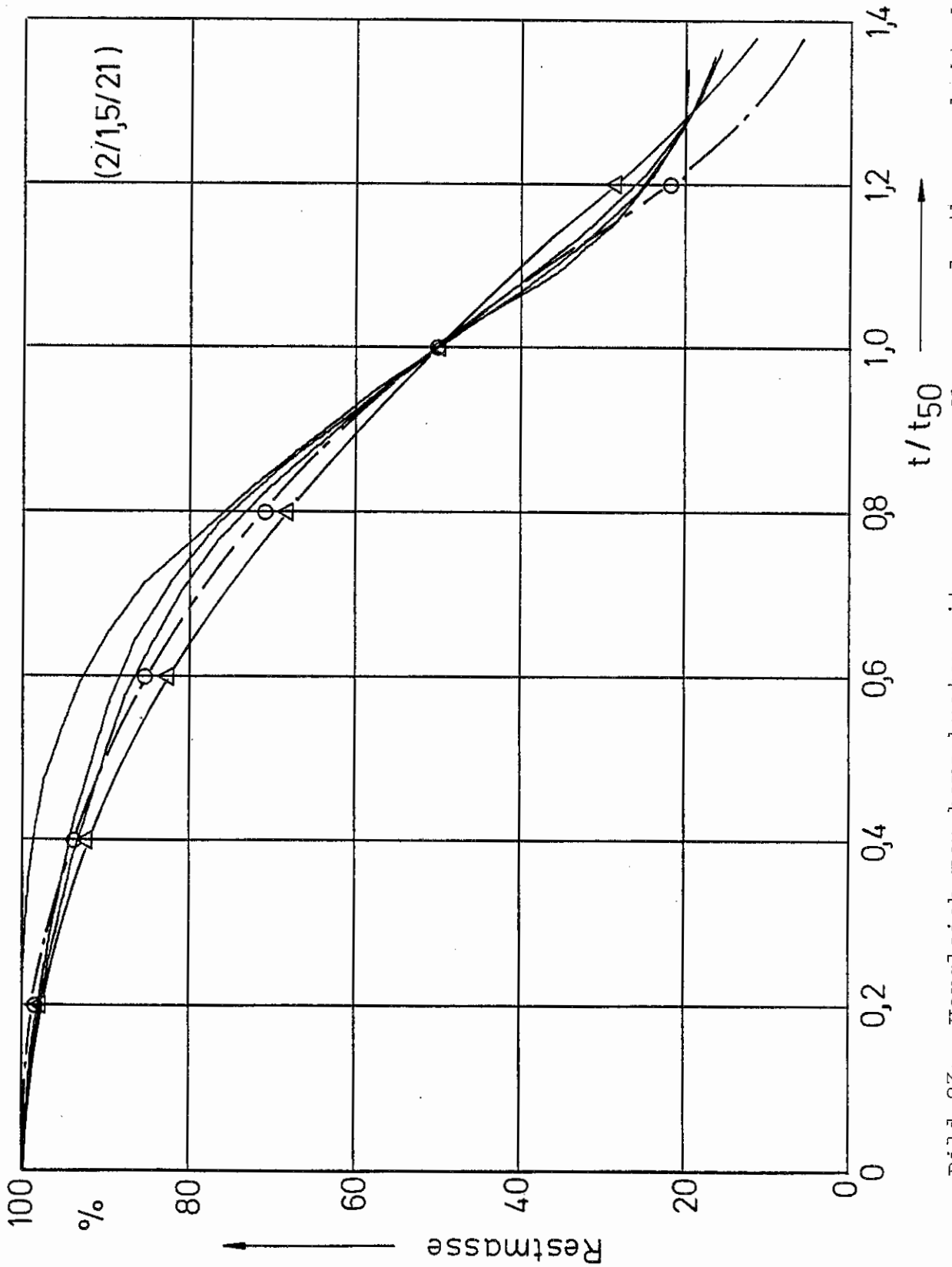


Bild 23c Vergleich von berechneten mit gemessenen Massenverlustkurven bei Eckenzündung von Krippen 2/1,5/21 . Berechnung mit  $v_F$ , const. (Δ) und  $v_F(x)$  (o)

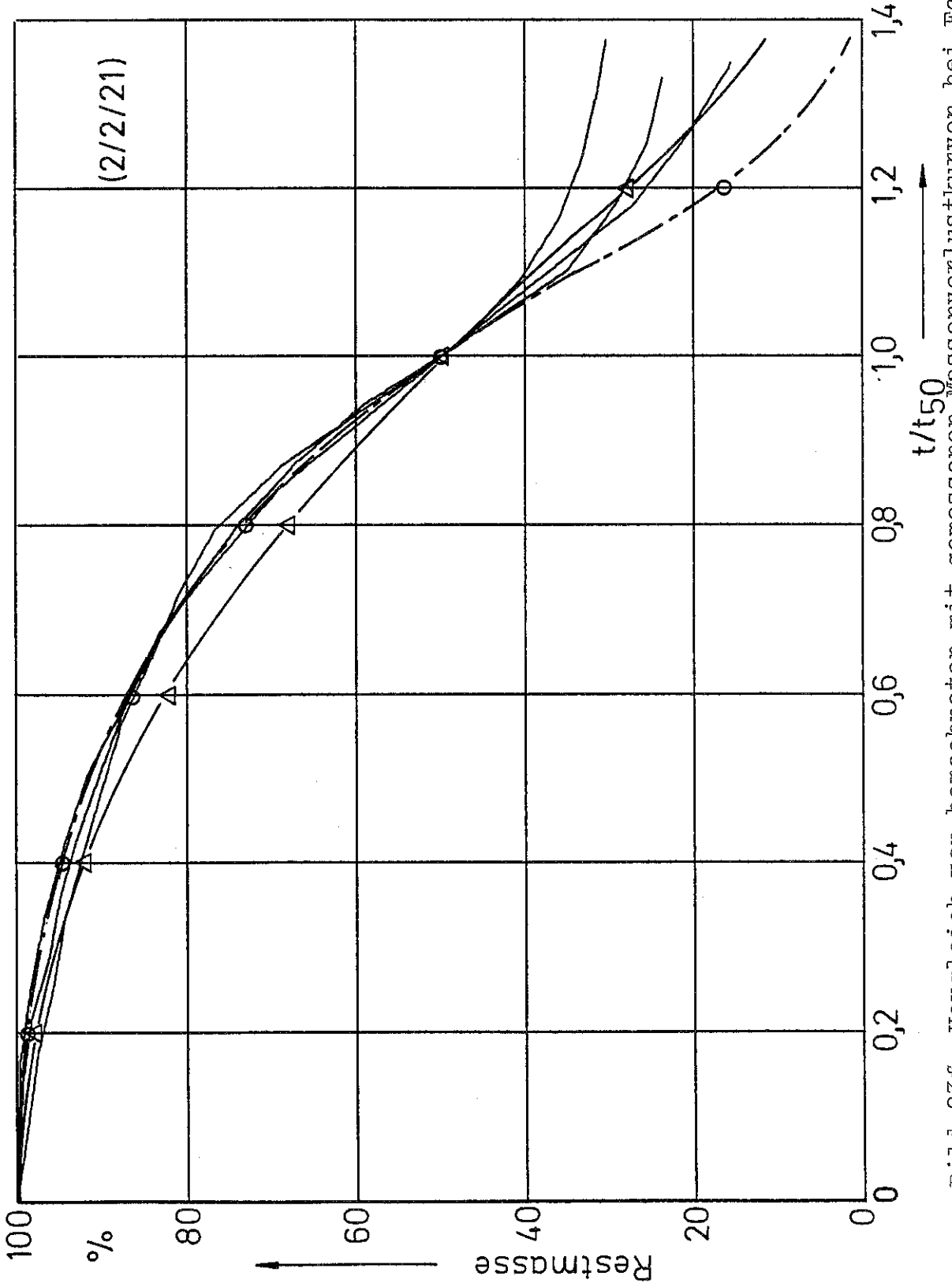


Bild 23f Vergleich von berechneten mit gemessenen Massenverlustkurven bei Eckenzündung von Krippen 2/2/21 . Berechnung mit  $v_F, const$  ( $\Delta$ ) und  $v_F(x)$  ( $\circ$ )

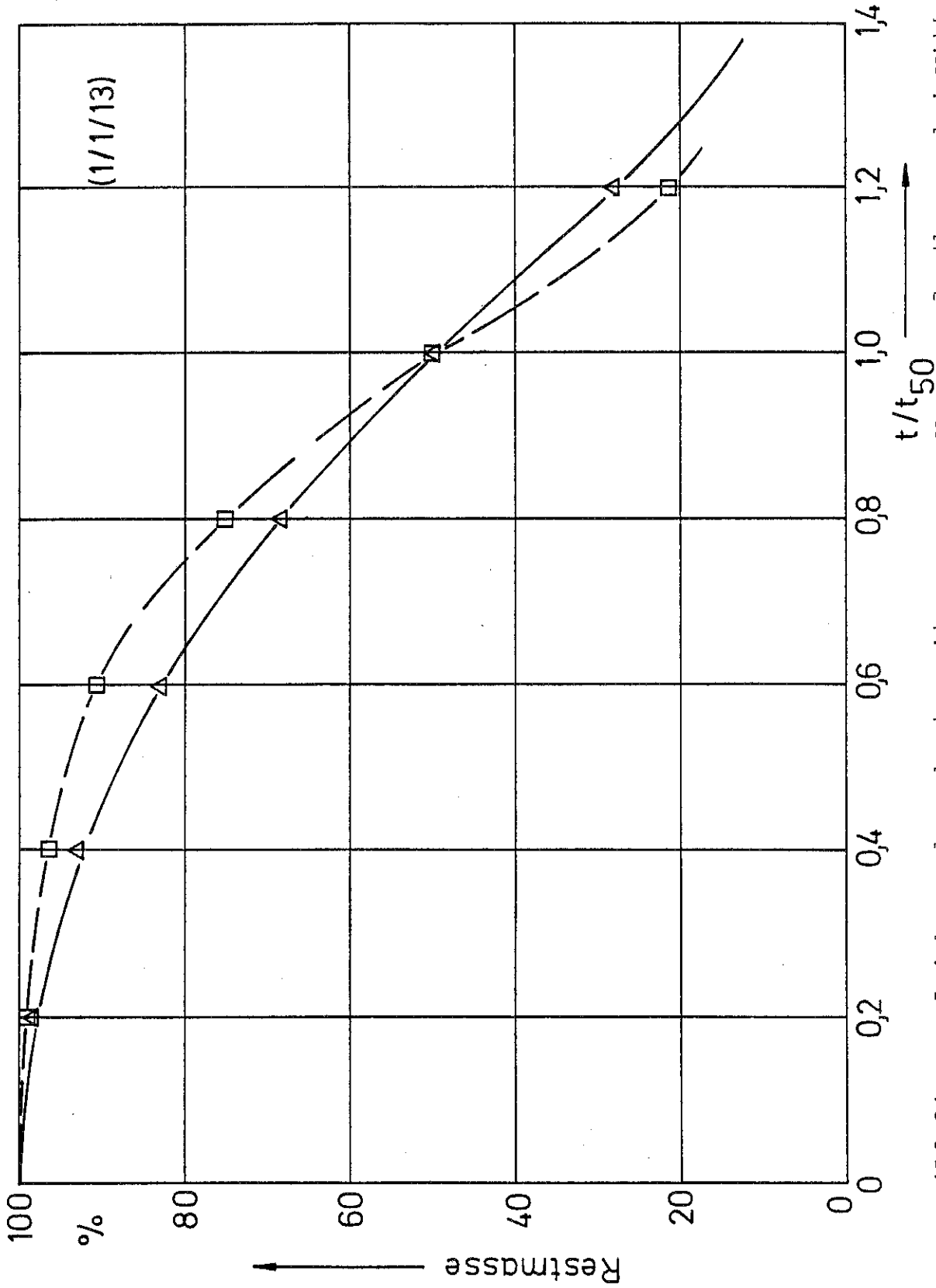


Bild 24a Vergleich von berechneten mit gemessenen Massenverlustkurven bei Mittenzündung von Krippen 1/1/13 . Berechnung mit  $v_{F, const.}$  (Δ), Mittelwert von 5 Messungen (□).

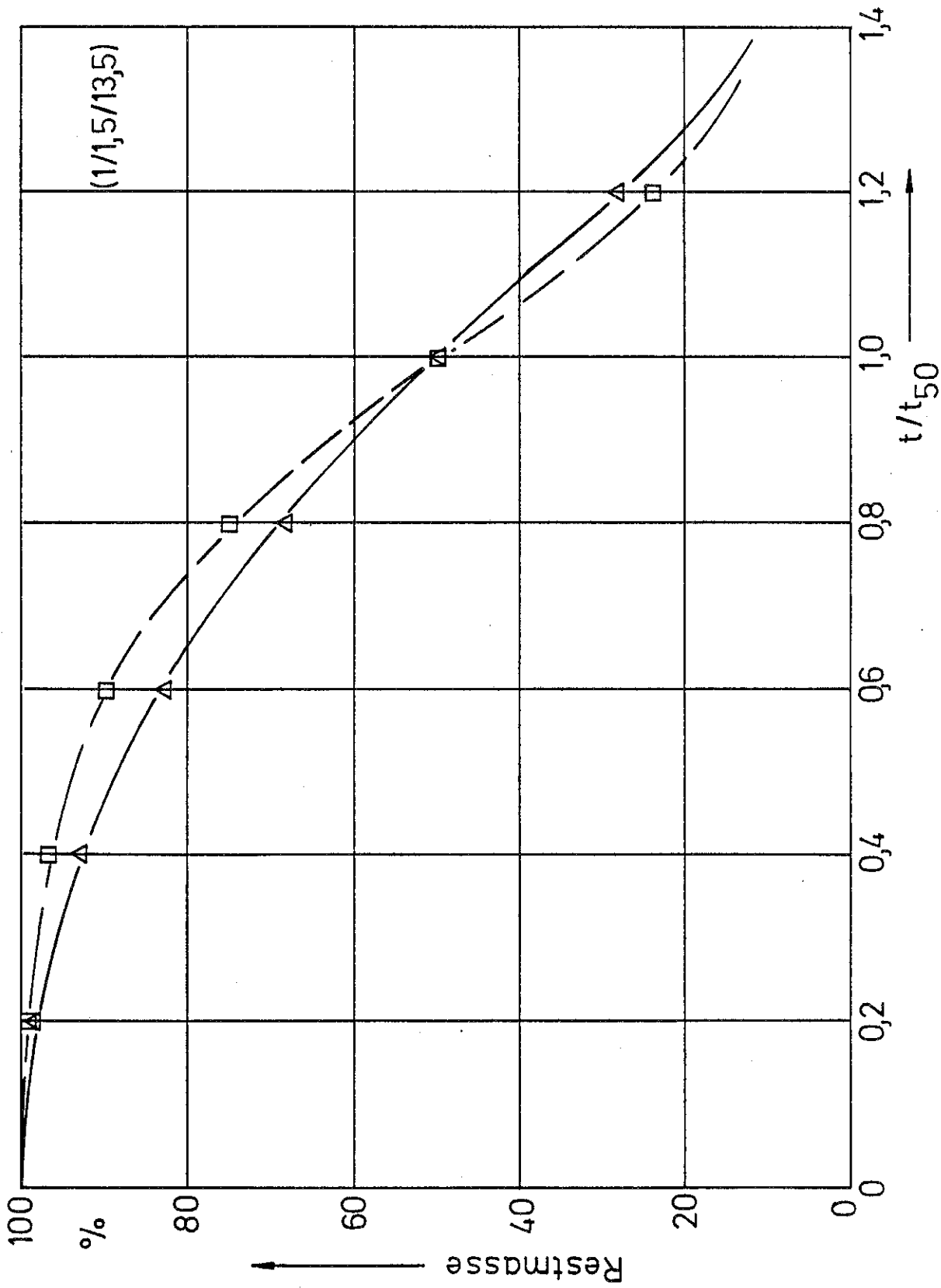


Bild 24b Vergleich von berechneten mit gemessenen Massenverlustkurven bei Mittenzündung bei Krippen 1/1,5/13,5 . Berechnung mit  $v_{F, const.}$  ( $\Delta$ ), Mittelwert von 5 Messungen ( $\square$ )

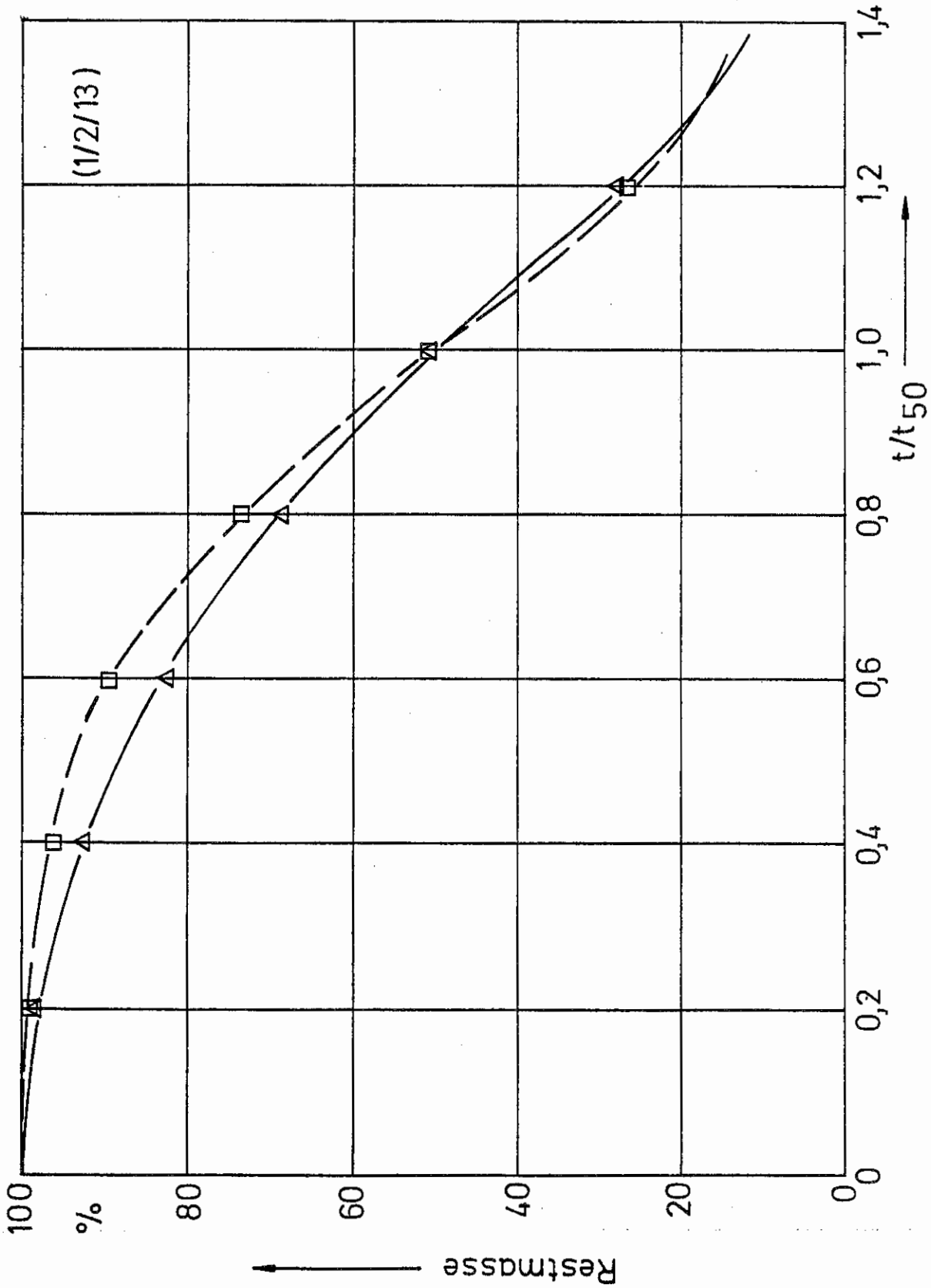


Bild 24c Vergleich von berechneten mit gemessenen Massenverlustkurven bei Mittenzündung von Krippen 1/2/13 . Berechnung mit  $v_{F, const.}$  (Δ), Mittelwert von 5 Messungen (□).