

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Zum Abbrandverhalten von Feststoffen bei Bränden
— Versuche und Modellrechnung —

Teil I: Versuche

43

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

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

Forschungsbericht Nr.43

Zum Abbrandverhalten von Feststoffen bei Bränden
- Versuche und Modellrechnung -

Teil I: Versuche

von
Dipl.-Ing.Dieter Brein

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Januar 1981

FA.Nr. 79 (2/78)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. VERSUCHSPROGRAMM	3
3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSVERFAHREN	5
3.1. Versuchsaufbau	5
3.2. Meßverfahren	6
3.2.1. Massenverlustmessungen	6
3.2.2. Temperaturmessungen	6
3.2.3. Registrierung der Meßwerte	
3.2.4. Geschwindigkeit der horizontalen Flammenfrontausbreitung	7
4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	7
4.1. Vergleichende Darstellung des Abbrandverhaltens von Krippen verschiedener Porosität	7
4.2. Beschreibung des Versuchsablaufes	8
5. AUSWERTUNG DER VERSUCHE	10
5.1. Geschwindigkeit der horizontalen Flammenfrontausbreitung	10
5.2. Massenverlust	11
5.3. Maximaltemperaturen	12
5.4. Vergleich der Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit mit der Massenverlustrate	13
5.4.1. Einfluß der Porosität	13
5.4.2. Einfluß der Krippenhöhe	15
5.4.3. Einfluß der seitlichen Umrandung	16
5.5. Einfluß der Höhe, der Porosität und der seitlichen Luftzufuhr auf den Zündzeitpunkt	16
5.6. Einfluß der Höhe, der Porosität und der seitlichen Luftzufuhr auf die Branddauer	18
5.7. Einfluß der Höhe, der Porosität und der seitlichen Luftzufuhr auf die Flammenfrontkontur	19
5.8. Bewertung der Temperaturmaxima in der Krippe	19
6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	20
7. FORMELZEICHEN	22
8. LITERATURVERZEICHNIS	23
9. TABELLEN UND BILDER	25
9.1. Tabellen	25
9.2. Bilder	31

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Flammenfront in einer geordneten Brandstoffanordnung wie einer Holzkrippe ist ein wichtiger erster Schritt für die Beschreibung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit in verschiedenen, ähnlichen Brandstoffanordnungen mittels mathematisch-physikalischer Grundlagen.

Geht man davon aus, daß eine geometrisch systematisierte Brandlast wie die Holzkrippe als Grundlage für einen natürlichen Brand verwendet werden soll, dann ist zunächst zu prüfen, unter welchen Bedingungen die Aufheizung, die Zündung und der Abbrand einer solchen Holzkrippe ablaufen, und wie der Abbrand durch die Form und die Geschwindigkeit beschrieben werden kann, mit der sich nach der Zündung die Flammenfront durch die Krippe ausbreitet.

Die Untersuchungen zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Flammenfrontausbreitung in einer geordneten Feststoffkonfiguration am Beispiel von Holzkrippen erfordern daher sowohl experimentelle als auch theoretische Arbeiten. Im vorliegenden Teilabschnitt 1 des Forschungsvorhabens wird über Experimente an Holzkrippen unterschiedlicher Geometrie berichtet, im Teilabschnitt 2 wird die durch die Ergebnisse dieser Experimente gestützte Modellrechnung dargestellt werden.

Um die Einflüsse auf das Abbrandverhalten wie unterschiedliche Porositäten, unterschiedliche Höhen, die Rohdichte und die Feuchtigkeit des Brandstoffes, die Führung der Zufuhr von Verbrennungsluft und damit den Einfluß der Hauptströmungsrichtung innerhalb der Krippe abschätzen zu können, ist es notwendig, die Wirkung einzelner dieser Parameter gesondert zu untersuchen. Im vorliegenden Falle wurde die Ausbreitung der Flammenfront in Holzkrippen ermittelt, bei denen die Porosität, die Höhe, und die seitliche Luftzufuhr in die Krippe variiert wurden.

Die Auswahl einer begrenzten Anzahl von Parametern ist deshalb notwendig, weil eine zu große Parametervariation den Einfluß der einzelnen Parameter nicht mehr erkennen ließe.

Aufgrund der Arbeiten von Fons et.al. /1/ ist anzunehmen, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Flammenfront in Holzkrippen außerdem von der Holzfeuchte und der Holzart in entscheidendem Maße abhängt. Diese Parameter konnten durch Benutzung einer Holzsorte und Durchführung der Versuche bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen ausgeschlossen werden. Auf eine gesonderte Untersuchung des Einflusses von Holzfeuchte und Holzart wurde auch deshalb verzichtet, weil bereits an anderer Stelle detaillierte Informationen darüber vorliegen und weil erwartet wird, daß sich die Einflüsse der genannten zwei Parameter auf das Abbrandverhalten aus der theoretischen Untersuchung ergeben werden, bei der Trocknungs- und kinetische Vorgänge in Abhängigkeit von diesen beiden Parametern untersucht werden.

Durch Massenverlustmessungen und Messungen des zeitlichen und örtlichen Temperaturverlaufs in Holzkrippen konnte die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den geometrischen Parametern und der seitlichen Luftzufuhrbehinderung bestimmt werden. Besonderes Augenmerk lag dabei in der Ermittlung der Form der vertikalen Ausbreitung der Flamme innerhalb der Holzkrippen bei Zündung an der Unterseite der Krippen mit einer örtlich begrenzten Zündquelle und in der Bestimmung der Geschwindigkeit und Form der horizontalen Ausbreitung der Flammenfront von einem vertikalen Kanal einer Krippe zum daneben liegenden, also der radialen Flammengeschwindigkeit.

2. VERSUCHSPROGRAMM

Das Versuchsprogramm beinhaltet die Erfassung folgender Meßgrößen, wie bereits im Abschnitt 1 angedeutet:

- Massenverlust der Holzkrippen während der Verbrennung und
- Temperaturmessungen an verschiedenen Punkten innerhalb und oberhalb der Krippen während der Verbrennung, um Rückschlüsse auf die Flammenkontur, den Brandverlauf und die Brandausbreitungsgeschwindigkeit ziehen zu können.

Um den Einfluß der Höhe und der Porosität auf das Abbrandverhalten zu ermitteln, wurden Krippen mit 12 verschiedenen Geometrien abgebrannt, die sich wie folgt unterscheiden:

1. Durch die Wahl dreier unterschiedlicher Stababstände von 1 cm, 1,5 cm und 2 cm wurden drei Porositätswerte $\psi = 46\%$, $55,6\%$ und $62,5\%$ untersucht.
2. Bei konstanter Porosität wurde die Höhe auf 4-fache Weise variiert: 4 cm, 8 cm, 12 cm und 16 cm.

Die gewählten Krippentypen wurden jeweils mit und ohne seitliche Luftzufuhrbehinderung abgebrannt. Der Zweck dieser Variation bestand darin, festzustellen, welchen Einfluß die seitliche Luftzufuhr auf die Abbrandgeschwindigkeit und damit auf die Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit hat. Hierbei ist der quantitative Unterschied besonders interessant, da damit eine gute Kontrollmöglichkeit für die Richtigkeit der Ergebnisse des derzeit im Rahmen der theoretischen Behandlung des Forschungsvorhabens überarbeiteten physikalisch-mathematischen Modells /2/ vorliegt.

Mit seitlicher Luftzufuhrbehinderung wird gewährleistet, daß im Bereich der Krippe eine ungestörte Hauptströmungsrichtung in der Vertikalen vorliegt; beim Fall mit seitlich offenen Krippen wird diese Hauptströmungsrichtung aber von einer horizontalen Luftzuströmung beeinflusst. Für den praktischen Fall

des Abbrandes von Brandlasten in Räumen von Gebäuden würde mit gewissen Einschränkungen mit dem erstgenannten Modell eine großflächig verteilte Brandlast, mit dem zweiten Modell eine in Bezug auf die Raumgröße quasi punktuelle oder örtlich begrenzte Brandlast simuliert werden können.

Die Holzkrippen wurden aus Kiefernstäben mit konstantem Querschnitt von 1 cm x 1 cm aufgebaut. Die Länge der Stäbe betrug 13 cm, 13,5 cm und 16 cm. Dabei wurde die unterschiedliche Stablänge aus versuchstechnischen Gründen gewählt und ist damit zu begründen, daß von der Zündquelle aus eine ausreichende Anzahl nebeneinanderliegender vertikaler Kanäle in einer Hauptausbreitungsrichtung der Flammenfront vorhanden sein mußte, um die radiale Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit längs des Weges bestimmen zu können. Ein weiterer Grund für diese Wahl ist darin zu sehen, daß die Wärmebelastung des verwendeten Laborabzugs durch Begrenzung der Modellgröße und damit der brennbaren Masse der Krippe in vertretbarem Rahmen gehalten werden konnte. Die unterschiedlichen Stablängen ergeben bei Krippen mit 2 cm Stababstand gegenüber 1,5 cm Stababstand eine um 40% und gegenüber 1 cm Stababstand eine um 51% vergrößerte Grundfläche, die bei der Bewertung der Meßergebnisse entsprechend berücksichtigt werden mußte.

Die Dichte und der Feuchtigkeitsgehalt war bei allen Stäben gleich groß und betrug für die Dichte ρ 0,58 g/cm³ und für die Feuchte ϕ 12%.

Der gleichmäßige Aufbau der Holzkrippen in Bezug auf den Stababstand, die Höhe und die seitlichen Abmessungen wurde durch Schablonen gewährleistet. In diesen Schablonen wurden die Stäbe an den äußeren Kreuzpunkten miteinander verleimt. Die Bezeichnung der Krippen erfolgte nach dem in der Literatur (z.B./3/) üblichen Schema. Die Geometrie der Holzkrippe wird durch die Kurzform $(b, \frac{s}{b}, \frac{L}{b})$ angegeben. Eine Holzkrippe (1/2/16) hat damit bei einer Stabdicke von 1 cm den Stababstand 2 cm, die

Stablänge beträgt 16 cm. Die Krippenhöhe H wird separat in cm angegeben.

Um die Reproduzierbarkeit der Meßwerte zu gewährleisten, wurden jeweils drei Versuche mit einer Konfiguration durchgeführt. Die Zündung erfolgte bei jedem Versuch in der Mitte der Krippe. Aus der oben beschriebenen Variation der Versuchsparameter, nämlich 3 Stababstände, 4 Höhen und seitliche Umrandung bzw. fehlende seitliche Umrandung ergeben sich insgesamt 24 Versuchsanordnungen. Da sowohl die Massenverlustmessungen als auch die Temperaturmessungen jeweils für eine bestimmte Anordnung mindestens dreimal wiederholt wurden und Massenverlust- und Temperaturmessungen aus versuchstechnischen Gründen getrennt durchgeführt wurden, ergibt sich damit eine Anzahl von insgesamt 144 Versuchen.

3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSVERFAHREN

3.1. Versuchsaufbau

Die mit Hilfe der Schablonen hergestellten Krippen wurden auf einen Dreifuß gestellt, in dessen Zentrum sich ein Elektrobrenner befand. Durch dessen heißen Luftstrom sowie durch die Strahlungswärme wurde der zentrale, vertikale Kanal einer Krippe gezündet. Nach der Zündung wurde der Brenner weggezogen, sodaß die Zündquelle keinen weiteren Einfluß auf den Abbrandvorgang der Krippe hatte. Die Versuchsanordnung befand sich innerhalb eines Laborabzugs, bei dem nach dem Auftreten der ersten Flammen innerhalb der Krippe oder bei starker Rauchentwicklung ein Gebläse zum Absaugen der Rauchgase eingeschaltet wurde.

Um zusätzlich eine Information darüber zu erhalten, wann die bei einzelnen Versuchen aus den Krippen mit geschlossenen Seitenflächen austretenden Schwelgase sich entzündeten, wurden in einem Abstand von 8 cm und 16 cm oberhalb der Mitte der Krippe Thermoelemente angebracht.

Bei allen Versuchen wurde dafür gesorgt, daß die Abgase frei abströmen konnten und daß die Verbrennungsluft, die infolge des durch die Auftriebskräfte erzeugten Unterdrucks angesaugt wird, ungehindert zuströmen konnte. Bei den Versuchen mit geschlossenen Seitenflächen wurde die seitliche Luftzufuhr durch eine Verkleidung mit nichtbrennbarem Asbestschaum von 2 cm Dicke behindert, wobei dieser durch nichtbrennbare Vermipanplatten versteift und von einem Metallrahmen angepreßt wurde.

3.2. Meßverfahren

3.2.1. Massenverlustmessungen

Unter der Bodenplatte des Laborabzugs, in dem die Krippen verbrannt wurden, war eine Waage mit elektrischem analogem Spannungsausgang montiert. Auf der Waagschale dieser Waage war ein Gestell befestigt, das durch eine Öffnung in der Bodenplatte in den Brandraum ragte. Darauf wurde der Versuchsaufbau, bestehend aus Dreifuß, Brenner und Krippe gestellt.

3.2.2. Temperaturmessungen

Für die Temperaturmessungen wurden als Meßfühler Chromel/Alumel-Mantelthermoelemente mit einem Außendurchmesser von 1,0 mm verwendet. Die Temperaturmeßstellen wurden so angeordnet, daß eine sich zylinderförmig von der Zündquelle weg ausbreitende Flammenfront einfach registriert werden konnte. Deshalb wurden die Meßfühler strahlenförmig auf der Diagonalen der Krippe in verschiedenen Abständen von der Zündquelle, und in verschiedenen Ebenen, d.h. Höhenkoordinaten über der Krippenbasis, positioniert. Dies ist in den Bildern 1a und 1b exemplarisch für die Krippe (1/1,5/13,5) und für die Krippengesamthöhe 16 cm dargestellt. Die individuelle Verteilung aller Temperaturmeßstellen ist in der Tabelle 1 zusammengefaßt. Die Thermoelemente wurden in Edelstahlröhrchen mit 3 mm äußerem Durchmesser bei einer Wandstärke von 0,5 mm geführt und wurden bei den Versuchen

mit offenen Seitenflächen mittels eines Gestells, an dem die Röhrrchen waagerecht befestigt waren, in ihre Position gebracht. Bei den Versuchen mit geschlossenen Seitenflächen wurden die Röhrrchen durch entsprechend gebohrte Löcher in der Vermipanplatte gesteckt und damit in ihrer Position fixiert. Es wurde außerdem darauf geachtet, daß bei der Anordnung der Thermoelemente die Flammenfront zunächst die Spitze der Thermoelemente und dann die Edelstahlröhrrchen erreichte, um ein zu frühes, durch Wärmeleitung in den Röhrrchen verursachtes Ansprechen der Thermoelemente zu verhindern.

3.2.3. Registrierung der Meßwerte

Die an den Thermoelementen bzw. der Waage anstehenden elektrischen Spannungen wurden mittels einer rechnergesteuerten Datenerfassungsanlage sequentiell abgefragt, auf Massenspeicher abgespeichert und der zeitliche Verlauf der Meßwerte anschließend von einem Plotter ausgezeichnet oder auf einem Graphik-Bildschirm zur weiteren Auswertung dargestellt.

3.2.4. Geschwindigkeit der horizontalen Flammenfrontausbreitung

Aus der zeitlichen Differenz des Temperaturanstiegs zweier örtlich benachbarter Thermoelemente und dem durch die Versuchsanordnung vorgegebenen Abstand zwischen beiden Thermoelementen wurde die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront zwischen diesen beiden Meßpunkten, entsprechend dem in /4/ angegebenen Verfahren, bestimmt.

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

4.1. Vergleichende Darstellung des Abbrandverhaltens von Krippen verschiedener Porosität

Für die Versuchsanordnung mit geschlossenen Seitenflächen wurden im Anhang zwei Fotoserien (Bild 2) zusammengestellt, die Krippen

verschiedener Porosität, aber gleicher Höhe darstellen. Zu gleichen Versuchszeiten wurden hierbei die Fotografien des Brandablaufs nebeneinandergestellt, um die Unterschiede phänomenologisch aufzuzeigen.

4.2. Beschreibung des Versuchsablaufes

Die Krippen mit offenen Seitenflächen brannten im Gegensatz zu einigen Krippen mit geschlossenen Seitenflächen mit zylinderförmiger Ausbreitung der Flammenfront ab.

Krippen mit o f f e n e n Seitenflächen:

H = 4 cm und H = 8 cm

1/1/13:	keine Abweichung von zylinderförmiger Flammenfront
1/1,5/13,5:	keine Abweichung von zylinderförmiger Flammenfront
1/2/16:	keine Abweichung von zylinderförmiger Flammenfront

H = 12 cm 1/1/13: zylinderförmige Flammenfront. Lediglich in Ebene 11 leichte Abbrandverzögerung.

1/1,5/13,5: keine Abweichung von zylinderförmiger Flammenfront

1/2/16: keine Abweichung von zylinderförmiger Flammenfront

H = 16 cm 1/1/13: Ebene 11 und 15 leichte Abweichung von zylinderförmiger Flammenfront.

1/1,5/13,5: keine Abweichung von zylinderförmiger Flammenfront

1/2/16: keine Abweichung von zylinderförmiger Flammenfront

Krippen mit geschlossenen Seitenflächen

- H = 4 cm 1/1/13: keine Abweichung von zylinderförmiger
Flammenfront
- 1/1,5/13,5: keine Abweichung von zylinderförmiger
Flammenfront
- 1/2/16 keine Abweichung von zylinderförmiger
Flammenfront
- H = 8 cm 1/1/13: Hier wirkte sich die seitliche Luftzu-
fuhrbehinderung extrem aus: Nach Zündung
H = 12 cm der Krippe kein Abbrennen mit zylind-
H = 16 cm rischer Flammenzone. Vielmehr breitet sich
und der Brand mehr kalottenförmig nach oben aus.
H = 16 cm 1/1,5/13,5: Dabei werden in den oberen Ebenen verstärkt
Schwelgase aus den Holzstäben durch die
Wärmeentwicklung der unteren brennenden
Holzstäbe ausgetrieben (siehe Bild 2).
Diese Schwelgase sind brennbar, entzünden
sich aber durch mangelnde Wärmezufuhr vor-
erst nicht. Erst wenn die Flammenfront bis
ungefähr 4 cm unter die Krippenoberkante
hochgebrannt ist, reicht die Wärmezufuhr
aus, um die Schwelgase zu entzünden
(siehe Bild 2).
- H = 8 cm 1/1,5/13,5: keine Abweichung von zylinderförmiger
Flammenfront
- 1/2/16: keine Abweichung von zylinderförmiger
Flammenfront
- H = 12 cm 1/1,5/13,5: keine Abweichung von zylinderförmiger
Flammenfront
- 1/2/16: keine Abweichung von zylinderförmiger
Flammenfront
- H = 16 cm 1/2/16: keine Abweichung von zylinderförmiger
Flammenfront

Die Aussagen über die Art der Ausbreitung der Flammenzone werden durch die exemplarische Darstellung von Temperaturverläufen einer Krippe (1/1,5/13,5) $H = 8$ cm, mit offener Seitenfläche (Bild 3) und im Gegensatz dazu einer Krippe des Typs (1/1/13), $H = 12$ cm, mit geschlossener Seitenfläche (Bild 4) ergänzt. Im Vergleich zwischen beiden Darstellungen fällt bei der seitlich offenen Krippe der praktisch gleichzeitig erfolgende Anstieg der Temperatur an übereinanderliegenden Meßstellen (Position a_2 bzw. Position a_3) auf, während im Falle der geschlossenen Seitenfläche die sehr starke Auftrennung des Anstiegs der Temperatur übereinanderliegender Meßstellen an den Positionen a_2 , a_3 und a_4 festzustellen ist, was auf eine Form der Flammenfront hinweist, die von der Form des Zylindermantels beträchtlich abweicht.

5. AUSWERTUNG DER VERSUCHE

5.1. Geschwindigkeit der horizontalen Flammenfrontausbreitung

Die Geschwindigkeit der horizontalen Flammenfrontausbreitung wurde wie oben angegeben zwischen den Thermoelementlagen a_1 und a_2 bzw. a_2 und a_3 für den Fall sowohl offener als auch geschlossener Seitenflächen bei den Stababständen 1,5 cm und 2 cm und auf Grund der im Falle des Stababstandes 1 cm angebrachten zusätzlichen Meßreihe an der Stelle a_4 auch für den Abstand zwischen den Thermoelementen an der Stelle a_3 und a_4 bestimmt.

Es zeigte sich jedoch bei der Auswertung, daß die Geschwindigkeit zwischen den Thermoelementen an der Stelle a_1 , die direkt über dem Brennerzentrum lagen und den Thermoelementen an der Stelle a_2 , die sich etwas außerhalb des Brennerzentrums befanden, nicht aussagekräftig war, da der Brennerdurchmesser mit etwa 3 cm zu groß war, um realistische Aussagen über die Ausbreitungsgeschwindigkeit bei dem geringen Abstand der Thermoelemente a_1 und a_2 zuzulassen. Ansonsten wurden die berechneten Geschwindigkeiten V_F der Flammenfrontausbreitung der jeweiligen Mitte

zwischen den Meßorten zugeordnet. Für den Fall, daß übereinanderliegende Thermolemente zu praktisch der gleichen Zeit den charakteristischen Temperaturanstieg zeigten, d.h. für den Fall, daß eine Flammenfrontausbreitung in Form von Zylindermantelflächen vorlag, wurde der arithmetische Mittelwert aus den Einzelmessungen in den Ebenen als charakteristische Geschwindigkeit genommen. Eine weitere Mittelung ergab sich dadurch, daß jede Konfiguration dreimal durchgemessen wurde. Aus den obigen Ausführungen ergibt sich, daß für die Krippen mit den Stababständen 1,5 cm und 2 cm nur die Geschwindigkeitswerte zwischen dem 2. und 3. Thermolement berücksichtigt wurden. Für den Fall des Stababstandes von 1 cm konnten auch die Werte zwischen dem 3. und 4. Thermolement berücksichtigt werden. Da jedoch dort die Unterschiede in der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit zwischen den Stellen a_2 und a_3 und zwischen a_3 und a_4 relativ gering waren, wurde der Mittelwert aus diesen beiden Werten verwendet und dem Mittelpunkt zwischen den Stellen a_2 und a_4 zugeordnet.

Die ermittelten Werte für die Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit gelten damit für eine Flammenfrontlage innerhalb der Krippe (d.h. Abstand der Flammenfront vom Zündort), an der die gesamte Länge der Flammenfront nahezu maximal ist. Dort ist auch der Wert des maximalen Massenverlustes zu erwarten (Abschnitt 5.2.). Die Werte der Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit sind in der Tabelle 2 und im Bild 5 dargestellt.

5.2. Massenverlust

Der Zweck der Massenverlustmessungen war es, die Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit, d.h. des zeitlichen Massenverlustes dm/dt , von der Porosität, Krippenhöhe und seitlichen Luftzufuhrbehinderung herauszufinden und mit den Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeiten, die aufgrund der Temperaturewertung erhalten wurden, zu vergleichen. In den Bildern 6 und 7 ist am Beispiel des Versuchs Nr.85 (Krippe (1/2/16), $H = 16$ cm, geschlossen) der Restmassenverlauf in Prozent und die Massen-

verlustrate dm/dt in g/s über der Versuchszeit aufgetragen. Aufgrund der unterschiedlichen Höhe der Krippen wurde es notwendig, eine Größe aus der Massenverlustrate dm/dt herzuleiten, die einen Vergleich des Massenverlustes für gleiche Porositäten, aber unterschiedliche Krippenhöhen ermöglicht. Das wurde dadurch erreicht, daß an der Stelle, an der dm/dt ein Maximum aufweist, dieser Wert mit der zugehörigen Krippenhöhe H normiert wurde. In der Tabelle 3 ist $dm/H \cdot dt /_{max}$ für die einzelnen Versuche aufgelistet. Die in der Tabelle aufgeführten Werte von $dm/H \cdot dt /_{max}$ werden im Bild 8 über der Krippenhöhe sowohl für die offenen als auch für die geschlossenen Krippen, d.h. mit und ohne Luftzufuhrbehinderung dargestellt.

5.3. Maximaltemperaturen

Die zeitlichen Temperaturverläufe wurden auf ihre Abhängigkeit von den drei variierten Versuchsparametern Porosität, Höhe und seitliche Luftzufuhr untersucht. Als vergleichbare Werte erschienen diejenigen, die im jeweils gleichen Kanal an der Stelle a_2 gemessen wurden. In der Tabelle 4 wurden die für jede Konfiguration an der entsprechenden Meßstelle aus jeweils drei Versuchen gemittelten Maximaltemperaturen aufgelistet. Um die Temperaturen vergleichend darzustellen, wurde die dimensionslose Höhenkoordinate $h' = h_i/H$ eingeführt. In den Bildern 9a bis 9c wurden für die jeweiligen Porositätswerte die Maximaltemperaturen über h' aufgetragen. Die Meßwerte zeigen in jedem der drei Bilder mit wachsendem h' steigende Tendenz bis ca. $h' = 0,6$ bis $0,7$, dann fallen die Werte wieder ab, unabhängig davon, ob es sich um seitlich geschlossene oder seitlich offene Krippen handelt.

5.4. Vergleich der Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit mit der Massenverlustrate

Das Problem, einen Vergleich zwischen den Ergebnissen aus der Temperatur- und der Massenverlustmessung anzustellen, liegt im wesentlichen in der endlichen Dicke der Flammenzone begründet. Diese Flammenzone breitet sich nämlich mit der Geschwindigkeit der Flammenfront in die noch unverbrannten Teile der Krippe aus, hinter der Flammenzone jedoch bleibt ein Restgerüst aus noch reagierender Holzkohle zurück. Wie schon in /4/ nachgewiesen wurde, ist die endliche Dicke dieser Flammenzone von der Geometrie abhängig. Die Meßstellen bei den hier durchgeführten Versuchen lagen jedoch zu weit auseinander, um eine verlässliche Flammenzonendicke in Abhängigkeit vom Abstand von der Zündquelle angeben zu können. Aus diesem Grunde ist es mit den vorliegenden Messungen nur möglich, qualitativ zu vergleichen, ob die ermittelten Geschwindigkeiten der Flammenfrontausbreitung aus den Temperaturmessungen, d.h. V_F , tendenziell mit den Massenverlustraten, also $dm/H \cdot dt /_{\max}$ übereinstimmen.

5.4.1. Einfluß der Porosität

Der Einfluß der Porosität auf das Abbrandverhalten von Krippen, insbesondere auf die Massenverlustrate dm/dt wurde bereits in /3/ untersucht und von einer Reihe anderer Autoren, z.B. in /5/, /6/ und /7/ ausführlich abgehandelt.

Die Porosität wirkt sich grundsätzlich auf das Abbrandverhalten aus, unabhängig davon, ob die Seitenflächen der Krippen offen oder geschlossen sind. Die im Bild 5 dargestellte Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit und die im Bild 8 dargestellte Massenverlustrate zeigen eine Zunahme beider Größen mit wachsender Porosität. Während bei der Massenverlustrate die visuelle Beobachtung bestätigt wird, daß Krippen mit geschlossenen Seitenflächen bei jeweils gleicher Porosität

langsamer abbrennen als solche mit offenen Seitenflächen, zeigt sich dieser Effekt im Bild 5 bei der Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit scheinbar nicht. Der Grund dafür ist darin zu suchen, daß bei Krippen kleiner Porosität und großer Höhe die Flammenfrontform stark von der Zylindermantelform abweicht. Die entsprechenden Werte wurden in der Tabelle 2 und im Bild 5 deshalb auch in Klammern gesetzt (siehe Anmerkung zu Tabelle 2).

Läßt man jedoch diese Werte außer acht und berücksichtigt, daß bei solch stark schwankenden Signalen wie dem zeitlichen Temperaturverlauf auch die Auswertung mit gewissen Unsicherheiten in der Interpretation dieser Meßsignale behaftet ist, dann zeigt sich folgendes Bild:

- Mit steigender Porosität nehmen auch die Abbrandgeschwindigkeit und die Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit zu.
- Die seitlich offene Krippe brennt etwas rascher, d.h. unter einer größeren Stoffumsetzungsgeschwindigkeit ab, als die Krippe mit geschlossenen Seitenflächen.

Weitere individuelle Einflüsse wird die im Teilabschnitt 2 des Forschungsvorhabens durchzuführende Berechnung aufzeigen.

Der Einfluß der Porosität läßt sich wie folgt darstellen:

Bei kleinen Stababständen wird der Einfluß der Strömungswiderstände gegen die Hauptströmungsrichtung entlang der vertikalen Begrenzungen der einzelnen Kanäle im Verhältnis zu den die Strömungsgeschwindigkeit bei offenen Krippen stärker beeinflussenden Auftriebskräften, die durch die Temperaturunterschiede zwischen der Flamme und den Umgebungsbedingungen hervorgerufen werden, so groß, daß daraus eine Reduzierung der Massenverlustgeschwindigkeit vermutlich auch infolge Luftmangels

und daher eines geringeren Umsatzes innerhalb der Krippe resultiert. Bei geschlossenen Seitenflächen kommt als zusätzlicher Effekt hinzu, daß das Luftangebot durch die fehlende seitliche Zuströmung in die Krippe hinein verringert wird, sodaß ein noch gasreicheres Zwischengas aus der Krippenoberseite nach außen austritt, als dies bei offener Luftzufuhr der Fall ist. Dies würde auf eine geringere Reaktionsdichte bei kleinen Porositäten hinweisen. Es zeigt sich also, daß sowohl bei offener als auch bei geschlossener Seitenfläche die Abbrandgeschwindigkeit mit steigender Porosität zunimmt. Gewisse Schwierigkeiten bei der Interpretation der Vorgänge bietet jedoch die Tatsache, daß unabhängig von der Porosität und der seitlichen Luftzufuhr die Temperaturmaxima (Bilder 9a bis 9c) nahezu identisch sind.

5.4.2. Einfluß der Krippenhöhe

Bei den Krippen mit offener Seitenfläche und gleicher Porosität geht aus den Temperaturmessungen hervor, daß die Geschwindigkeit der horizontalen Flammenfrontausbreitung (Bild 5) mit steigender Krippenhöhe H zunimmt, wobei die für die in Klammern gesetzten Werte obengenannte Einschränkung gilt. Bei den Krippen mit geschlossener Seitenfläche ist bei den Brandverläufen, die eine nahezu zylindrische Flammenfront zeigen, ebenso festzustellen, daß die Krippe um so schneller abbrennt, je größer die Krippenhöhe H ist. Die Massenverlustmessungen bestätigen diese Aussage allerdings nur teilweise. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei den Krippen mit verschiedenen Porositäten auch verschiedene Stablängen, d.h. unterschiedliche Grundflächen gewählt wurden, aufgrund derer die im Bereich der maximalen Abbrandgeschwindigkeit zur Verfügung stehenden Feststoffflächen innerhalb der Flammenzonen auch unterschiedlich groß sind. Die Erklärung für den Einfluß der Krippenhöhe auf die horizontale Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit läßt sich so zusammenfassen:

Wenn die Porosität und die seitliche Umrandung bei gleicher Ausgangsgeometrie, d.h. nur variiertes Krippenhöhe, nicht verändert werden, bleibt die Luftzufuhr bei der gewählten Versuchsanordnung von der Porosität im Grunde unbeeinflusst. Es ist jedoch bei den Krippen mit größeren Höhen die gesamte Wärmeproduktion innerhalb der Krippen größer. Daraus folgt eine Zunahme der Geschwindigkeit, mit der am einzelnen Holzstab die Pyrolysezone eindringt und brennbare Holzgasprodukte aus der Holzoberfläche ausdiffundieren. Dies dürfte dann wiederum in einem größeren Heißgasvolumenstrom resultieren, der die Bedingungen für die Wärmeübertragung in radialer Richtung verbessert und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit erhöht.

5.4.3. Einfluß der seitlichen Umrandung

Am deutlichsten wird der Einfluß der seitlichen Umrandung sowohl auf die Abbrandgeschwindigkeit (Bild 8) als auch auf die Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit (Bild 5) bei den Krippen 1/2/16 bei allen Krippenhöhen von 4 cm bis 16 cm. Die o.g. Geschwindigkeiten sind jeweils bei den Krippen mit freier seitlicher Luftzufuhr größer, obwohl das Temperaturniveau nach Bild 9c keine systematischen Unterschiede erkennen läßt. Bild 8 zeigt auch für die kleineren Porositäten, daß der zeitliche Massenverlust bei seitlich offenen Krippen größer ist. Die Vermutung, daß das erhöhte Luftangebot innerhalb der Krippen dann auch zu höheren Temperaturen führen müßte, wird durch die Temperaturmessungen (Bilder 9a und 9b) jedoch nicht bestätigt.

5.5. Einfluß der Höhe, der Porosität und der seitlichen Luftzufuhr auf den Zündzeitpunkt

In der Tabelle 5 und im Bild 10 sind die Zündzeitpunkte der Krippen mit offener Seitenfläche und geschlossener Seitenfläche dargestellt. Es sind dabei Unterschiede in den Zündzeiten

festzustellen. Dafür ist allerdings auch die Versuchsanordnung verantwortlich. Bei den Krippen mit geschlossener Seitenfläche war der Abstand zwischen Brennermündung und Krippenunterseite 1 cm größer als bei den Krippen mit offenen Seitenflächen. Dies hat zwangsläufig zur Folge, daß die Krippen mit geschlossener Seitenfläche später zünden, da die Temperatur, mit der der Heißgasstrom aus dem Brenner auf die Holzstäbe auftrifft, niedriger ist. Tendenziell ergibt sich aus Tabelle 5 und Bild 10, daß diejenigen Krippen am spätesten zünden, bei denen die Wärme am schlechtesten in die Holzstäbe abgeführt werden kann. Das sind die Krippen, bei denen die Stababstände am größten, die Wärmeübertragung durch Konvektion zwischen Heißluftstrom und Staboberfläche also am geringsten ist, da der Heißgasstrom bei größeren Porositäten einen größeren Strömungsquerschnitt ausfüllt, mehr Luft ansaugt und dabei stärker abgekühlt wird als bei kleinen Porositäten. Wie die Ergebnisse zeigen, zündeten die Krippen mit der Porosität $1/1/13$ schneller als die Krippen mit der Porosität $1/1,5/13,5$. Am schlechtesten zündeten die Krippen mit der Porosität $(1/2/16)$. Aufgrund der bereits o.g. Überlegungen zu einer erhöhten Wärmekonzentration innerhalb der Krippe bei größeren Höhen ist zu erwarten, daß auch in Bezug auf die Zündung die Krippen mit größeren Höhen eine bessere Wärmeabfuhr in die Holzstäbe haben und daß diese daher schneller zünden. Diese Tendenz wird durch die Versuchsergebnisse bestätigt. Am schnellsten zünden also demnach Krippen mit größter Höhe und kleinster Porosität. Solange die Stababstände nicht kleiner als der Löschabstand werden, ist der Zündzeitpunkt von der Luftzufuhr unabhängig, da zum Zeitpunkt der Zündung noch keine nennenswerte Verbrennung und damit noch kein Luftmangel besteht.

5.6. Einfluß der Höhe, der Porosität und der seitlichen Luftzufuhr auf die Branddauer

Die Länge der Branddauer ist abhängig von der Geschwindigkeit der Ausbreitung der Flammen und der absoluten Größe der Krippe. Wie in den Abschnitten 5.4.1. bis 5.4.2. erläutert wurde, ist die Pyrolysegeschwindigkeit umso größer, je größer die Wärmefreisetzung innerhalb des Kanals ist. Von der Größe der Pyrolysegeschwindigkeit des Holzes ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit die Branddauer unmittelbar abhängig. Aus den Versuchsergebnissen geht klar hervor:

- die Krippen brennen ohne seitliche Luftzufuhrbehinderung schneller ab, da eine erhöhte Luftzufuhr einen größeren Umsatz innerhalb der Kanäle und damit eine größere Wärmefreisetzung hervorruft,
- bei gleicher Porosität brennen die Krippen mit der kleinsten Höhe am schnellsten ab. Dies liegt jedoch auch an der kleineren Menge des zu verbrennenden Holzes, im Gegensatz zu den Krippen mit großen Höhen.
- Bei gleicher Höhe brennen die Krippen mit der größten Porosität, d.h. den größten Stababständen am schnellsten ab.

Hier sind die geringen Strömungswiderstände gegen eine Ausbreitung heißer Gase offenbar entscheidender als die Wärmeabgabe an die benachbarten Holzstäbe. Die Versuchsergebnisse wurden im Bild 11 dargestellt. Dieses Bild zeigt allerdings noch nicht vollkommen den tatsächlichen Einfluß der geometrischen Parameter auf die Branddauer. Würde man die Branddauer für Krippen mit gleichen Außenabmessungen ermittelt haben, so wären die Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven noch deutlicher.

5.7. Einfluß der Höhe, der Porosität und der seitlichen Luftzufuhr auf die Flammenfrontkontur

Die Flammenfrontkontur konnte anhand der Temperaturmessungen sowie durch visuelle Beobachtungen bestimmt werden (vgl. Abschnitt 4.2.). Bei den meisten Krippen breitete sich die Flammenfront annähernd wie Zylindermantelflächen mit wachsendem Radius kreisförmig von der Zündquelle weg aus. Wesentliche Abweichungen von dieser Flammenfrontkontur zeigten sich nur bei Krippen mit geschlossenen Seitenflächen. Hier war je nach Luftzufuhrbehinderung kein Abbrand mit über den Weg der Flammenausbreitung ähnlicher Flammenfrontform möglich. Wie weiter oben beschrieben wurde, brannten die Krippen besonders bei kleiner Porosität (1/1/13) und großen Höhen mit kalottenförmiger Flammenfront ab. Die Flammenfront breitete sich dabei langsam von unten zur Seite und nach oben aus, wobei aus den Holzstäben der oberen Ebenen verstärkt brennbare Schwelgase austraten, die sich über der Krippe jedoch deshalb nicht sofort entzündeten, weil sie zu sehr noch an den noch nicht gezündeten Stäben der oberen Lagen der Krippe abgekühlt wurden. Erst sobald die Flamme innerhalb der Krippe weiter nach oben gebrannt war (etwa bis 4 cm unter der Krippenoberseite), reichte die Temperatur dieser Gase aus, um in Verbindung mit Luft zu zünden.

5.8. Bewertung der Temperaturmaxima in der Krippe

Die Verteilung der Temperaturmaxima innerhalb der Krippe, die über der dimensionslosen Höhenkoordinate h' in den Bildern 9a bis 9c dargestellt wurde, ist eindeutig höhenabhängig. Die Meßwerte weisen ein Maximum im Bereich h' zwischen 0,6 und 0,7 auf, das bei den Krippen 1/1/13 besonders ausgeprägt ist. Dies bedeutet, daß die an der Unterseite der Krippen angesaugte Luft bis dahin weitestgehend mit den Holzzerlegungsgasen reagiert hat und daß die weitere Reaktion des dann noch vorhandenen, teilreagierten und aus der Krippenoberfläche austretenden

Zwischengases erst mit außen eingesaugter Luft in der Flamme über der Krippe erfolgt. Die Berechnungen, die hierzu im weiteren Fortgang des Forschungsvorhabens durchgeführt werden, werden darüber weitere Erkenntnisse liefern.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurde das Brandverhalten von aus quadratischen Kiefernstäben aufgebauten Holzkrippen, die sich jeweils durch die Porosität, die Höhe und die Begrenzung der seitlichen Luftzufuhr voneinander unterschieden, untersucht. Die Krippen wurden unterseitig in der Krippenmitte gezündet. Während des Abbrandes wurden Temperaturen in mehreren vertikalen Kanälen der Krippe gemessen, sowie der Massenverlust aufgezeichnet. Dadurch und durch die visuellen Beobachtungen war es möglich, die Ausbreitungsgeschwindigkeit sowie die Form der Flammenfront zu bestimmen.

Es wurde festgestellt, daß die Flammenkontur bei Krippen mit mangelnder Luftzufuhr (geschlossene Seitenflächen, kleine Porosität, große Höhen) nicht wie bei den anderen Versuchen zylinderförmig ist. In diesen Fällen lieferte die Temperaturauswertung im Hinblick auf die Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit keine befriedigenden Ergebnisse. Wegen des im Verhältnis zur Gesamtabmessung der Krippen relativ großen Durchmessers der Zündquelle läßt sich die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit nicht in Abhängigkeit vom zurückgelegten Weg angeben, da dafür die Meßpunkte nicht eng genug beieinanderlagen.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt auf, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit wachsender Porosität zunimmt. Dies trifft ebenfalls bei Vergrößerung der Krippenhöhe zu. Außerdem wirkt sich bei den meisten Versuchen die seitliche Luftzufuhrbehinderung in der Weise aus, daß die Abbrandgeschwindigkeit kleiner als bei Krippen mit offener Seitenfläche

ist. Die Ergebnisse zeigen auch, daß das Abbrandverhalten einer Krippe vor allem von Parametern abhängt, die die Luftzufuhr in die durch die Holzstäbe gebildeten Kanäle beeinflussen. Es scheint jedoch berechtigt zu sein anzunehmen, daß die Zunahme der Krippenhöhe eine größere Wärmekonzentration innerhalb der Krippen, d.h. eine Freisetzung eines insgesamt größeren Wärmestromes in die Holzstäbe hinein ermöglicht, wodurch die Pyrolysegeschwindigkeit erhöht und damit ebenfalls die Abbrandgeschwindigkeit gesteigert wird.

Die Meßwerte dienen als Vergleichsmaßstab für die Rechenergebnisse, die im Rahmen des nächsten Forschungsauftrages auf der Basis der in /2/ vorgestellten Modellvorstellung ermittelt werden. Bei dem dort vorgestellten Modell werden die Vorgänge in der Gasphase in den vertikalen Kanälen der Krippe und die Vorgänge in den diese Kanäle umgebenden Holzstäben verknüpft, um zunächst insbesondere die Ausbreitung der Flamme in die Senkrechte und den weiteren Abbrandvorgang an den Wänden des durch die Holzstäbe gebildeten Kanals zu untersuchen. Da für diese Untersuchungen eine Voraussetzung darin besteht, daß die zur Verbrennung angesaugte Luft nur über den Boden der Krippe zugeführt wird, dienen die Meßergebnisse aus den hier vorgestellten Versuchen mit geschlossener Seitenfläche, d.h. Behinderung einer seitlichen Luftzufuhr als erste Vergleichswerte.

In einem weiteren Schritt der Rechnung wird dann aufgrund der Strömungswiderstände in der Krippe einerseits und der Expansion der Gase infolge der Temperaturerhöhung während der Verbrennung andererseits zu berechnen sein, wie sich die Flamme in Abhängigkeit von der Porosität durch die seitlichen Öffnungen von einem Kanal in den daneben liegenden ausbreitet.

7. FORMELZEICHEN

a	Abstand der Meßstelle vom Zündort
b	Stabdicke
H	Krippengesamthöhe
h'	h_i/H
h	Höhenkoordinate der Meßstellen
L	Stablänge
m	Masse
n	Anzahl der Stäbe pro Lage
S	Stababstand
t	Zeit
V_F	Geschwindigkeit der Flammenfrontausbreitung
ψ	Porosität der Krippe $\psi = (L-nb)/L$
ρ	Dichte
ϕ	rel. Feuchte des Holzes
ϑ	Temperatur

Indices

F	Flammenfront
max	Maximalwert

8. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Fons,W.L.
Clements,H.B.
George,P.M.:
Scale effects on propagation
rate of laboratory crib fires.
9. Symposium (International)
of Combustion
New York: Academic Press
(1963), S.860 - 866
- /2/ Brein,D.:
Modellbrandversuche zur
Bestimmung des Brandablaufs von
Feststoffbränden.
Forschungsbericht Nr.34 der
Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz
(AGF) (1978)
- /3/ Brein,D.
Schatz,H.:
Modellbrandversuche zur
Bestimmung des Brandablaufs von
Feststoffbränden.
Forschungsbericht Nr.27 der
Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz
(AGF) (1975)
- /4/ Brein,D.:
Modellbrandversuche zur
Bestimmung des Brandablaufs von
Feststoffbränden.
Forschungsbericht Nr.38 der
Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz
(AGF) (1979)
- /5/ Gross,D.:
Experiments on the burning of cross
piles of wood.
Journal of Research of the National
Bureau of Standards.
66 C (1962) Nr.2, S.99-105;

/6/ Block, J.A.:

A theoretical and experimental study of nonpropagating free-burning fires.

Cambridge, Harvard Univ.,
Diss. (1970), und 13. Symposium
(International) on Combustion,
S. 971-978;

Pittsburgh: The Combustion
Institute (1971)

/7/ Thomas, P.H.:

On the rate of burning of cribs.

Fire Research Note No. 965,
Borehamwood: Fire Research Station
(1973)

9. TABELLEN UND BILDER

9.1. Tabellen

- Tabelle 1: Lage der Meßstellen in den untersuchten Krippen
- Tabelle 2: Versuchsergebnisse der Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit V_F , berechnet aus den Werten der Temperaturmessungen
- Tabelle 3: Versuchsergebnisse aus den Massenverlustmessungen
- Tabelle 4: Krippen mit offenen bzw. geschlossenen Seitenwänden. Angabe von v_{\max} .
- Tabelle 5: Zündzeitpunkt der Krippen

Tabelle 1: Lage der Meßstellen in den untersuchten Krippen.

Σ = Gesamtzahl der Thermoelemente
 a = Entfernung von der Zündquelle in cm
 h = Höhenkoordinate in cm
 H = Gesamthöhe in cm

TYP	a_1	a_2	a_3	a_4	h_1	h_2	h_3	h_4	Σ
(1/1/13)	0	2,83	5,66	8,49	0,5	2,5	---	---	8
	0	2,83	5,66	8,49	2,5	4,5	6,5	---	12
	0	2,83	5,66	8,49	2,5	6,5	10,5	---	12
	0	2,83	5,66	8,49	2,5	6,5	10,5	14,5	16
(1/1,5/13,5)	0	3,54	7,07	---	0,5	2,5	---	---	6
	0	3,54	7,07	---	2,5	4,5	6,5	---	9
	0	3,54	7,07	---	2,5	6,5	10,5	---	9
	0	3,54	7,07	---	2,5	6,5	10,5	14,5	12
(1/2/16)	0	4,24	8,49	---	0,5	2,5	---	---	6
	0	4,24	8,49	---	2,5	4,5	6,5	---	9
	0	4,24	8,49	---	2,5	6,5	10,5	---	9
	0	4,24	8,49	---	2,5	6,5	10,5	14,5	12

Tabelle 2: Versuchsergebnisse der Flammenfrontausbreitungsgeschwindigkeit V_F , berechnet aus den Werten der Temperaturmessungen

Krippengeometrie (Porosität)	Krippenhöhe (cm)	offene Seitenflächen V_F ($\frac{cm}{min}$)	geschlossene Seitenflächen V_F ($\frac{cm}{min}$)
1/1/13	4	zwischen dem 2. und 4. Thermoelement 1,25	zwischen dem 2. und 4. Thermoelement 1,31
	8	1,31	(1,42)+
	12	1,39	(1,33)+
	16	1,59	(1,12)+
1/1,5/13,5	4	zwischen dem 2. und 3. Thermoelement 1,25	zwischen dem 2. und 3. Thermoelement 1,84
	8	1,40	1,94
	12	1,42	2,10
	16	1,86	(1,68)+
1/2/16	4	1,70	1,43
	8	1,96	1,80
	12	2,25	2,14
	16	2,38	2,28

+ Diese Krippen brannten nicht mit zylindrischer Flammenkontur ab. Die berechneten Größen gelten nur für die 1. Ebene bei der Porosität 1/1/13 bzw. für die 1. und 2. Ebene bei der Porosität 1/1,5/13,5 und sind aus diesem Grunde keine charakteristischen Größen für die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit V_F über die ganze Krippe.

Tabelle 3: Versuchsergebnisse aus den Massenverlustmessungen

Krippengeometrie (Porosität)	Krippenhöhe (cm)	$\frac{dm}{dt} \Big _{\max}$ $\left(\frac{g}{sec}\right)$	offene Seitenflächen $\left \frac{dm}{H \cdot dt}\right _{\max}$ $\left(\frac{g}{cm \cdot sec}\right)$	geschlossene Seitenflächen $\left \frac{dm}{dt}\right _{\max}$ $\left(\frac{g}{sec}\right)$	Seitenflächen $\left \frac{dm}{H \cdot dt}\right _{\max}$ $\left(\frac{g}{cm \cdot sec}\right)$
(1/1/13)	4	0,91	0,23	0,60	0,15
	8	1,97	0,25	1,20	0,15
	12	1,80	0,15	1,65	0,13
	16	1,85	0,12	1,80	0,11
(1/1,5/13,5)	4	0,75	0,19	0,55	0,14
	8	(%)	(%)	1,20	0,15
	12	2,00	0,17	1,72	0,14
	16	2,80	0,18	2,30	0,15
(1/2/16)	4	1,03	0,26	0,70	0,17
	8	1,80	0,23	1,60	0,20
	12	2,80	0,23	2,50	0,21
	16	3,80	0,24	3,20	0,20

Tabelle 4: Krippen mit offenen bzw. geschlossenen Seitenwänden. Angabe von v_{\max}^j

$$h' = \frac{h_i}{H} .$$

	1/1/13 offen geschlos- sen		1/1,5/13,5 offen geschlos- sen		1/2/16 offen geschlos- sen		h'
H = 4 cm:							
1/2	930	910	880	600	410	480	0,125
3/2	880	860	920	980	780	820	0,625
1/3	910	750	830	780	650	600	0,125
3/3	910	870	930	900	900	850	0,625
H = 8 cm:							
3/2	900	910	910	960	870	880	0,3125
5/2	990	920	970	950	970	930	0,5625
7/2	930	930	970	960	980	920	0,8125
H = 12 cm:							
3/2	860	890	950	940	830	900	0,208
7/2	950	980	960	940	960	985	0,542
11/2	840	875	890	950	880	940	0,875
H = 16 cm:							
3/2	850	835	915	910	890	885	0,1563
7/2	925	960	945	945	990	940	0,406
11/2	915	1035	950	1005	975	975	0,656
15/2	660	825	890	960	875	925	0,906

Tabelle 5: Zündzeitpunkte der Krippen

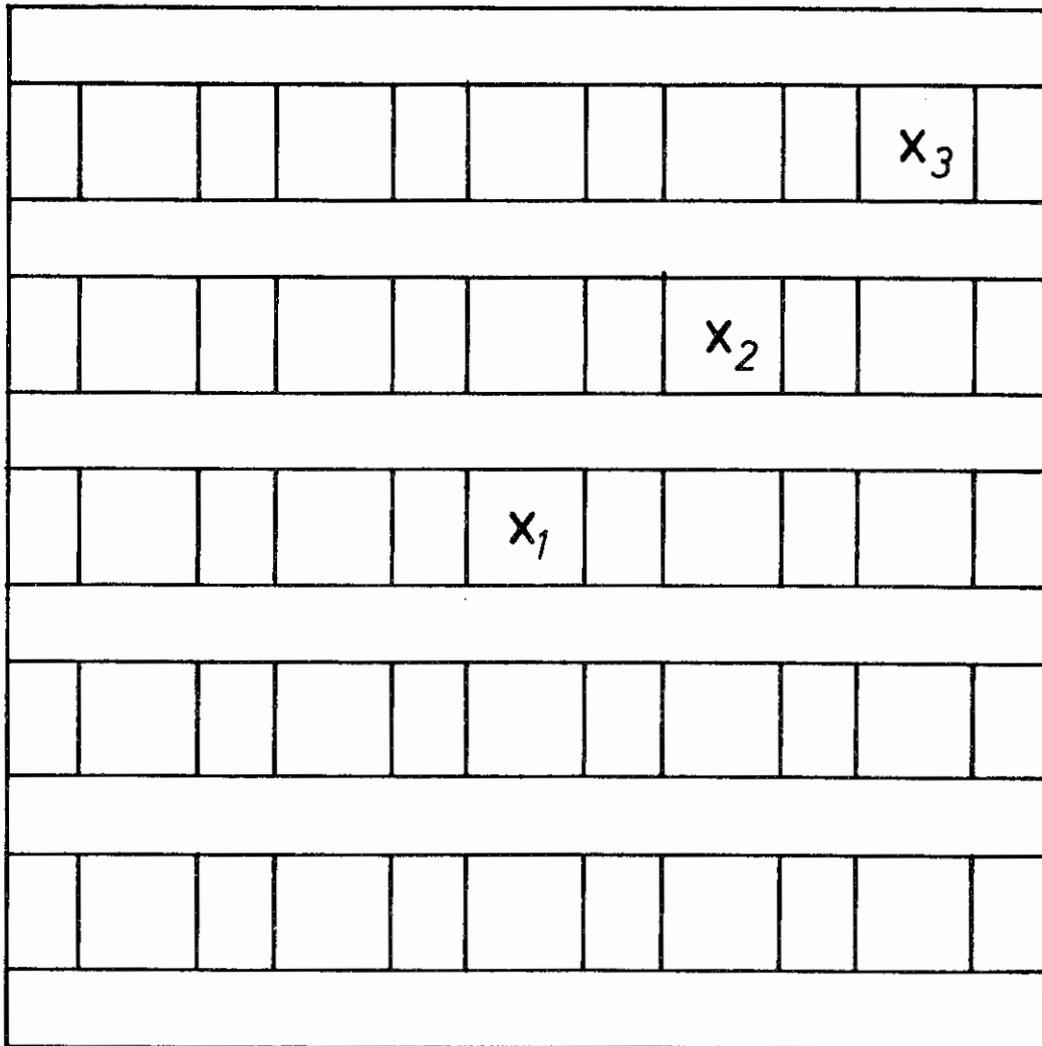
Porosität	Krippenhöhe (cm)	Zündzeitpunkte bei Krippen bei offener Seitenfläche (min)	Zündzeitpunkte bei Krippen bei geschlossener Seitenfläche (min)
(1/1/13)	4	2,50	3,93
	8	2,40	4,23
	12	2,23	3,90
	16	1,97	3,63
(1/1,5/13,5)	4	2,72	4,47
	8	3,23	4,80
	12	3,38	4,50
	16	3,35	4,77
(1/2/16)	4	4,58	6,63
	8	3,63	6,07
	12	3,25	6,55
	16	4,23	5,90

9.2. BILDER

- Bild 1a: Grundriß einer Krippe (1/1,5/13,5) mit Lage der Temperaturmeßstellen. Position der Zündquelle bis zum ersten Auftreten offener Flammen in der Krippe zentral unter X_1 .
- Bild 1b: Aufriß einer Krippe (1/1,5/13,5) der Höhe $H = 16$ cm mit Lage der Temperaturmeßstellen.
- Bild 2: Exemplarische Fotoserie des Abbrandes von Krippen (1/1/13) bzw. (1/2/16) mit geschlossenen Seitenflächen und der Höhe 16 cm.
- Bild 3: Exemplarische Darstellung der zeitlichen Temperaturverläufe in den Kanälen 2 und 3 einer Krippe (1/1,5/13,5) der Höhe 8 cm mit offenen Seitenflächen.
- Bild 4: Exemplarische Darstellung der zeitlichen Temperaturverläufe in den Kanälen 2, 3 und 4 einer Krippe (1/1/13) der Höhe 12 cm mit geschlossenen Seitenflächen.
- Bild 5: Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront, für alle Geometrien über der Krippenhöhe aufgetragen.
- Bild 6: Zeitlicher Verlauf der Restmasse einer Krippe (1/2/16) der Höhe 16 cm bei geschlossenen Seitenflächen.
- Bild 7: Zeitlicher Verlauf der Abbrandgeschwindigkeit dm/dt zu dem in Bild 6 wiedergegebenen Restmassenverlauf.
- Bild 8: Normierte Abbrandgeschwindigkeit für alle Geometrien, über der Krippenhöhe aufgetragen.

- Bild 9a: Aus mehreren Messungen gemittelte Maximaltemperaturen innerhalb der Krippen (1/1/13), über $h' = h_1/H$ aufgetragen.
- Bild 9b: Aus mehreren Messungen gemittelte Maximaltemperaturen innerhalb der Krippen (1/1,5/13,5), über $h' = h_1/H$ aufgetragen.
- Bild 9c: Aus mehreren Messungen gemittelte Maximaltemperaturen innerhalb der Krippen (1/2/16), über $h' = h_1/H$ aufgetragen.
- Bild 10: Zündzeitpunkte für alle Krippen, über der Krippenhöhe aufgetragen.
- Bild 11: Branddauer aller Krippen, über der Krippenhöhe aufgetragen.

Grundriß
M 1:1

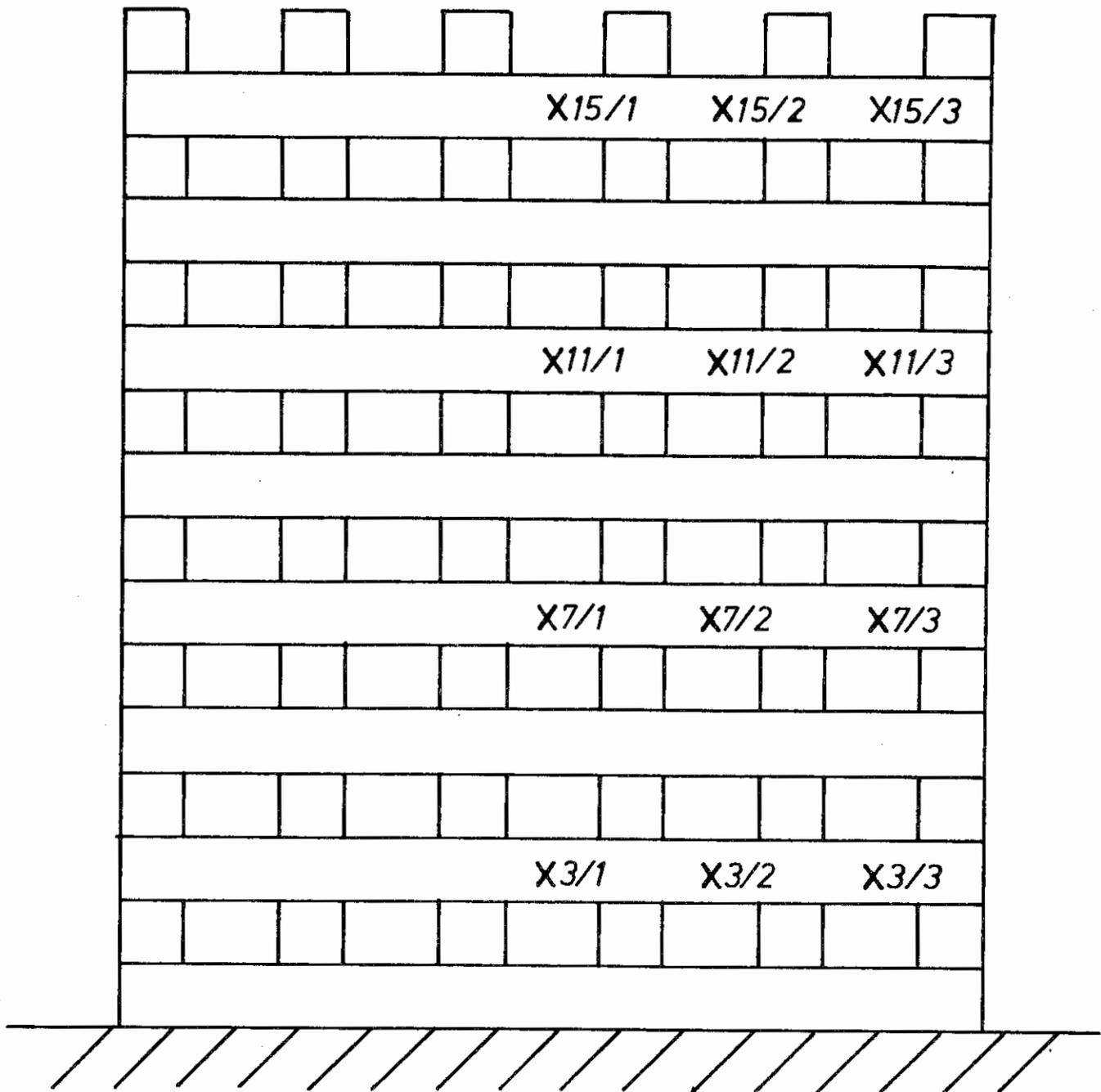


X Position der Meßstelle

Bild 1a: Grundriß einer Krippe (1/1,5/13,5) mit Lage der Temperaturmeßstellen. Position der Zündquelle bis zum ersten Auftreten offener Flammen in der Krippe zentral unter X_1 .

Aufriß

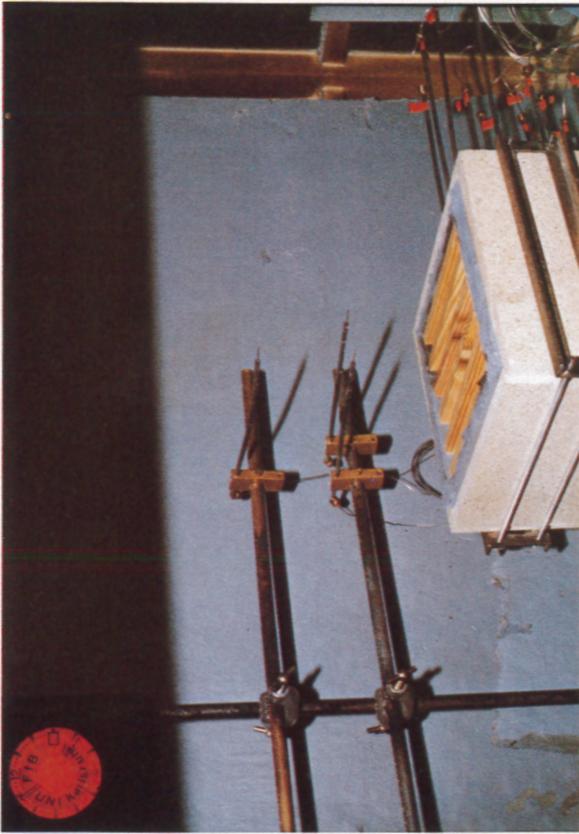
M 1:1



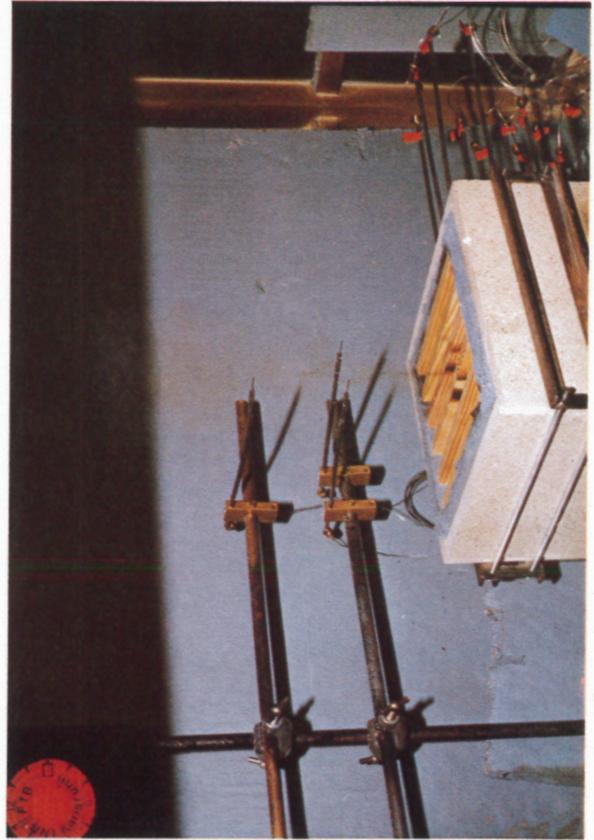
X Position der Meßstelle

Bild 1b: Aufriß einer Krippe (1/1,5/13,5) der Höhe $H = 16$ cm mit Lage der Temperaturmeßstellen.

(1/2/16)

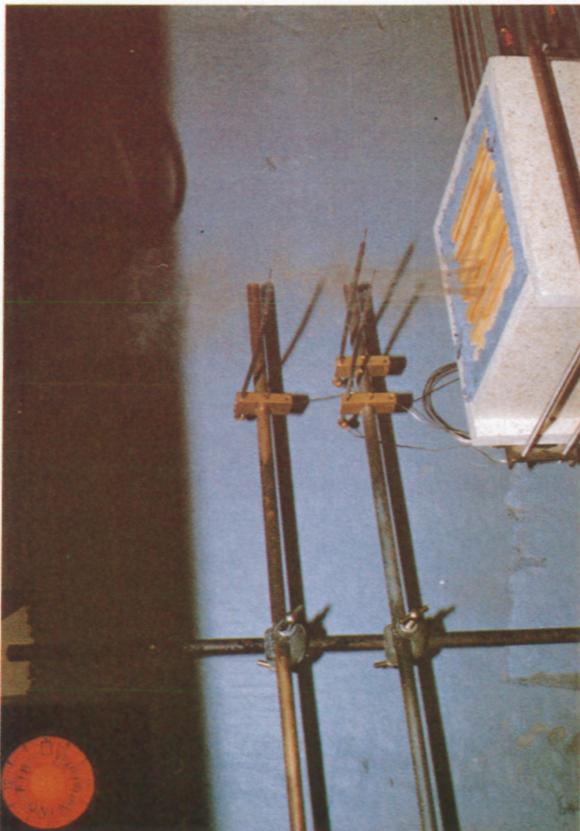


Zündung

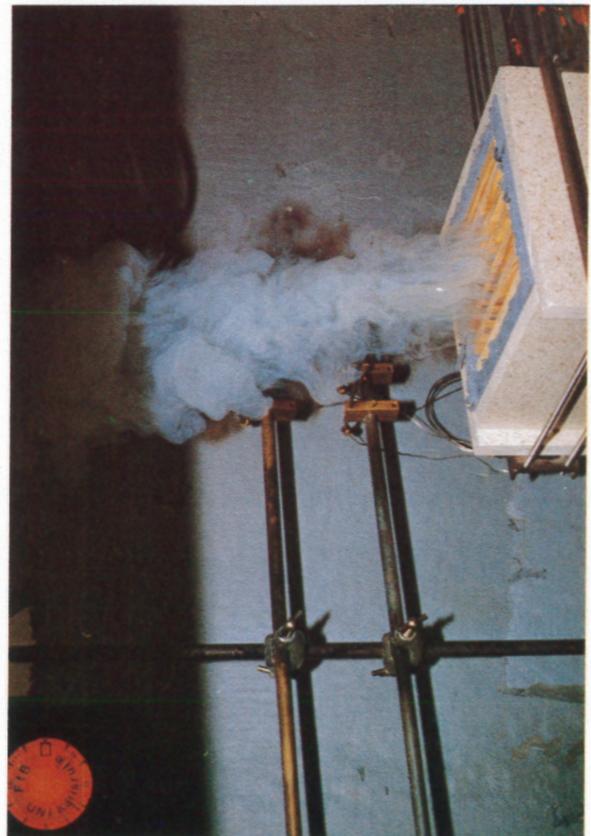


Branddauer: 1 min

(1/1/13)



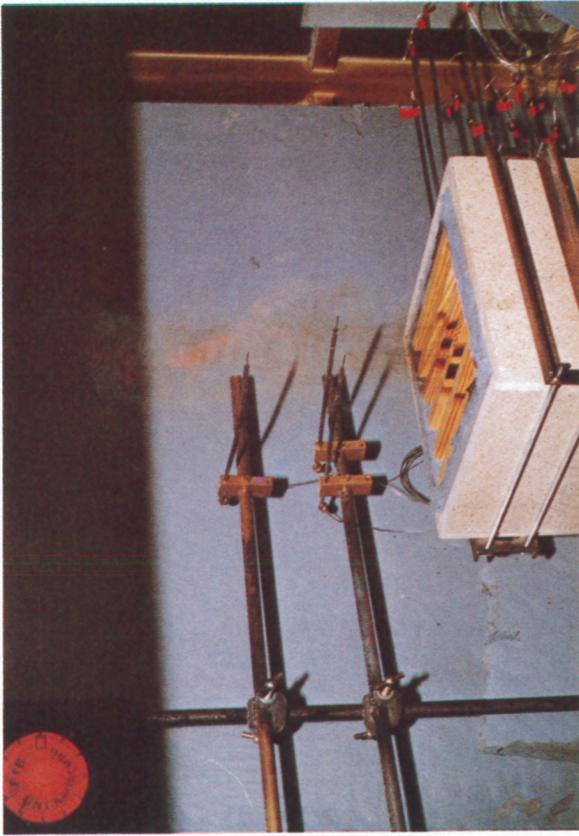
Zündung



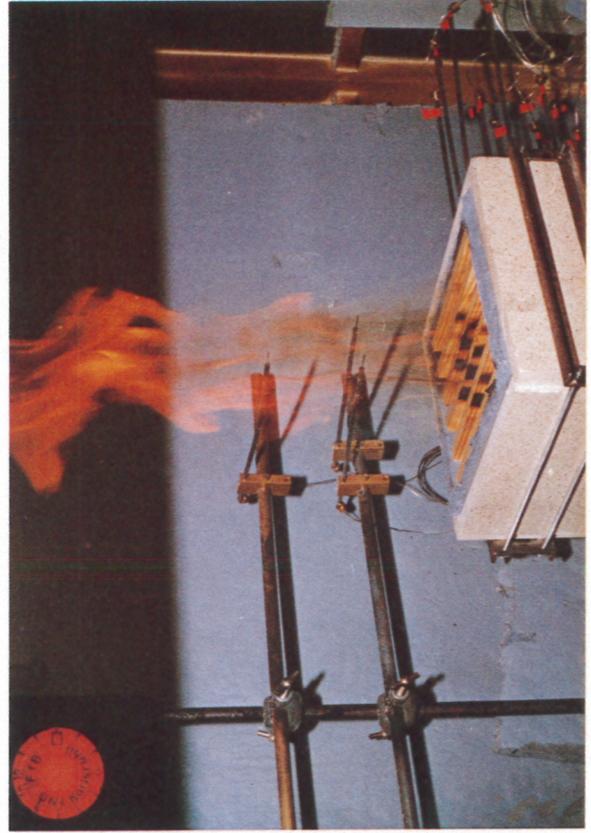
Branddauer: 1 min

Bild 2: Exemplarische Fotoserie des Abbrandes von Krippen (1/1/13) bzw. (1/2/16) mit geschlossenen Seitenflächen und der Höhe von 16 cm.

(1/2/16)

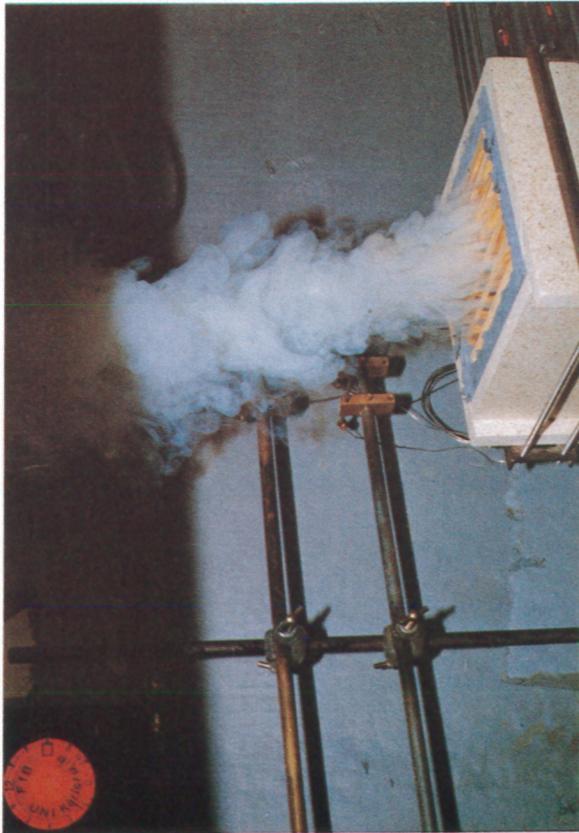


Branddauer: 2 min

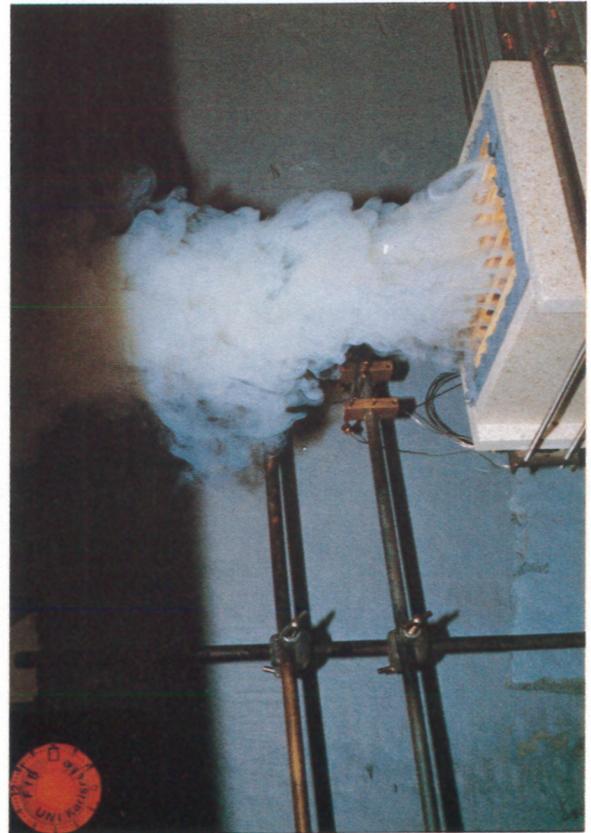


Branddauer: 3 min

(1/1/13)

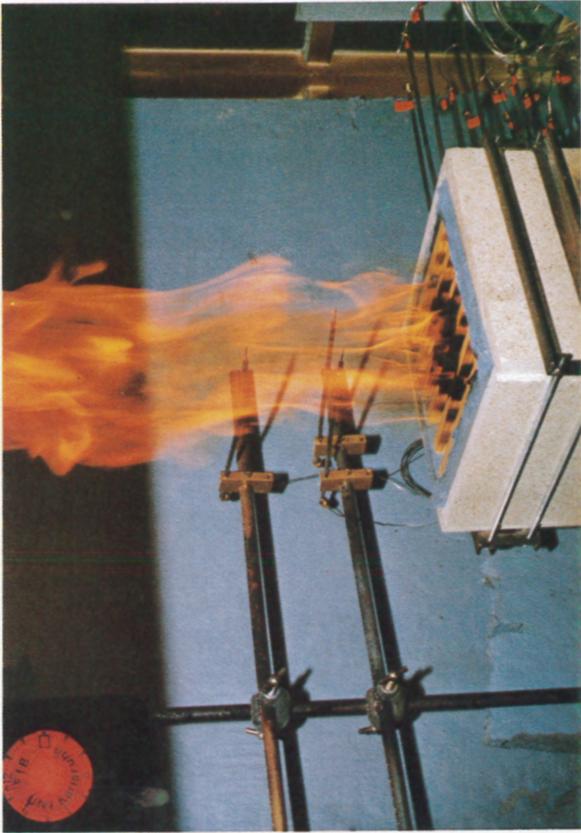


Branddauer: 2 min

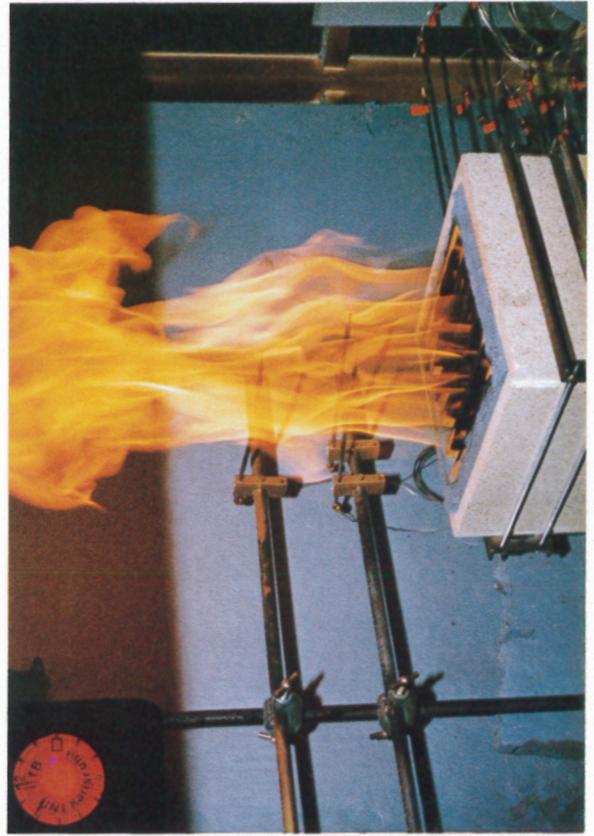


Branddauer: 3 min

(1/2/16)

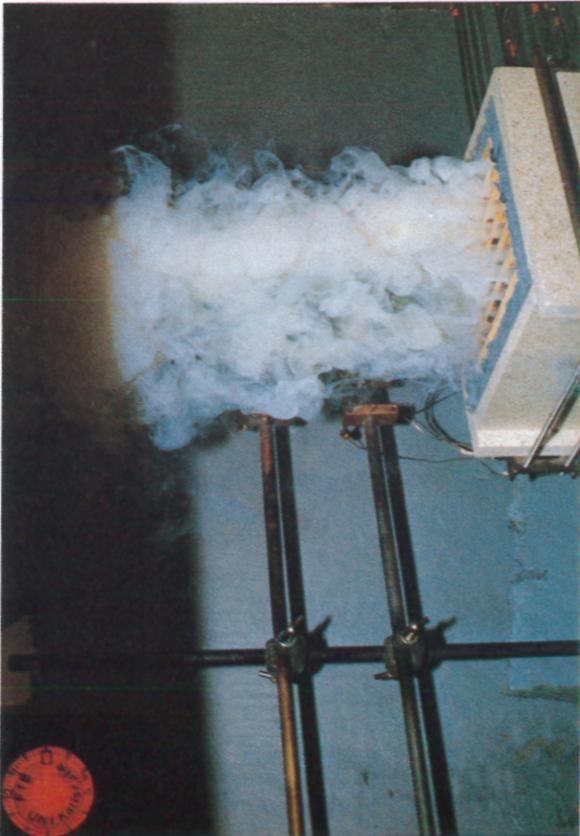


Branddauer: 4 min

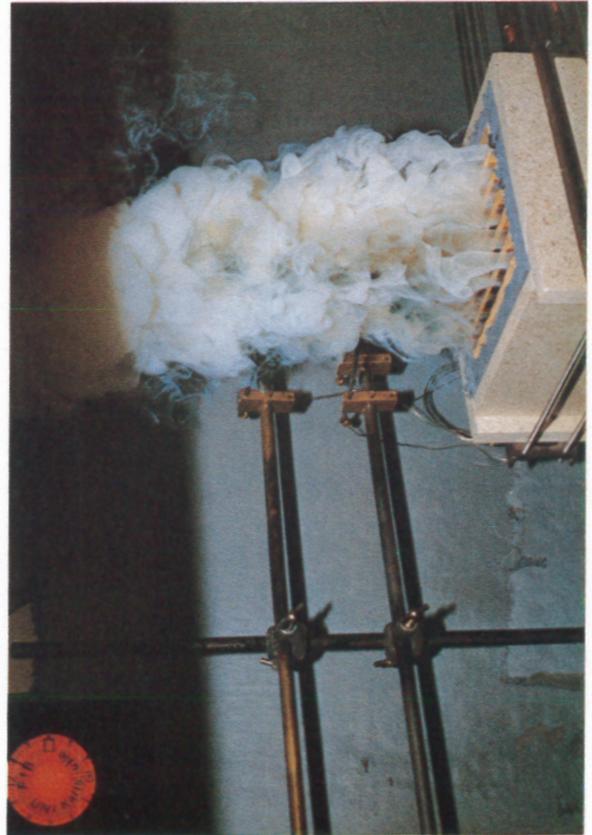


Branddauer: 5 min

(1/1/13)

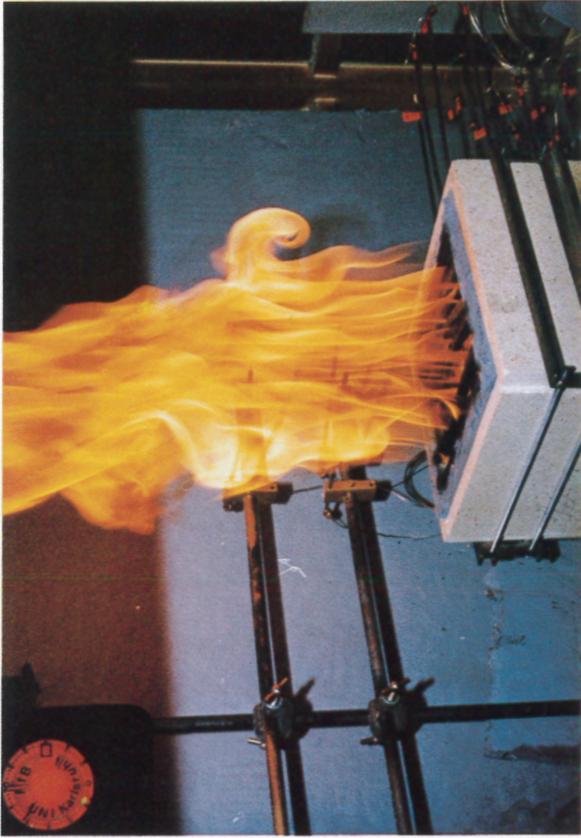


Branddauer: 4 min

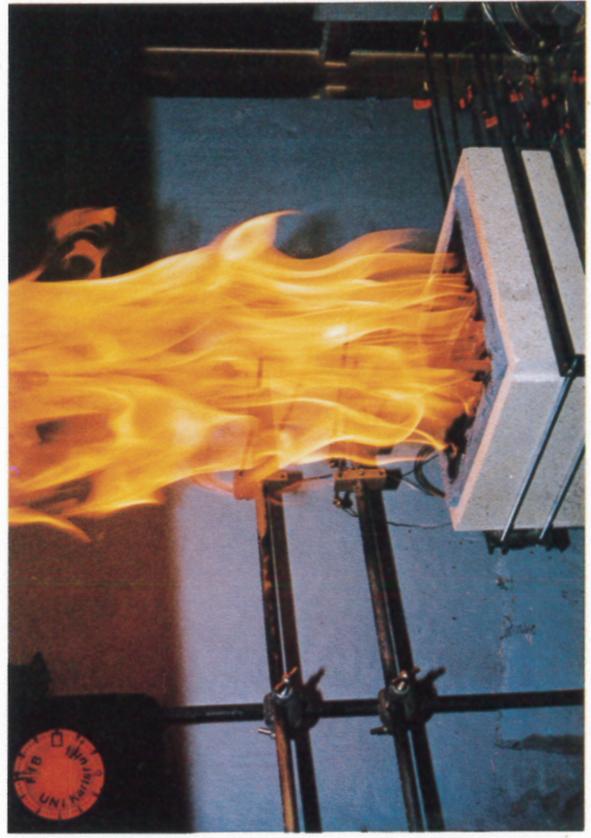


Branddauer: 5 min

(1/2/16)

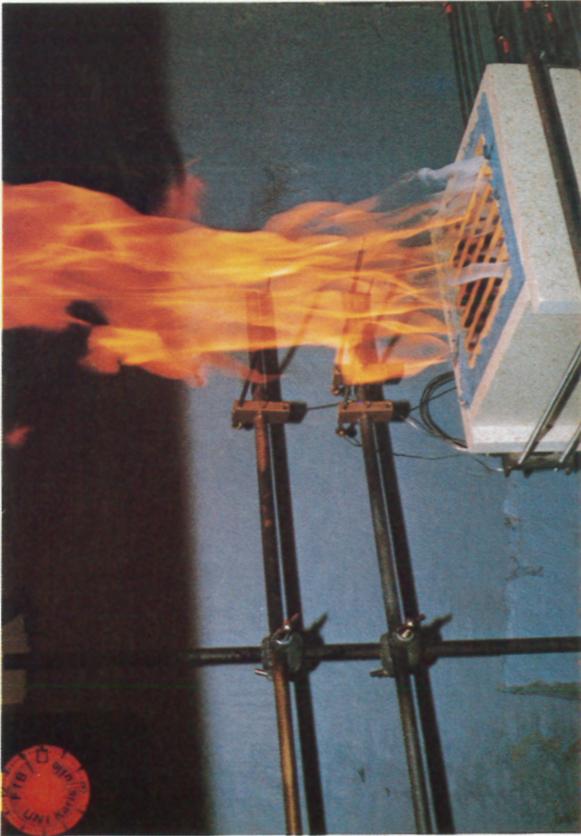


Branddauer: 6 min

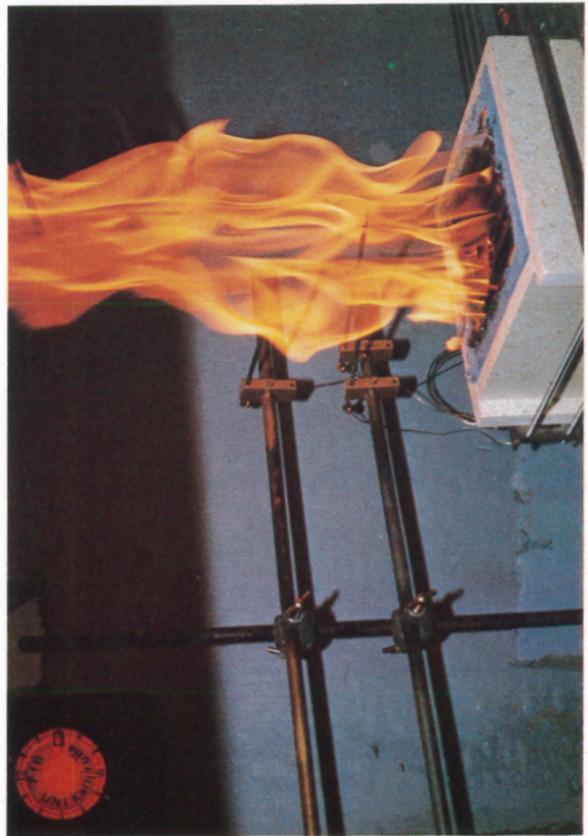


Branddauer: 7 min

(1/1/13)



Branddauer: 6 min



Branddauer: 7 min

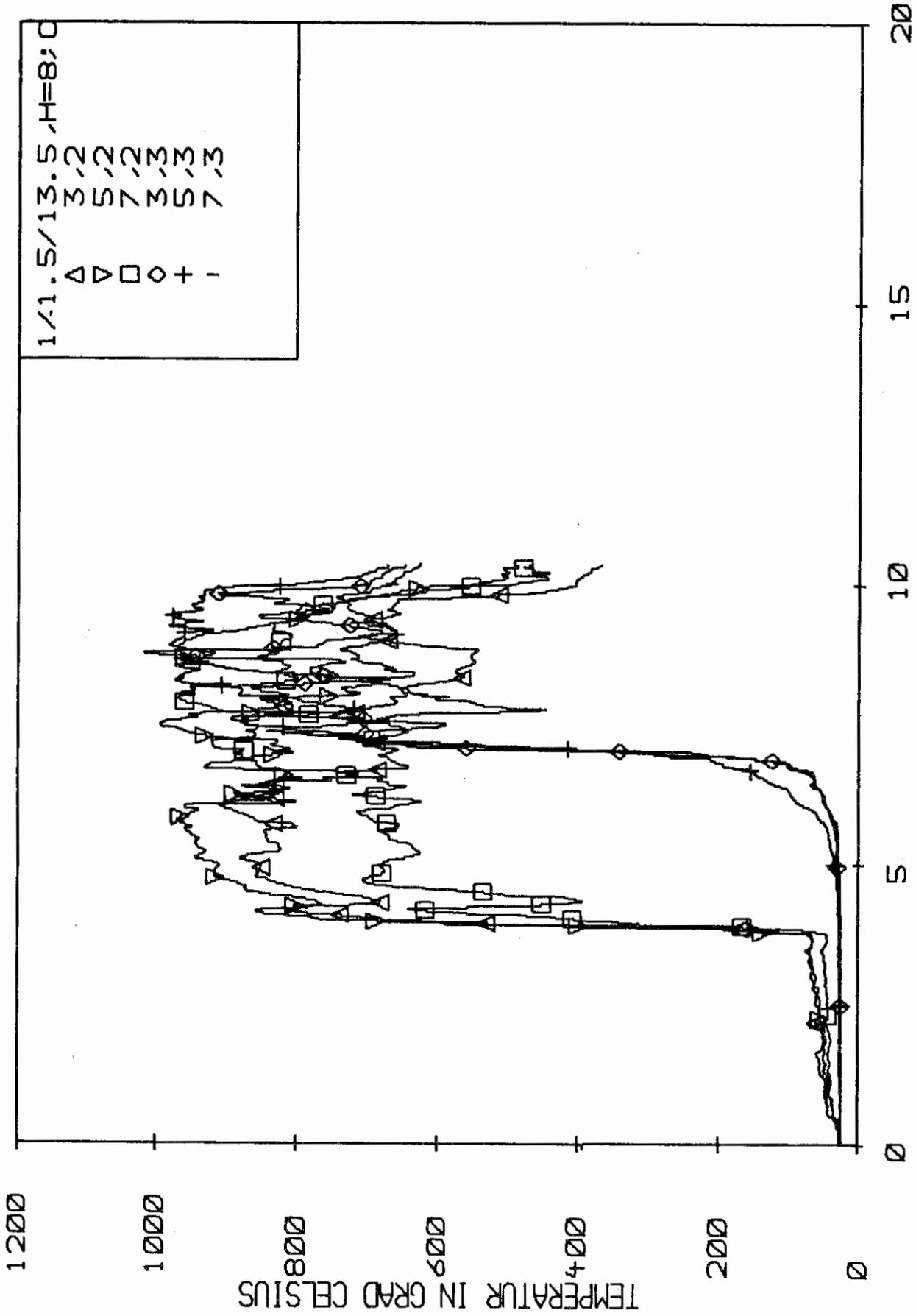


Bild 3: Exemplarische Darstellung der zeitlichen Temperaturverläufe in den Kanälen 2 und 3 einer Krippe (1/1,5/13,5) der Höhe 8 cm mit offenen Seitenflächen.

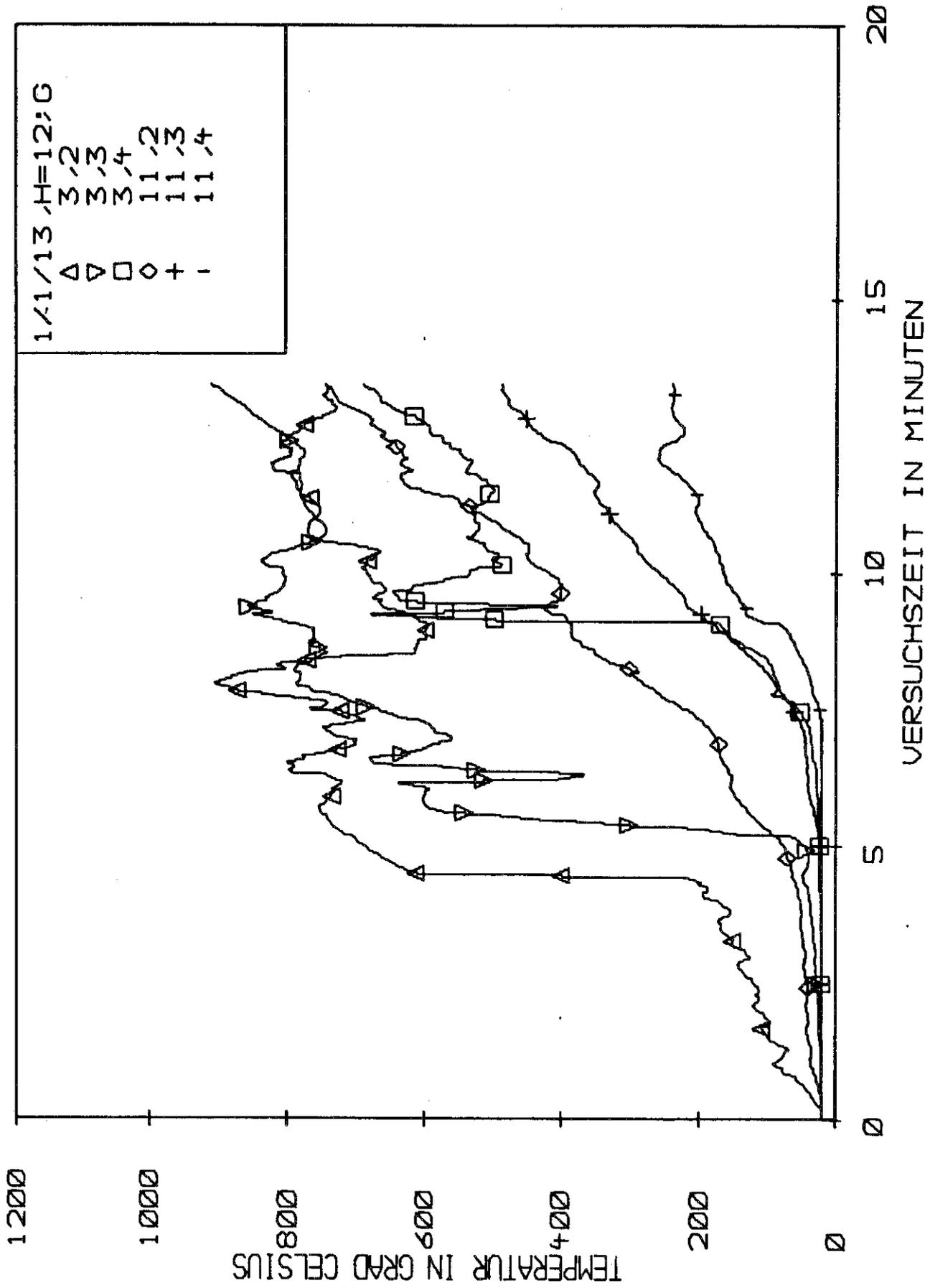


Bild 4: Exemplarische Darstellung der zeitlichen Temperaturverläufe in den Kanälen 2,3 und 4 einer Krippe (1/1/13) der Höhe 12 cm mit geschlossenen Seitenflächen.

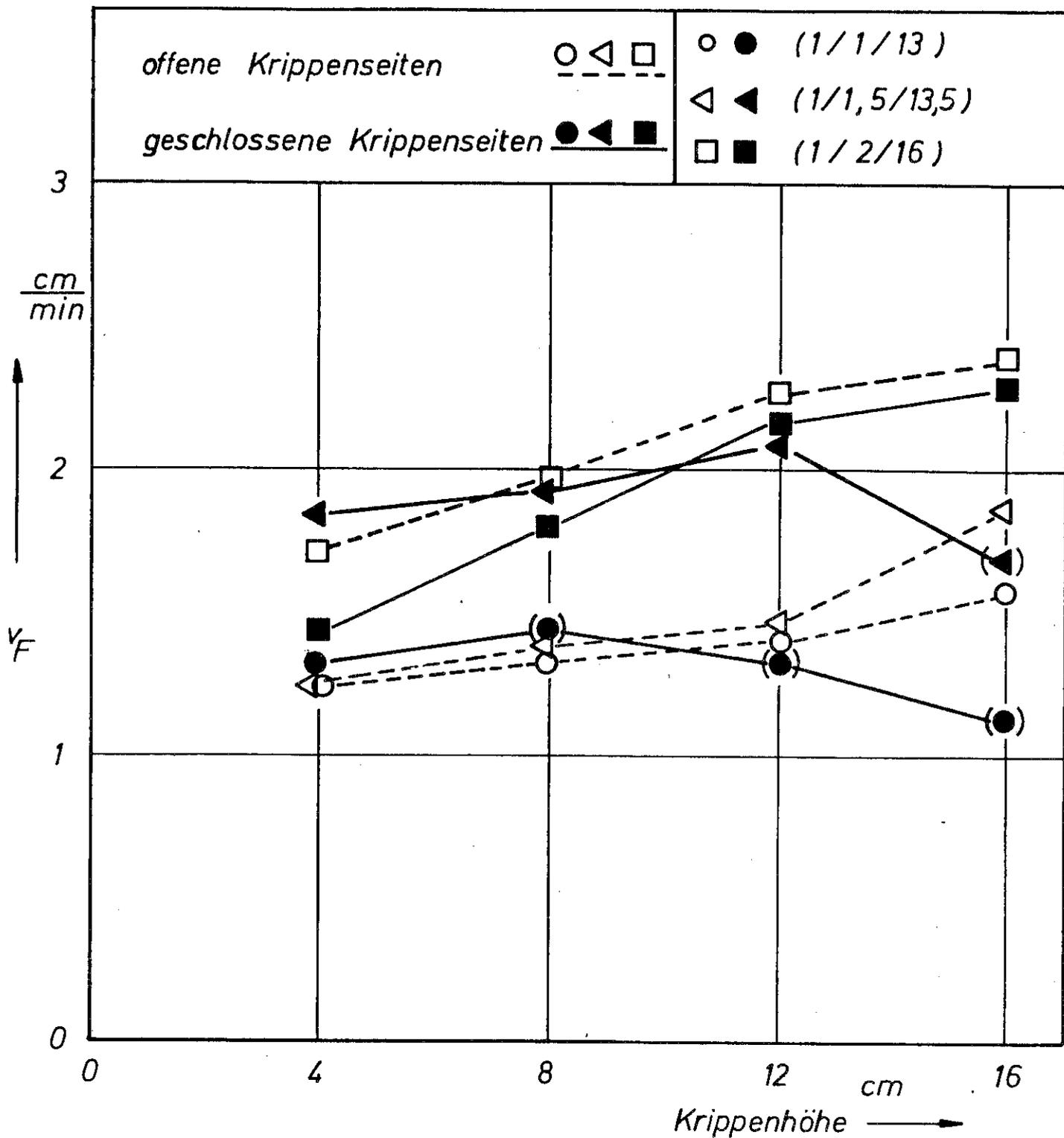


Bild 5: Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront, für alle Geometrien über der Krippenhöhe aufgetragen.

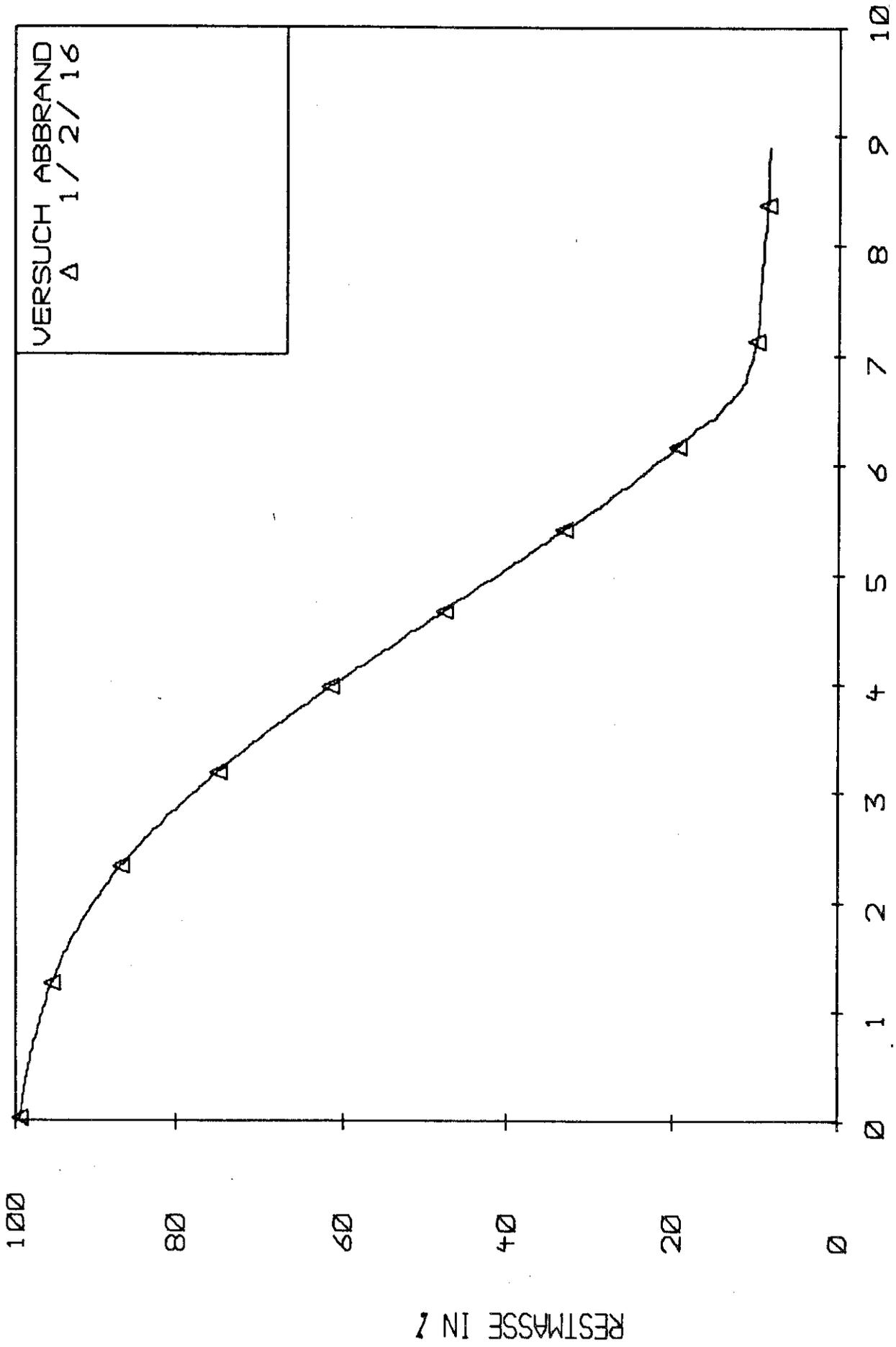


Bild 6: Zeitlicher Verlauf der Restmasse einer Krippe (1/2/16) der Höhe 16 cm bei geschlossenen Seitenflächen.

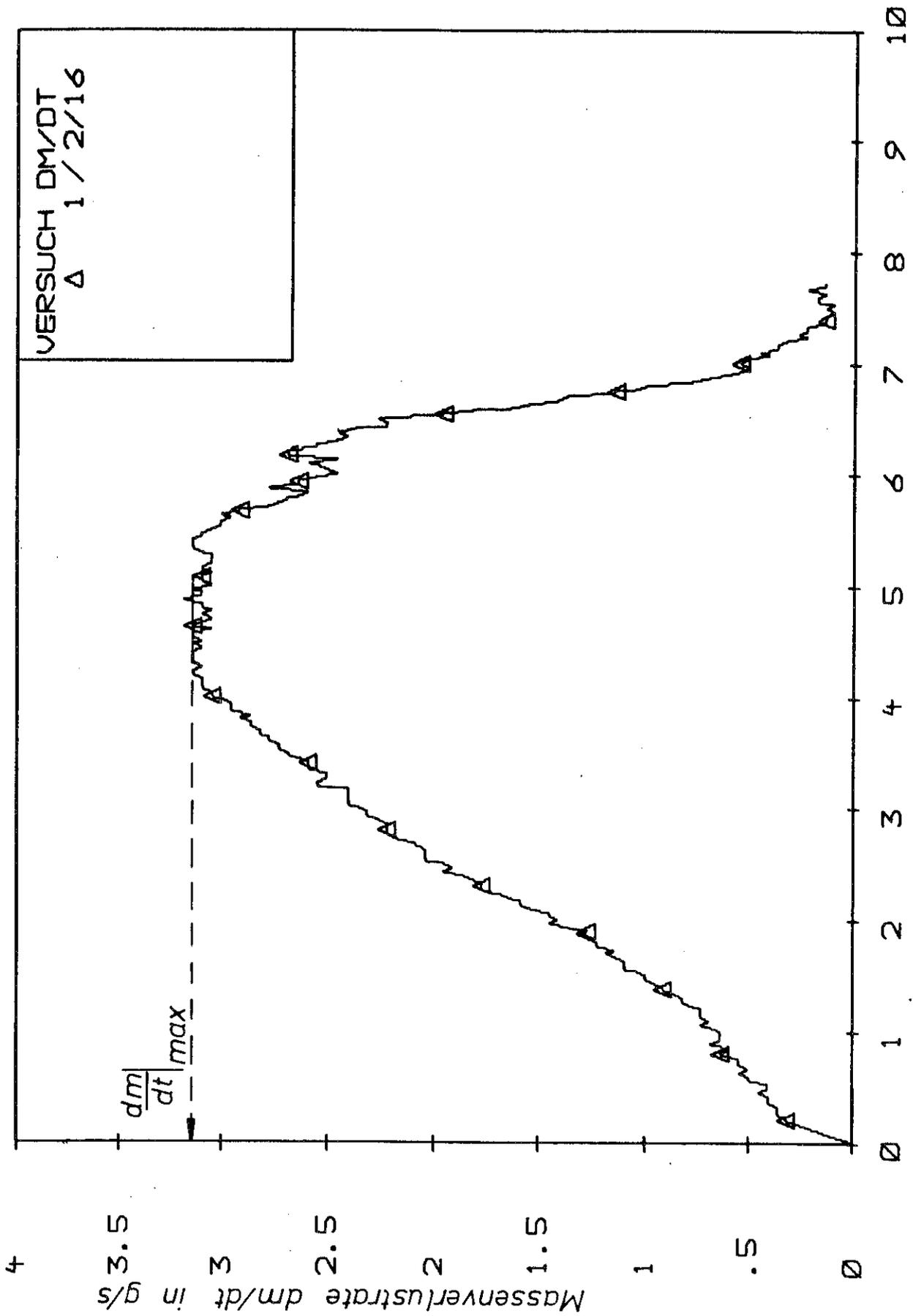


Bild 7: Zeitlicher Verlauf der Abbrandgeschwindigkeit dm/dt zu dem in Bild 6 wiedergegebenen Restmassenverlauf.

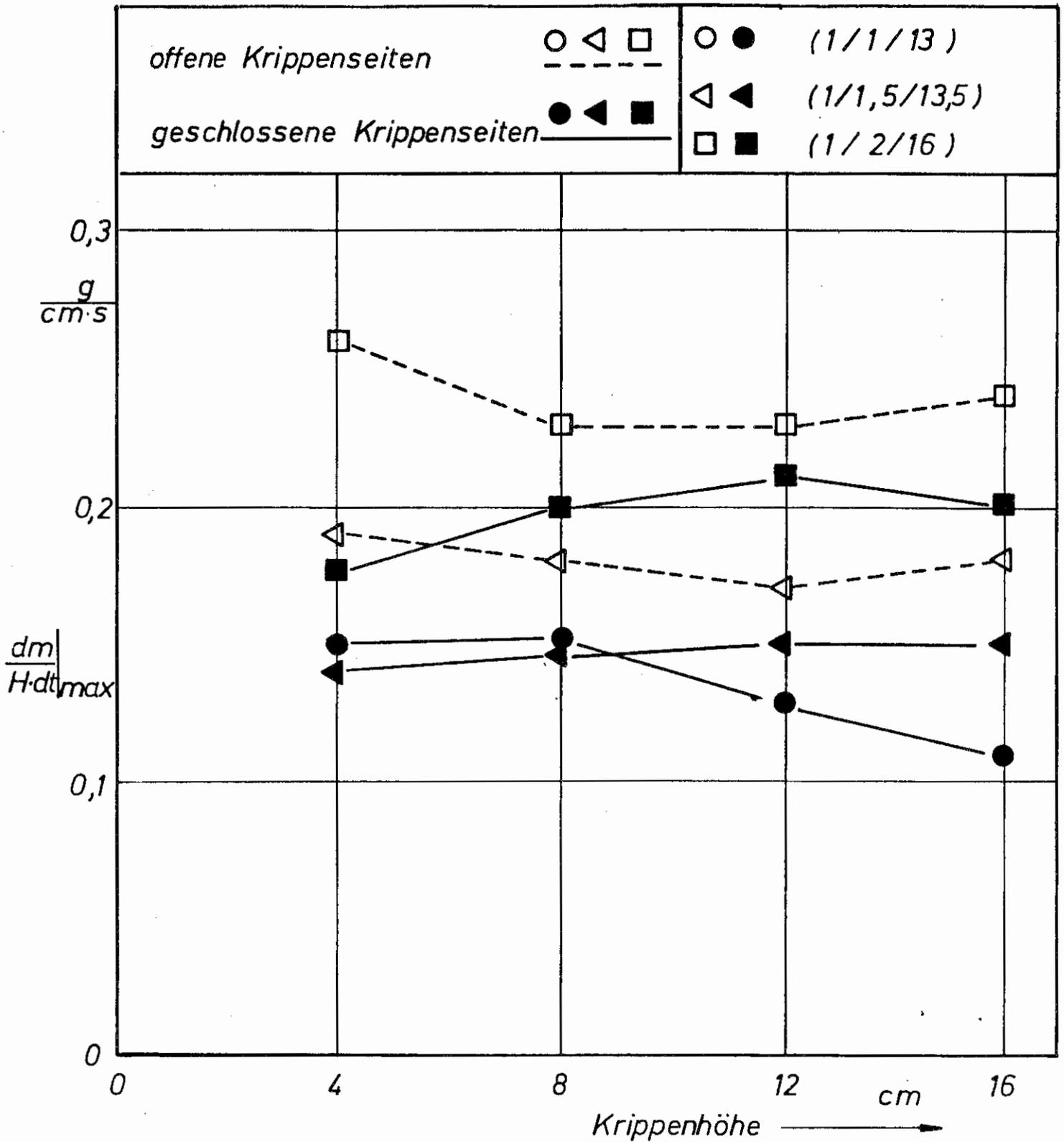


Bild 8: Normierte Abbrandgeschwindigkeit für alle Geometrien, über der Krippenhöhe aufgetragen.

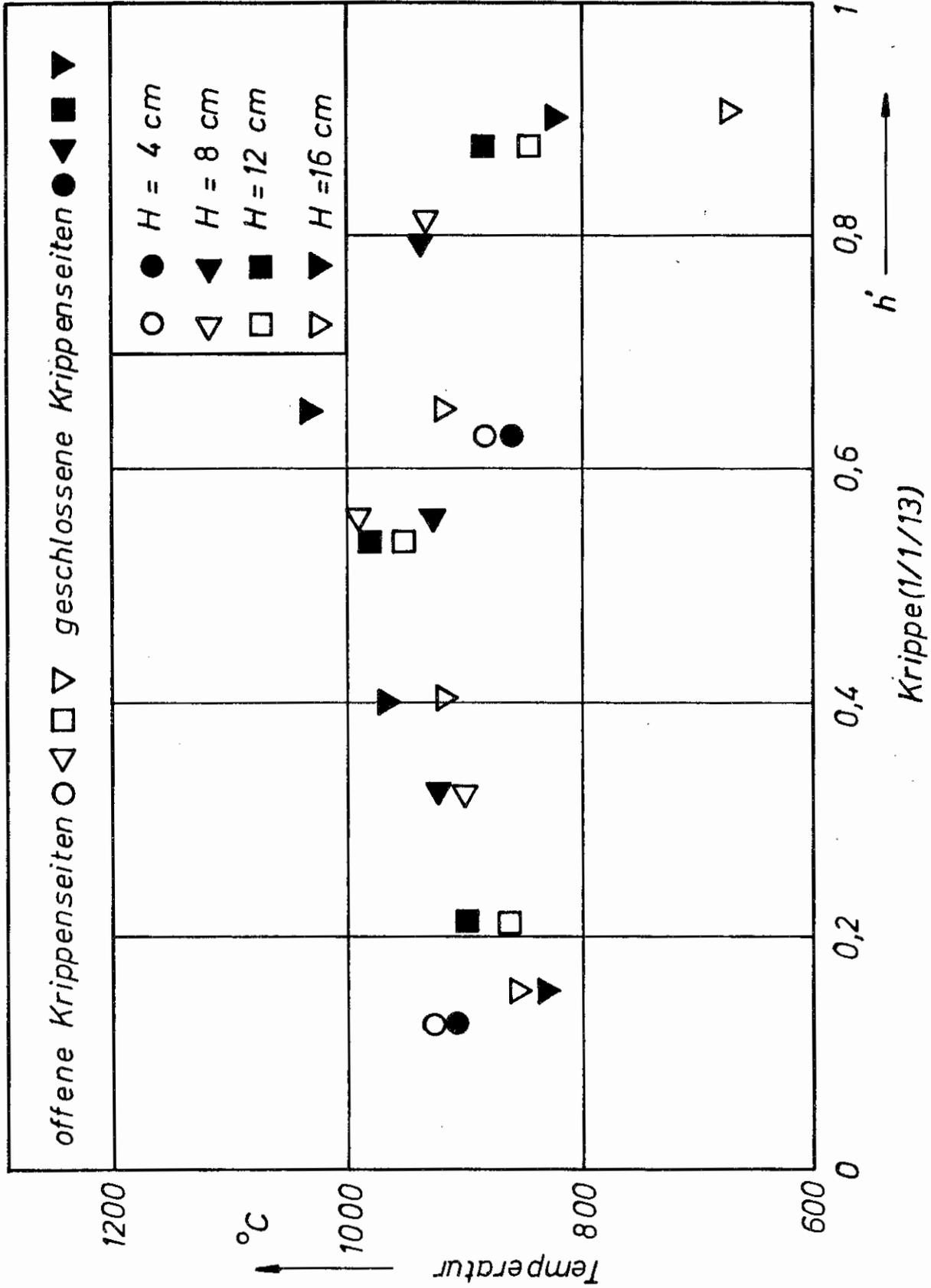


Bild 9a: Aus mehreren Messungen gemittelte Maximaltemperaturen innerhalb der Krippen (1/1/13), über $h' = h / H$ aufgetragen.

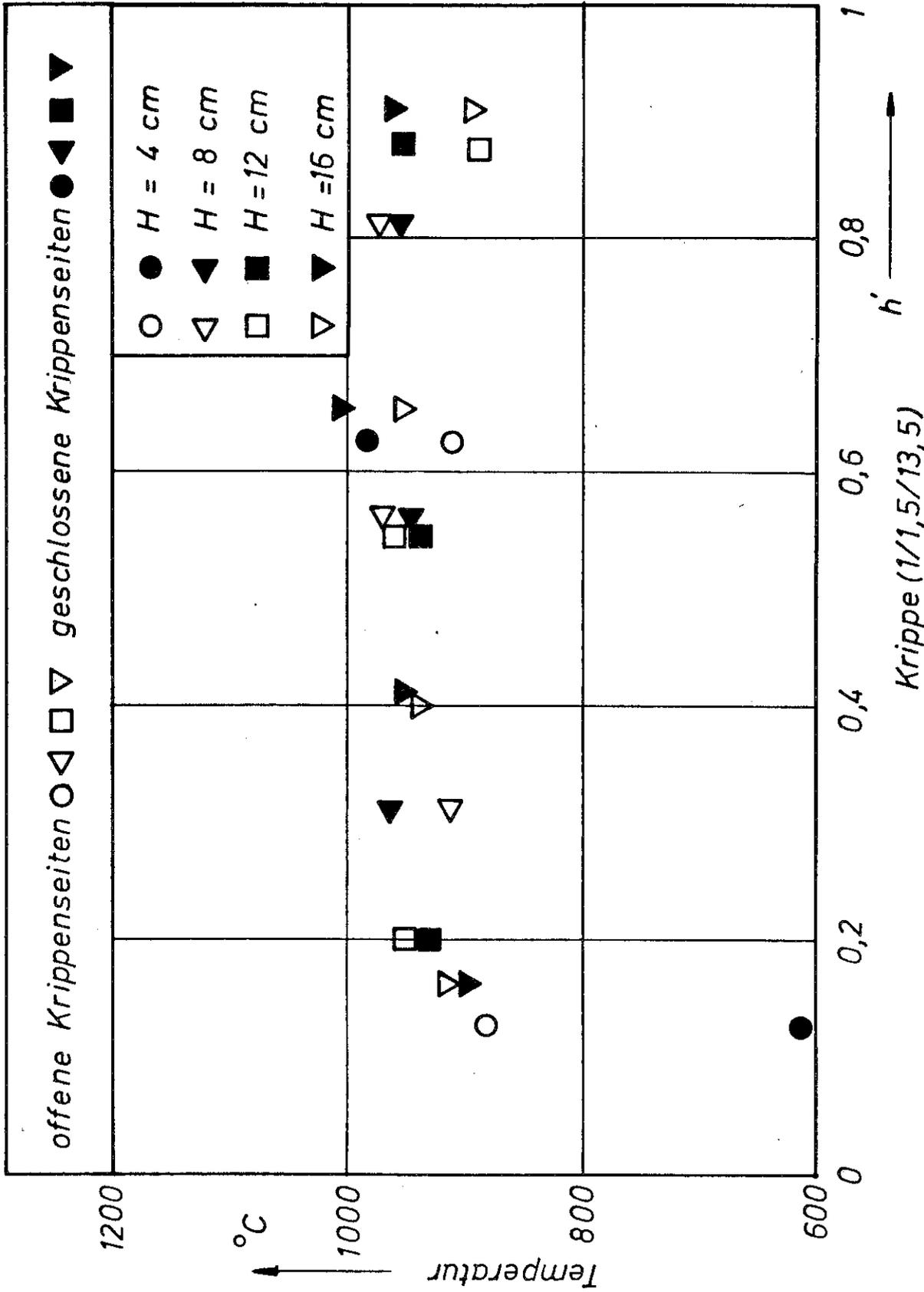


Bild 9b: Aus mehreren Messungen gemittelte Maximaltemperaturen innerhalb der Krippen (1/1,5/13,5), über $h' = h / H$ aufgetragen.

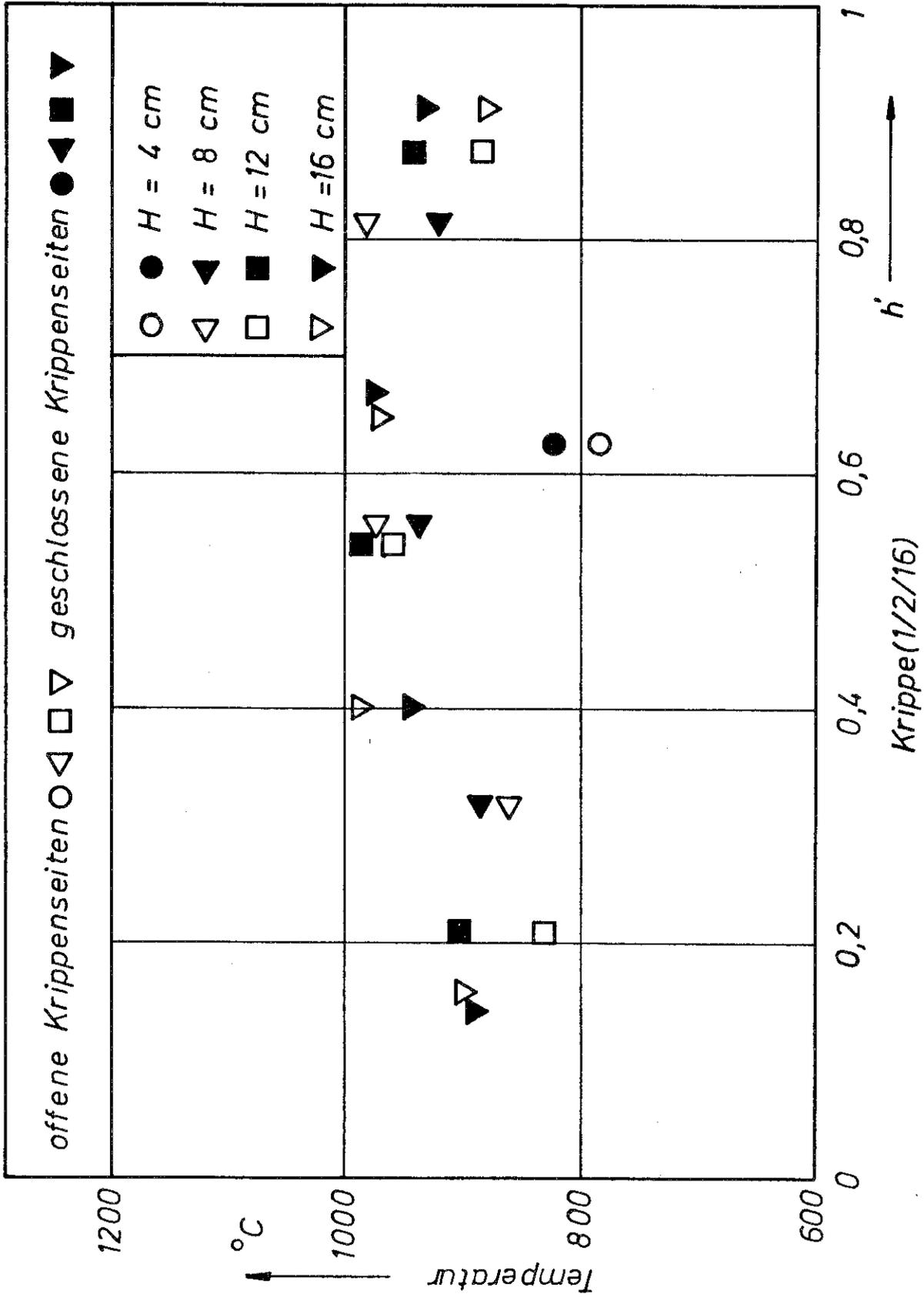


Bild 9c: Aus mehreren Messungen gemittelte Maximaltemperaturen innerhalb der Krippen (1/2/16), über $h' = h / H$ aufgetragen.

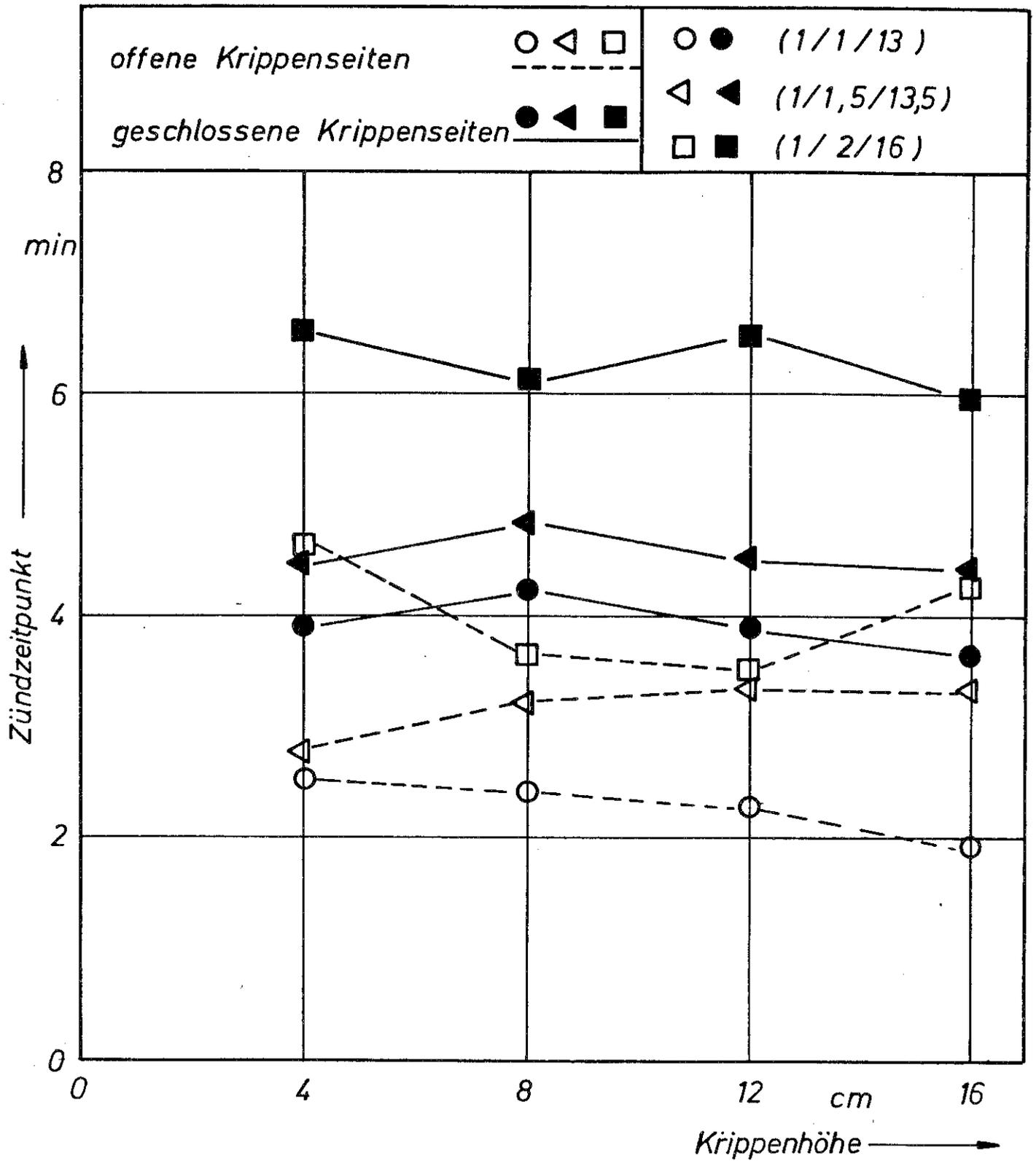


Bild 10: Zündzeitpunkte für alle Krippen, über der Krippenhöhe aufgetragen.

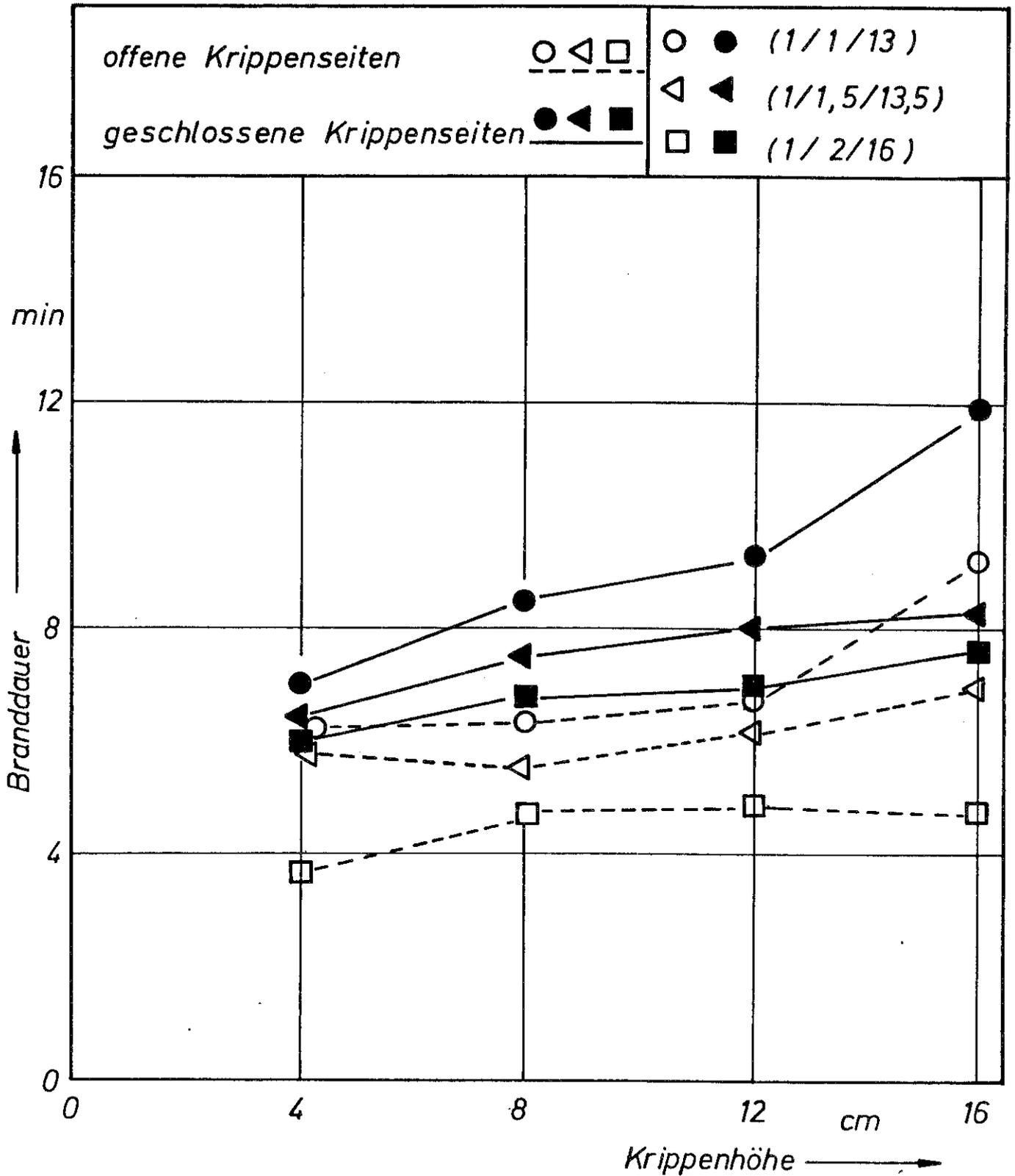


Bild 11: Branddauer aller Krippen, über der Krippenhöhe aufgetragen.