

AGF

BERICHTE

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

Modellbrandversuche zur Bestimmung des Brandablaufs
von Feststoffbränden

30

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER LANDESDIENSTSTELLEN
FÜR FEUERSCHUTZ IN DEN BUNDESLÄNDERN (AGF)

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

AGF

Forschungsbericht Nr. 30

Modellbrandversuche zur Bestimmung des Brandablaufs von Feststoffbränden

Dipl.-Ing. Dieter Brein

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe

Im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsauftrages werden an freibrennenden, aus Kiefernstäben quadratischen Querschnitts erstellten Holzkrippen mit verschiedenen Höhen und wechselnden Kanalabmessungen Modellbrandversuche zur Bestimmung des Brandablaufes von Feststoffbränden durchgeführt.

In der vorliegenden Arbeit wird über Messungen der Abbrandgeschwindigkeit, Messungen der von der Krippe ausgehenden Wärmestrahlung sowie über Messungen der Gaszusammensetzung des aus den Kanälen der Krippe austretenden Abgases berichtet. Die Messungen der Abbrandgeschwindigkeit führten zu einer empirischen Gleichung, die den Verlauf der Abbrandgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den geometrischen Parametern für an einer Ecke entzündete Krippen mit quadratischer Grundfläche angibt.

Es wird ferner über Messungen der Massen-, der Volumen- und der Flächenabnahme des einzelnen Stabes im Verband der Krippe bei einem Gesamtmassenverlust der Krippe von 50 % berichtet. Die Diskussion der Meßergebnisse zeigt, daß insbesondere bei Krippen mit im Verhältnis zur Stabdicke kleinen Kanalbreiten eine zum Anfangswert relativ starke Erweiterung der Kanäle durch die Verbrennung stattfindet, wodurch bei fortschreitendem Abbrand eine verbesserte Verbrennungsluftzufuhr und daraus eine erhöhte Abbrandgeschwindigkeit resultiert.

Die hier erhaltenen Werte dienen als Grundlage für ein Rechenmodell, mit dem die Zündung und die Verbrennung von Holzkrippen beschrieben werden kann.

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

AGF

Forschungsbericht Nr. 30

Modellbrandversuche zur Bestimmung des
Brandablaufs von Feststoffbränden

von

Dipl.-Ing. Dieter Brein

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Juli 1976

FA.Nr. 67(3/74)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite	
1.	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2.	GRUNDLAGEN UND LITERATUR	3
2.1.	Einzelstab	3
2.2.	Die frei brennende Krippe	5
3.	VERSUCHSPROGRAMM	8
4.	VERSUCHSAUFBAU UND MESSVERFAHREN	10
4.1.	Brandraum	10
4.2.	Bestimmung des Abbrands	10
4.3.	Wärmestrahlung der Krippen	11
4.4.	Gaszusammensetzung	11
5.	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	12
6.	VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION	13
6.1.	Massenverlust und Abbrandgeschwindigkeit	13
6.1.1.	Dicht gepackte Krippe	13
6.1.2.	Verhalten des Einzelstabes in der Krippe	16
6.2.	Wärmeabstrahlung und Temperaturen	20
6.3.	Gaskonzentrationen über der Krippe	21
7.	ZUSAMMENFASSUNG	23
8.	FORMELZEICHEN	24
9.	LITERATURVERZEICHNIS	25
10.	TABELLEN UND BILDER	27

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Die in der Praxis ablaufenden Schadenfeuer werden außer von der Voraussetzung wesentlich erhöhter Temperaturen von im Grunde zwei Faktoren bestimmt. Diese sind das brennbare Material und seine Anhäufung einerseits und die Möglichkeit der Verbrennungsluftzufuhr andererseits, wobei beide Einflüsse in Wechselwirkung stehen und mehr oder weniger die Art des Brandablaufs bestimmen.

Prinzipiell kommen als Brandgut alle brennbaren Materialien von den Gasen über die Flüssigkeiten bis zu den Feststoffen in Betracht, wobei bei den letzteren besonders solche auf organischer Basis wie Holz und Holzwerkstoffe sowie alle Kunststoffprodukte von Interesse sind.

Von den Bränden betroffen sind z.B. Wohn- und Geschäftshäuser, Fabrikations- und Lagerhallen, Waldgebiete, Torf- und Heideflächen. Im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich die Betrachtung jedoch allein auf den Brandablauf von Holzkrippen. In der Tabelle 1 wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Bränden aus Feststoffen verglichen [1]. Die Angaben sind als Richtwerte zu verstehen; sie zeigen auf, wo die hier untersuchten Krippen aus Kiefernstäben quadratischen Querschnitts einzuordnen sind.

Für die Verwendung von Holzkrippen zur Bestimmung des Brandablaufs von Feststoffbränden gibt es mehrere Gründe, die in [2] aufgeführt sind und an dieser Stelle noch einmal kurz dargestellt werden.

Die in der Praxis ablaufenden Brände lassen sich aus mehreren Erwägungen nicht zuletzt finanzieller Art nur in einem abstrakten Modell nachbilden, wobei hier insbesondere an die Nachbildung der Bedingungen der Geometrie des Brandobjektes sowie der Möglichkeit zur Verbrennungsluftzuführung gedacht ist. In zwei internationalen Forschungsvorhaben wurden bereits solche Versuche mit Holzkrippen durchgeführt, die in Modellräumen eingeschlossen brannten, Die Geometrie des Brandobjektes sowie die Brandlast und die Luftzufuhr konnten hier variiert werden. Da die Unterschiede innerhalb der Meßergebnisse einzelner Institute beträchtlich waren und diese

Unterschiede auf das Brandgut und nicht auf den Brandraum zurückgeführt wurden, ergab sich die Notwendigkeit, die Holzkrippen separat zu untersuchen, da Kenntnisse über den Abbrandverlauf einer einzelnen Holzkrippe weitgehend fehlten.

Eine weitere Verwendung der Holzkrippen ist die des Prüfstapels für Feuerlöschgeräteprüfungen nach DIN 14406. Die Beurteilung der Löschwirkung von Feuerlöschgeräten ist jedoch nur dann exakt, wenn sich die Unterschiede im Brandobjekt erfassen lassen und quantitativ in die Beurteilung des Gerätes eingehen, weshalb detailliertere Kenntnisse über den Abbrandmechanismus von solchen Stapeln wünschenswert sind.

Zur vollständigen Beschreibung des Brandablaufes von Feststoffbränden mittels physikalischer Gesetze ist es notwendig, die Strömungs-, Temperatur- und die Reaktionsverhältnisse solcher Holzkrippen genau zu kennen, um diese zur gemessenen Abbrandgeschwindigkeit der Krippe in Beziehung setzen zu können.

Damit sind die Ziele der Untersuchung an Holzkrippen die Anwendung der hierbei gewonnenen Erkenntnisse und Gleichungen zur Abschätzung des Brandrisikos von Materialanhäufungen beliebigen Materials und beliebiger Konfiguration sowie die ausreichende Kennzeichnung eines Prüfstapels für Feuerlöschgeräteprüfungen.

Dieser Forschungsbericht ist eine Fortsetzung des Forschungsauftrags Nr. 61 (4/72) der Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz [2]. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse von Abbrandmessungen mitgeteilt, die ergänzend zu den bereits in [2] dargestellten Messungen vorgenommen wurden. Außerdem wird über Messungen der Gaszusammensetzung über brennenden Holzkrippen sowie über meßbare Veränderungen des Einzelstabes im Verbund der Krippe berichtet.

2. GRUNDLAGEN UND LITERATUR

Die Untersuchungen über den Brandablauf von Feststoffbränden mit Holzstäben als Brandstoff laufen auf im Grunde genommen drei Teilgebieten ab. Diese sind die Studien zum Verhalten eines einzelnen Stabes, einer freibrennenden Krippe und einer oder mehrerer im Modellraum als Brandlast eingeschlossenen Krippen.

Ohne die Kenntnis des Verhaltens eines einzelnen Stabes unter Wärmeeinwirkung wird man nur zu unbefriedigenden Aussagen über das Verhalten dieses Stabes im Verband der Krippe kommen. Daher bilden die Untersuchungen zum Abbrandmechanismus des Einzelstabes eine unerläßliche Basis für die Behandlung der mit der Krippenverbrennung verbundenen Probleme. Aus der Kenntnis des Brandablaufes der Krippe schließlich erwartet man, in Verbindung mit Experimenten im Modellraum die noch offenen Fragen zum Brandablauf in geschlossenen Räumen beantworten zu können.

2.1. Einzelstab

Detailuntersuchungen über die Zündungs- und Abbrandmechanismen einzelner, meist runder oder quadratischer Stäbe aus Holz und auch aus reiner α -Zellulose, wurden in den vergangenen Jahren an verschiedenen Instituten durchgeführt und in einer Reihe von Veröffentlichungen behandelt.

Reine α -Zellulosestäbe sind dabei einfacher der theoretischen Untersuchung zugänglich als Holz, da α -Zellulose, durch die chemische Formel $(C_6H_{10}O_5)_n$ gekennzeichnet, ein reiner Stoff ist, wogegen Holz im wesentlichen die Bestandteile Zellulose (ca. 50 %), Lignin (ca. 25 %) und Hemicellulose (ca. 25 %) in inhomogener Zusammensetzung enthält und damit ein Stoffgemisch darstellt. Auch bei experimentellen Untersuchungen machen sich diese Unterschiede gerade bei Einzelstäben besonders bemerkbar, da naturgewachsenes Holz, bedingt durch seine Inhomogenitäten, bei Wiederholungsversuchen größere Streuungen der Stoff- und auch Meßwerte erwarten läßt als Zellulose. Die Untersuchung von Stäben aus

naturgewachsenem Holz ist jedoch für die Praxis interessanter.

Die Zersetzung der Holzsubstanz durch Wärmezufuhr von außen läuft in im wesentlichen drei Schritten ab; es sind dies die Holzzerersetzung in Holzkohle und ausgasende flüchtige Bestandteile, welche im zweiten Schritt beim Austritt aus der Holzoberfläche gezündet werden und außerhalb mit Umgebungsatmosphäre (Schritt 3) verbrennen. Bei den einzelnen Prozessen sind folgende Wärme- und Stofftransportvorgänge zu berücksichtigen: Wärmestrahlung, -Konvektion und -Leitung sowie Diffusion.

Die Geschwindigkeit der Holzzerersetzung wird von der von außen zugeführten Wärmemenge gesteuert, die an die Oberfläche durch Strahlung und/oder Konvektion übertragen wird und durch Wärmeleitung von der Oberfläche in den Feststoff eine Temperaturerhöhung im Holzinneren herbeiführt. Dabei werden die Holzbestandteile simultan unter Zurücklassung von Holzkohle und Asche gekrackt. Eine rechnerische Behandlung des Vorganges wird durch die Anisotropie (Inhomogenität) des Holzes erschwert, die starke Unterschiede in den Stoffwerten hervorruft. Als Beispiel sei hier die Wärmeleitfähigkeit genannt, die entlang der Holzfasern etwa zweimal so groß wie quer zur Faser ist; der Widerstand gegen Diffusion der Krackprodukte in die Umgebungsatmosphäre differiert sogar um vier Größenordnungen quer und parallel zur Faser. Die Zusammensetzung der Krackprodukte ist dabei von der aufgebrachten Wärmemenge pro Fläche und Zeiteinheit abhängig. Die Zeitdauer bis zur Zündung, der Zündzeitpunkt, fällt mit zunehmender Wärmezufuhr ab. Es treten bei der Zersetzung gasförmig neben niederen Kohlenwasserstoffen hauptsächlich Kohlenmonoxid und Kohlendioxid sowie bei Raumtemperatur kondensierende Bestandteile auf. Diese sind neben Wasserdampf als Hauptbestandteil in meßbaren Mengen noch Acetaldehyd, Acrolein, Furan, Aceton und Metanol (unter 0,5 Gewichtsprozent) [3]. Um bei der rechnerischen Behandlung die Vielzahl der möglichen Reaktionen einzuschränken, werden deshalb häufig wie oben bereits erwähnt Untersuchungen an isotroper α -Zellulose durchgeführt, dem Hauptbestandteil des Holzes.

Der Ablauf der Pyrolysezersetzung stellt sich folgendermaßen dar: Die der Wärmequelle ausgesetzten oberen Holzschichten werden im zeitlichen Ablauf zuerst zersetzt und eine Pyrolysefront, deren Lage durch einen starken Dichtegradienten im Holz gekennzeichnet ist, dringt ins Holz ein. Dabei bricht die Oberfläche auf und diese Aufbrüche erweitern sich zusammen mit dem Fortschritt der Pyrolysezone in die Tiefe des Holzes unter gleichzeitiger Vergrößerung der äußeren Oberfläche des Stabes. Dieser Vorgang läuft bei Temperaturen um 300 bis 320 ° C ab.

Damit tritt während der Zersetzung bereits eine Geschwindigkeitsänderung schon dadurch auf, daß die von der Wärmequelle übertragene Wärme auf eine vielfach zerklüftete Zone trifft und damit die Wärmeübertragung an das Holz durch Strahlung oder heiße konvektive Gasströme schneller vonstatten geht, was eine raschere Temperaturerhöhung im Holz und daher eine schnellere Eindringgeschwindigkeit der Pyrolysefront zur Folge hat.

Die aus der Holzoberfläche austretenden Gase vermischen sich mit Umgebungsluft durch Diffusion. Die Zündung dieses brennbaren Gas-Luftgemisches erfolgt bei Temperaturen von 340 bis 540 ° C. Die Dichteunterschiede zwischen heißen Flammgasen und Umgebungsluft verursachen eine Auftriebsströmung um die Holzstäbe. Durch die Strömungsgrenzschicht an der Holzoberfläche wird Wärme aus der Flamme an das Holz übertragen. Sobald die Flamme mehr Wärme an das Holz abgeben kann, als zur Erhaltung der Verbrennungsreaktionen notwendig ist, geht mehr aus und die Verbrennung erhält sich selbst, sofern die Wärmeverluste durch Wärmeleitung ins Holzinnere einerseits und in die Umgebung andererseits nicht zu groß werden.

2.2 Die frei brennende Krippe

Der Mechanismus der Krippenverbrennung ist eine stete Abfolge des am Einzelstab ablaufenden Prozesses der Pyrolyse, Zündung der Pyrolysegase und Verbrennung, wobei die Pyrolyse-, Zünd-

und Verbrennungsfronten sich entsprechend der Konfiguration der Holzkrippen über die freien Kanäle ausbreiten.

Während nun beim Einzelstab der Zündungs- und Verbrennungsablauf von den Stoffwerten, der Größe des Stabes, der Atmosphäre und der Form der Zündenergie, der Übertragung - durch reine Wärmestrahlung oder durch heiße konvektive Rauchgase - und deren Größe bestimmt wird, treten die Veränderungen in der Krippe sowohl aufgrund dieser Größen, als auch aufgrund der Variation geometrischer Größen, wie gesamte Krippenabmessungen und Größe der Kanäle auf. Von weiterem Einfluß auf den Abbrandverlauf ist die Lage und Größe der Zündquellen, die die Verbrennungsrichtung - vertikal oder schräg seitlich, mit tonnenförmiger Ausbreitung - beeinflussen.

Die aus der Literatur bekannten Abhängigkeiten der Abbrandgeschwindigkeit einer Holzkrippe von geometrischen und Stoffgrößen seien im folgenden kurz qualitativ dargestellt.

Die Krippenporosität beeinflusst die Abbrandgeschwindigkeit einer Krippe, da die Größe der Öffnungen relativ zur Brennstoffoberfläche die Verbrennungsluftzufuhr ins Innere der Krippe über die Strömungswiderstände steuert und damit den Grad der Mischung von Zersetzungsgasen mit Luft bestimmt. Neben der Beeinflussung der Strömung ist das Öffnungsverhältnis für die Wärmeverluste aus der Krippe verantwortlich. Beide Einflüsse sind jedoch von entgegengesetzter Wirkung, denn kleine Porosität bedeutet zwar geringere Wärmeverluste aber auch eine schlechtere Verbrennungsluftzufuhr, während große Porositätswerte zwar größere Wärmeverluste, aber eine bessere Verbrennungsluftzufuhr bedeuten. In der Arbeit von Gross [4] wurde diese Wechselbeziehung nun so dargestellt, daß die Verbrennung sich in drei Bereiche aufteilen läßt. Im ersten Bereich wird die Verbrennung im wesentlichen von den Strömungswiderständen bestimmt. Hier ist die mit der Stabdicke normierte Abbrandgeschwindigkeit einem von Gross mit der Höhe, der Stabdicke und dem Flächenverhältnis gebildeten Porositätsfaktor proportional. Im zweiten Bereich ist die mit

der Stabdicke normierte Abbrandgeschwindigkeit von der Porosität unabhängig, da freie Verbrennung in einer "lockeren Packung" vorliegt, und im dritten Bereich schließlich wird keine Verbrennung aufrecht erhalten, da die Wärmeverluste zu groß sind. Die oben genannten Untersuchungen wurden an Krippen quadratischer Grundfläche durchgeführt. Die Abbrandgeschwindigkeit wurde dabei für den Fall untersucht, daß bereits 50 % der Krippensubstanz verbrannt ist, da hier über einen größeren Abbrandbereich ein stationärer Zustand nahezu konstanter Abbrandgeschwindigkeit (=Massenverlust/Zeit) herrscht.

Von Fons et al. [5] wurde mit der Zielsetzung, ein Modell für Waldbrände zu schaffen, ein Krippentypus verwendet, der durch eine endliche Weiten- und eine "unendliche" Tiefenausdehnung gekennzeichnet ist. Dieser Krippentypus wird an der Vorderseite entzündet und die nach einem Anlaufvorgang anschließend sich entwickelnde mit konstanter Geschwindigkeit fortschreitende Verbrennungsfront untersucht. In einer Versuchsserie wurde die Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Flammenfront von der Holzfeuchte sowie der Holzdichte untersucht. Die Ergebnisse zeigen, daß für Holzdichten kleiner als $0,45 \text{ g/cm}^3$ und für Feuchtigkeitsgehalte des Holzes kleiner als 10 % ein starker Anstieg der Abbrandgeschwindigkeit zu verzeichnen ist.

Eine sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchung der Abhängigkeit des Abbrandes von Stoff- und Geometriegrößen wurde von Block [6] durchgeführt, der im theoretischen Teil seiner Arbeit ein physikalisches Modell für den Bereich des stationären Abbrandes einer nach Gross'scher Definition "dichten Krippe" erstellte. Dieses Modell geht von dem Ablauf einer Verbrennung in einem vertikalen Kanal mit poröser, rauher Oberfläche aus, durch die brennbares Gas in den Kanal diffundiert und sich mit vertikal strömender, am Boden eintretender Luft vermischt und verbrennt. Mit den Gleichungen der Impulserhaltung, der Massenerhaltung und der Energieerhaltung und ergänzenden Annahmen über die Strömungsbedingungen erhält Block dann eine Gleichung für die Abbrandgeschwindigkeit im Einzelkanal. Diese Gleichung wird den Verhältnissen in der Krippe angepaßt, wo die Abbrandgeschwindigkeit von der Krippenporosität, der Gastemperatur und dem Verbrennungs-

Luftbedarf bestimmt wird. Der Verbrennungsluftbedarf wird dabei in Abhängigkeit von den Stoffwerten (hier: dem Heizwert) ermittelt.

Die bisherigen Untersuchungen an frei brennenden Holzkrippen beschränkten sich im wesentlichen auf den stationären Zustand mit nahezu konstantem zeitlichem Massenverlust, wobei die Abbrandgeschwindigkeit und damit die Energiefreisetzung einer Krippe in Abhängigkeit von der Geometrie und der Holzbeschaffenheit bestimmt wurde. Eine vollständige Behandlung des Anlaufvorgangs ist bisher noch nicht erfolgt.

Um dagegen die im Inneren von Krippen ablaufende Brandausbreitung genauer kennenzulernen, sind Messungen der Temperaturentwicklung und Entwicklung der Gaszusammensetzung während des Zündvorganges und des darauffolgenden Fortschreitens einer Verbrennungsfrent notwendig. Solche Untersuchungen wurden, wie oben dargestellt, zwar schon an Einzelstäben, noch nicht aber an Krippen vorgenommen.

3. VERSUCHSPROGRAMM

Es wurden Holzkrippen untersucht, die aus Holzstäben mit den Abmessungen 2 x 2 x 10 cm bzw. 2 x 2 x 42 cm zusammengesetzt waren. Die Dichte der aus einer Lieferung stammenden astfreien Kiefernstäbe betrug bei 12 % Holzfeuchtigkeit im Mittel $0,59 \text{ g/cm}^3$. Aus den kurzen Stäben wurden Krippen mit einer Höhe von 6 Lagen und einem Abstand von Holzstab zu Holzstab von einer Stabdicke und aus den längeren Stäben wurden Krippen mit Stababständen von dem 1/3-, 2/3-, 1,0-, 1,5-, 2-, 2,5- und dem dreifachen der Stabdicke und mit verschiedenen Höhen, meist jedoch 16 cm entsprechend 8 Lagen angefertigt. Die Stäbe wurden übereinander durch Buchendübel mit einem Durchmesser von 6 mm oder durch Kleben an den äußersten Kreuzungspunkten fixiert.

Die Krippen mit den Stababständen von dem 1/3-, dem 1-, dem 2- und dem 3-fachen der Stabdicke und 8 Lagen Höhe wurden bereits im vorangegangenen Forschungsbericht [2] untersucht, während für eine engere Abstufung die Stababstände von dem 2/3-, dem 1,5- und dem 2,5-fachen der Stabdicke hier noch zusätzlich verwendet wurden.

Es wurden an den Krippen Größen wie die Gewichtsabnahme des Einzelstabes im Verband der Gesamtkrippe, verbrennende Oberflächenanteile sowie die Zusammensetzung der Brandgase bestimmt.

Die Versuche wurden in einer der Forschungsstelle für Brandschutztechnik zur Verfügung stehenden Versuchshalle durchgeführt. Hierdurch konnte der Einfluß von Luftbewegungen ausgeschlossen werden. Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung des Versuchsstandes konnten nicht variiert werden und waren, da die Halle im Winter auch nicht beheizbar ist, von der jeweils herrschenden Wetterlage abhängig. Damit war eine systematische Untersuchung des Einflusses dieser Größen auf das Abbrandverhalten nicht möglich.

Die Kiefernstäbe wurden in einer Klimazelle mit 23° C und 50 % relativer Luftfeuchte (Normalklima nach DIN 50014) klimatisiert, wobei sich im Holz eine relative auf das Darrgewicht bezogene Holzfeuchte von 9 bis 10 % einstellte, die beim überwiegenden Teil der Versuche auch beibehalten wurde. Die Krippen wurden einheitlich mit 5 cm³ Brennspritus, der in einer Zündwanne mit den Abmessungen 5 x 5 x 1 cm eingefüllt wurde, gezündet. Dabei wurde die kleine Krippe (2 x 2 x 10 cm Stäbe, 6 Lagen hoch) unter dem Schnittpunkt der Grundflächendiagonalen gezündet, während die größeren Krippen (2 x 2 x 42 cm Stäbe, wechselnde Stababstände und Höhen) mit wenigen Ausnahmen an einer Ecke entzündet wurden. Bei einigen dieser Krippen wurde die Gesamtstrahlung während des Versuchs gemessen.

4. VERSUCHSAUFBAU UND MESSVERFAHREN

4.1 Brandraum

Der Brandraum befand sich im Erdgeschoß der Versuchshalle. Der Versuchsstand war direkt unter einer der in der Decke zum ersten Obergeschoß vorhandenen Öffnungen mit einem Durchmesser von 2,15 m aufgebaut, damit die Rauchgase in einen größeren Raum abziehen konnten. Die vom Rand der Krippe durch den Auftrieb angesaugte Verbrennungsluft konnte frei zufließen, da der Versuchsstand vom übrigen Erdgeschoß nicht abgetrennt war.

4.2 Bestimmung des Abbrands

Die Abbrandmessung wurde bei den großen Krippen in der gleichen Weise wie bereits in [2] beschrieben, vorgenommen. Die jeweils zu untersuchende Holzkrippe befindet sich dabei auf einer waagrechten Platte, die auf ein aus drei Doppel-T-Trägern gebildetes gleichschenkliges Dreieck aufgelegt ist. Die Ecken des Dreiecks stützen sich gegen drei Kraftaufnehmer ab, deren Dehnungsmeßstreifen mit einem Abgleichwiderstand in eine Wheatstone'sche Brücke geschaltet sind. Die Brückenspeisung wird durch ein Gleichspannungsspeisegerät geliefert. Vor jedem Versuch wird die Brücke mit dem Abgleichwiderstand tariert. Die durch den Abbrand der Krippe hervorgerufene Verstimmung der Meßbrücke wird als Diagonalspannung abgenommen, in einem Gleichspannungsverstärker verstärkt und auf einem Linienschreiber aufgezeichnet. Das Signal gibt somit die Gewichtsabnahme über der Zeit wieder, aus der sich die gewünschten Abbrandkennwerte berechnen lassen.

Da die kleineren Krippen nicht mehr als 400 g wogen, wurde ihr Abbrand abweichend davon auf einer kleinen elektronischen Präzisionswaage mit direkter Anzeige der Gewichtsabnahme in Gramm gemessen.

4.3. Wärmestrahlung der Krippen

Bei einigen der aus den längeren Stäben gebildeten Krippen wurde die Gesamtstrahlung mit einem Gesamtstrahlungs-pyrometer gemessen, das in 1,5 m Abstand von der Krippe an einem Stativ befestigt wurde und die einfallende Gesamtstrahlung der Krippe während des Brandes in der Höhe der beiden oberen Stablagen registrierte. Das hier verwendete Pyrometer mißt die in einem Winkel von $2,87^\circ$ auftreffende Strahlung mit einem Thermoelementempfänger.

4.4. Gaszusammensetzung

Die Probenahme für die Konzentrationsmessung wurde kontinuierlich mit einer wassergekühlten Absaugsonde mit 12 mm ϕ durchgeführt, da das abgesaugte Rauchgas in dem örtlichen Zustand analysiert werden soll, in dem es abgesaugt wird. Durch die schlagartige Abkühlung beim Eintritt in die Sonde erreicht man eine sofortige Unterbindung jeglicher weiterer Reaktion der an dieser Stelle etwa noch vorhandenen brennbaren Gase mit Luft. Das zur Kühlung verwendete Wasser wird allerdings in Thermostaten auf 70° C erwärmt, um Wasserdampfkondensationen im Rohr zu vermeiden. Im Anschluß an diese Absaugsonde wird das Gas einer Meßsonde zur Bestimmung des Wasserdampftaupunktes, mit dem man die Konzentration berechnet, zugeführt. Das Gas durchströmt weiter einen Flüssigkeitsabscheider und mehrere Filter, um den Gasanalysatoren zur Bestimmung von CO_2 , CO und O_2 trockenes, sauberes Rauchgas zuführen zu können. Der dafür verwendete Absaugvolumenstrom beträgt 25 bis 30 l/h und wird am zuerst durchströmten Gasanalysator mittels eines Schwebekörperdurchflußmessers eingestellt.

Da bisher noch keine Messungen der Geschwindigkeit in den Kanälen vorliegen, wurde nach [8] eine überschlägliche Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Danach liegt der Wert für die Strömungsgeschwindigkeit zwischen 30cm/s und 90 cm/s für die hier untersuchten Krippen, der Mittelwert beträgt 58 cm/s. Die aus dem Quotienten des für die Analysegeräte notwendigen Gasvolumenstroms mit der Querschnittsoberfläche der Absaugsonde gebildete Absaugegeschwindigkeit ist für 25 l/h Volumenstrom gleich dem Wert 60 cm/s und entspricht damit etwa dem nach [8] berechneten Mittelwert.

Die Geräte zur Messung der CO- und CO₂- Konzentrationen waren Infrarotgasanalysatoren (URAS). Die O₂-Konzentrationen wurden mit einem Analysegerät bestimmt, dessen Arbeitsweise auf dem temperaturabhängigen Paramagnetismus der Sauerstoffs beruht. Die von den Analysegeräten abgegebenen Spannungen wurden mit einem Kompensations-12-Punkt drucker aufgezeichnet und die zugehörigen Konzentrationswerte aus Eichkurven abgelesen.

Die Messung der Wasserdampfkonzentration mit dem an der Forschungsstelle bewährten Gerät lieferte durchweg wesentlich zu hohe Werte, weil die zusätzlich zum Wasserdampf auftretenden kondensierbaren Bestandteile den Taupunkt des reinen Wasserdampfanteils verändern. Daher wird im Abschnitt 6.3. auf die Darstellung der H₂O-Konzentrationen verzichtet.

5. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Es wurden mehrere Versuchsreihen mit verschiedenen Zielsetzungen durchgeführt, die damit auch ein unterschiedliches Vorgehen erforderten.

Die aus den kurzen, 10 cm langen Stäben aufgesetzten Krippen wurden, wie bereits in 4.2. erwähnt, auf einer kleinen elektronischen Waage verbrannt. Die Verbrennung wurde durch Löschen mit minimalen Wassermengen unterbunden, sobald 50 % des Gewichtsverlustes eingetreten war. Danach wurden nach Abkühlung und Klimatisierung der Krippen in einem Klimaschrank die Restgewichte, die Restvolumina und die am Brand beteiligten Oberflächen der Stäbe vermessen, um Aussagen über den Brandverlauf und seine örtliche Ausdehnung in der Krippe zu erhalten und damit einen Vergleich zur "frischen" Krippe herstellen zu können.

Es wurden weiterhin Versuche zur Ergänzung der in [2] aufgeführten Abbrandkennwerte für den Fall sehr geringer Luftzufuhr durchgeführt, um den Minimalwert der Abbrandgeschwindigkeit für sehr große Werte des Oberfläche/Kanalquerschnittsverhältnisses zu finden.

Schließlich wurden Versuche zur Bestimmung der Gaszusammensetzung der aus der Krippe austretenden Gase in verschiedenen Höhen über der Krippe mit der in 4.4. beschriebenen Vorrichtung durchgeführt.

6. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION

6.1. Massenverlust und Abbrandgeschwindigkeit

6.1.1. Dicht gepackte Krippen

Mit der Abbrandwaage wird der Verlauf des zeitlichen Massenverlustes gemessen. Die durch den Massenverlust der Krippen pro Zeiteinheit definierte Abbrandgeschwindigkeit wird auf ein Oberflächenelement bezogen, da erst die Kenntnis der Größe des Stoffumsatzes pro Oberfläche der Krippe einen Vergleich zwischen einzelnen Krippen zuläßt.

Als Bezugsfläche wird die "freie" Oberfläche der Stäbe herangezogen, die nach [2] für die ungezündete Krippe berechnet wird zu:

$$A_s = 2 nb [N (2 L + b) - bn (N - 1)] - nbL \quad (1)$$

Der so berechnete Wert A_s berücksichtigt auch die aus versuchstechnischen Gründen (einheitliche Stablänge) bei manchen Kanalabmessungen überkragenden Stabteile, d.h. die Flächen der Stabenden, die die am Umfang der Krippe gelegenen einseitig offenen Kanäle umfassen.

Damit wird die Abbrandgeschwindigkeit nun normiert und man erhält die Massenstromdichte der Pyrolysegase, die bei der Verbrennung von Holz aus der Holzoberfläche austreten und anschließend mit Umgebungsluft verbrennen zu:

$$\dot{m}'' = \frac{R' \cdot M_o}{A_s} \quad (2)$$

Dabei ist R' die Massenverlustgeschwindigkeit in % der Anfangsmasse und M_0 die Anfangsmasse, A_s aus Gleichung (1).

Strömungen heißer Gase um freie Oberflächen bei kalter Umgebung, wie sie bei der Verbrennung von Holzkrippen auftreten, werden infolge des großen Dichteunterschieds zwischen heißen Gasen und kalter Umgebungsluft hauptsächlich von den Auftriebskräften bestimmt. Da die Strömungen mechanisch ähnlich sind, d.h. ein geometrisch ähnliches Stromlinienbild aufweisen, können meßbare Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit von einer Krippe zu einer anderen, in den Abmessungen veränderten Krippe, durch Angabe des Wertes der Froude'schen Kennzahl charakterisiert werden. Die Froudezahl gibt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Auftriebskräften an. Sie lautet:

$$Fr = \frac{v^2}{(\Delta \rho / \rho) g h_c} \quad (3)$$

oder unter Verwendung der Beziehung

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{V}_{Gas}}{\rho_{Gas} \cdot A_s} = \frac{v}{\rho} \quad (4)$$

wird

$$\sqrt{Fr} = \frac{\dot{m}''}{\rho \cdot \Delta \rho \cdot g \cdot h_c} \quad (3a)$$

Die theoretische Untersuchung von Block [6] führt zu einer Darstellung der Abbrandgeschwindigkeit dicht gepackter Krippen in folgender Form:

$$\frac{\dot{m}''}{\rho \Delta \rho g h_c} = \frac{f}{2} \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda} \right) \left(\frac{G}{X} \right) \quad (5)$$

mit f als Reibungsfaktor, λ als dem Verhältnis von vermischem Luft- und Gasstrom, χ als einem Porositätsfaktor und G als einer von χ abhängigen dimensionslosen Kenngröße. Nach einem Vorschlag von Thomas [9] wird die Brennstoffoberfläche A_S (nach Gl. (1)) durch die Brennstoffoberfläche

$$a_S = 4 sh_c \quad (6)$$

eines einzelnen Kanals ersetzt sowie der Quotient aus a_v und a_S mit

$$a_v = s^2, \quad (6a)$$

der Querschnittsfläche eines Kanals gebildet.

Gl.(5) läßt sich nun nach [9] in anderer Form darstellen als

$$\frac{\dot{m}''}{\rho_o \sqrt{gh_c}} = F \left(\frac{a_v}{a_S} \right) \quad (7)$$

Der Verlauf der Größe $\dot{m}'' / \rho_o \sqrt{gh_c}$ kann in Abhängigkeit von a_v/a_S aus Abbrandmessungen, die in Tabelle 2 aufgeführt sind, bestimmt werden. Für Krippen mit quadratischer Grundfläche und Zündung an einer Ecke führt die Auswertung der Abbrandmessungen, die in [2] referiert sind und auch im experimentellen Teil dieser Arbeit durchgeführt wurden, zu folgender empirischer Gleichung:

$$\frac{\dot{m}'' (50)}{\rho_o \sqrt{gh_c}} = 1,35 \cdot 10^{-2} \left(\frac{a_v}{a_S} \right)_o^{0,61} \quad (8)$$

\dot{m}'' (50) ist dabei die Massenstromdichte der Pyrolysegase beim Austritt aus der Holzoberfläche, wenn bereits 50 % der Grundsubstanz verbrannt sind und ein stationärer Abbrand vorliegt. Der in Gl. (2) eingesetzte Wert für A_s ist dabei ebenso wie die Größe $(a_v/a_s)_0$ mit den Stab- und Kanalabmessungen der ungezündeten Krippe gebildet.

Thomas [9] fand für quadratische, in der Mitte gezündete Krippen folgende Form der Gleichung:

$$\frac{\dot{m}'' (50)}{\rho_0 \sqrt{gh_0}} = 2 \cdot 10^{-2} \left(\frac{a_v}{a_s} \right)_0^{0,6} \quad (9)$$

Die Unterschiede zwischen den Faktoren 1,35 und 2 in den Gleichungen (8) und (9) werden von den verschiedenen Zündorten verursacht, während der Exponent sich kaum unterscheidet.

6.1.2. Verhalten des Einzelstabes in der Krippe

Der Fortschritt der Flammenfront in der Krippe bedingt eine zeitliche Verzögerung der Entflammung der zündquellenferneren Stäbe und ist von der Geometrie der Krippen einerseits (kleine oder große Kanäle, hohe oder niedere Krippen, Stablänge) und natürlich auch von den Stoffparametern und der Verbrennungslufttemperatur und -feuchte abhängig. Nun ist allerdings nur am Beginn der Verbrennung die der Verbrennungsreaktion zur Verfügung stehende gesamte Oberfläche an brennbarem Material bekannt. Sie nimmt während des Brandgeschehens ab. Daß die Oberfläche der Stäbe nicht gleichmäßig abnimmt, geht aus der Form der Flammenausbreitung hervor, die durch Ort und Lage der Zündquelle und die Krippengeometrie bestimmt wird.

Der zeitliche Massenverlust der einzelnen Stäbe einer Krippe wurde mit der in 4.2. erwähnten elektronischen Präzisionswaage, die Oberflächenabnahme durch Planimetrie und der Volumenverlust mit einer Volumenverdrängungsmethode bestimmt. Die erhaltenen Werte sind alle auf ein Abbrandstadium bezogen, das durch 50 % Gewichtsverlust der kleineren Krippen (2 x 2 x 10 cm Stäbe, einfacher Stababstand, 6 Lagen hoch) gekennzeichnet ist.

Im Bild 1 ist die Restmasse des Einzelstabes für alle 18 Stäbe aus drei Versuchen aufgetragen. Die jeweils mittleren Stäbe weisen dabei deutlich geringere Massen auf als jene, die am Rand lagen, da die Wärmeverluste durch Abstrahlung ins Freie bei den inneren Stäben naturgemäß geringer sind. Ebenso nehmen die Restgewichte nach oben hin zu, was auf die langsame, schrittweise Ausbreitung der Verbrennungsfrent zurückzuführen ist.

Im Bild 2 ist die Beziehung zwischen dem spezifischen Restvolumen V/V_0 und der spezifischen Restmasse M/M_0 des Einzelstabes aufgetragen und dazu im Bild 3 der Zusammenhang zwischen der spezifischen Restoberfläche A_s/A_{s0} und der spezifischen Restmasse M/M_0 .

Beide Bilder zeigen den zeitlichen Ablauf der Volumen- und der Flächenänderung. Zu Beginn der Verbrennung diffundieren die flüchtigen Bestandteile aus der Staboberfläche heraus, ohne dabei eine stärkere Volumen- oder Massenänderung des Stabes zu verursachen. Aus der weitgehenden Erhaltung der äußeren Form des verkohlenden Holzfasergerüsts resultiert eine geringe Volumenabnahme, sodaß bei einem Massenverlust von 50 % das Volumen immer noch 80 % des Anfangswertes einnimmt.

Ähnlich verhält es sich mit der Oberfläche, die bei 50 % Massenverlust ebenfalls erst auf 80 % des Anfangwertes abgenommen hat, sodaß man für die Abbrandgeschwindigkeit im vollentwickelten Stadium mit einer um 20 % verringerten Oberfläche und damit auch mit einem größeren Kanaldurchmesser als bei der frischen Krippe rechnen muß. Diese mittlere Vergrößerung des Kanaldurchmessers und die daraus resultierende Änderung von a_s/a_v können leicht aufgrund folgender Überlegung bestimmt werden.

Die Porosität der Krippe vor dem Brand ist gegeben durch:

$$\varphi = \frac{L^2 h_c - n L b^2}{L^2 h_c} \quad (10)$$

Mit der Vernachlässigung der Längenänderung eines Stabes ($\Delta L < 2\%$) infolge der Verbrennung, d.h. mit

$$\frac{L}{L_0} = \frac{L_0 - \Delta L}{L_0} = 1 \text{ erhält man für die Änderung der}$$

Stabdicke, da

$$b = \sqrt{V/L} \quad \text{volumenabhängig ist,}$$

$$\frac{b}{b_0} = \sqrt{\frac{V}{V_0}} \quad (11)$$

$$\text{Mit } \frac{L_0}{L} = \frac{n \cdot b_0 + (n-1) s_0}{n \cdot b + (n-1) s} = 1 \text{ ergibt sich für}$$

die Vergrößerung des waagerechten Stababstandes

$$s = s_0 + \frac{n}{n-1} b \left(1 - \sqrt{\frac{V}{V_0}} \right) \quad (12)$$

und für die Änderung des Verhältnisses von Kanaloberfläche zu Kanalquerschnittsfläche

$$\frac{a_s}{a_v} = \frac{4 h_c}{s} = \frac{4 \cdot N \cdot \sqrt{\frac{V}{V_0}} b_0}{s_0 + \frac{n}{n-1} b_0 \left(1 - \sqrt{\frac{V}{V_0}}\right)} \quad (13)$$

Durch Division der beiden Seiten der Gleichung (13) durch N, die Anzahl der Lagen einer Krippe, wird

$$\frac{a_s}{N a_v} = \frac{4 b}{s}$$

und ist damit von der Krippenhöhe unabhängig.

Im Bild 4 wurde die Größe $\frac{a_s}{N a_v}$ mit den Stababständen als

Parameter über der Restmasse R dargestellt. In diesem Bild sieht man, daß die tatsächliche Änderung der Größe a_s/a_v mit fortschreitendem Abbrandstadium besonders für dichte Krippen nicht vernachlässigt werden darf, da z. B. im Falle des vollentwickelten Brandes (R = 50 %) das Flächenverhältnis a_s/a_v bei einem Stababstand/Stabdurchmesser von 1/3 auf 67 % des ursprünglichen Wertes a_{s0}/a_{v0} abfällt und damit der Verbrennungsluftzufuhr größere Öffnungen zur Verfügung stehen. Durch die Verbrennung des Feststoffes verringert sich die Oberfläche A_s ebenfalls, wie im Bild 3 zu sehen war. Das bedeutet aber, daß der Wert von \dot{m} nach Gl. (1) größer werden muß, da hier A_s im Nenner steht.

Im Bild 5 sind die Meßwerte aus Tabelle 2 und die Werte unter Berücksichtigung der Flächenänderung während der Verbrennung dargestellt und diesen Werten ist der Kurvenverlauf

nach Gleichung (8) gegenübergestellt. Die Werte in Tabelle 2 sind alle auf den Zustand der frischen Krippe bezogen, d.h., es werden zur Bestimmung von A_s , a_s und a_v die Abmessungen der frischen Krippe zugrundegelegt. Die anderen Punkte erhält man, indem man die Änderung von A_s , a_s und a_v infolge der Verbrennung berücksichtigt. Dadurch wird zwar die Größe a_s/a_v bei gleichem Krippentypus kleiner, gleichzeitig aber lt. obiger Überlegung \hat{m} größer.

Diese beiden Effekte gleichen sich praktisch wieder aus, sodaß der Kurvenverlauf nach Gleichung (8) für beide Fälle eine gute Näherung darstellt. Das bedeutet aber auch, daß man ohne große Fehler die Flächen A_{s0} , a_{s0} und a_{v0} verwenden kann, die mit den Stab- und Kanalabmessungen der frischen Krippe berechnet werden. Die von Block [6] abgegebene Rechnung verwendet ebenfalls die Größen, wie sie für die frische Krippe gelten.

Auch wenn im Ergebnis nahezu dasselbe erscheint, sollte man jedoch bei der Aufstellung von Gleichungen, die den Ablauf der Entzündung und Verbrennung beschreiben können, von den wahren geometrischen Zuständen ausgehen, da dort möglicherweise keine Kompensation der Effekte wie oben auftritt.

6.2. Wärmeabstrahlung und Temperaturen

Der Verlauf der Gesamtwärmestrahlung einer Krippe wurde in Abhängigkeit von der Abbrandgeschwindigkeit bereits von Gross [4] dargestellt; dabei wurde die gesamte sowohl von der Krippe als auch von der auf der Krippe aufsitzenden Flamme ausgehende Wärmestrahlung gemessen. Gross fand folgenden Zusammenhang:

$$\dot{q}_{\text{str.}} = 12,7 r \quad (14)$$

Die Strahlungswärme $\dot{q}_{\text{str.}}$ ist dabei in Watt/Raumwinkel und die Abbrandgeschwindigkeit r in g/sec angegeben.

Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde im Gegensatz dazu die nur von der Krippe ausgesandte Strahlung gemessen, wie in 4.3. beschrieben. Es wurde dabei der Öffnung des Meßgerätes entsprechend die von einer Krippenfläche von 34 cm^2 ausgehende Strahlung erfaßt. Vernachlässigt man die von den in den Kanälen brennenden Flammen ausgehende Strahlung wegen ihres geringeren Emissionsverhältnisses gegenüber der Strahlung der Holzoberfläche mit einem Emissionsverhältnis von 0,92 dann entspricht die gemessene Strahlung der Holzoberflächentemperatur.

Den zeitlichen Verlauf der während des Abbrandes einer Krippe aus der gemessenen Strahlung berechneten Holzoberflächentemperatur zeigt Bild 6.

Die Schwankungen im Kurvenverlauf rühren daher, daß die bereits verkohlten Holzteile noch eine ausreichend große Reststabilität besitzen und stehenbleiben. Dabei kann bei dem verwendeten Meßverfahren nicht immer die Temperatur der Verbrennungsfrent gemessen werden, da diese erst dann registriert wird, wenn die vorgelagerten Reste zusammengefallen sind.

In Bild 7 ist die Abhängigkeit der maximalen Strahlungsintensität der brennenden Krippe über dem kennzeichnenden Stababstand für Krippen aufgetragen, deren Stäbe eine Kantenlänge von 2 cm aufweisen. Die dazugehörigen Temperaturen liegen zwischen 815 und 865° C .

Wie Bild 8 zeigt, das auf Meßwerten aus [2] beruht, liegen die Temperaturen der Flamme in den Kanälen um ca. 100° C über der Temperatur der Holzoberfläche.

6.3. Gaskonzentrationen über der Krippe

Die Gaskonzentrationen wurden kontinuierlich mit dem in 4.4. beschriebenen Aufbau gemessen. Die Meßorte lagen in den drei Ebenen auf einer Diagonalen der Krippe und zwar so, daß die Diagonale durch die 5 Meßpunkte in 4 gleichgroße Abschnitte unterteilt wurde. 2 Meßpunkte lagen also jeweils an den Ecken,

zwei auf einem Viertel dieser Diagonalen und einer in der Mitte jeweils direkt über einem Kanalaustritt. Die drei Meßebenen befanden sich in Krippenhöhe und in einfacher sowie doppelter Krippenhöhe darüber.

In Bild 9 wird der zeitliche Konzentrationsverlauf für die Gase CO_2 , CO und O_2 dargestellt, die während der Verbrennung einer $2/ 1/ 21/ 8$ - Krippe in die in der Diagonalmitte direkt über dem Kanalaustritt liegenden Sondenöffnung gesaugt wurden. Die Sonde ist dabei auf einen Meßort fixiert und die Verbrennung läuft unter ihr durch.

Während des Fortschreitens der Verbrennungsfront durch die Krippe wird ein Kanal vom Feuer erfaßt. Dieser Vorgang läuft in ziemlich kurzer Zeit, d.h. in ca. 2 min ab [2]. Dabei sinkt die Sauerstoffkonzentration auf 0 Vol.%, die CO_2 - und CO -Konzentrationen erreichen einen Maximalwert, der praktisch solange anhält, bis die zeitlich zuerst vom Brand erfaßte Kanalseite durch die weitgehende Verbrennung der Holzsubstanz keine Verbrennungsgase mehr nachliefern kann und wieder Frischluft Zutritt. Gegenläufig zum Frischluftzutritt nimmt nun wieder die CO - und die CO_2 -Konzentration ab.

Am Beispiel der Krippe $2/ \frac{2}{3}/ 21/ 8$ wird in Bild 10 gezeigt, welche Veränderungen die Konzentrationen O_2 , CO_2 und CO über der Krippe erfahren. Aufgetragen wurden hier die jeweils maximalen Werte beim Durchgang der Flammenfront. Diese Werte sind Mittelwerte aus den Messungen in Diagonalrichtung. In den beiden Ecken konnte in doppelter Höhe über der Krippe kein Abgas mehr gemessen werden, weil in der zeitlich zuletzt erreichten Ecke die Flammen sich dem Luftstrom zu-neigen, der über der heißen Glut aufsteigt und weil an der Zündecke die Flammenhöhe nicht ausreichend ist.

Die an den Rändern gemessenen Konzentrationen sind daher generell nur mit Einschränkungen verwertbar.

In den Bildern 11 und 12 wird schließlich der Konzentrationsverlauf für verschiedene Kanagrößen angegeben und zwar im

Bild 12 für die Meßorte in doppelter Krippenhöhe.

Direkt über der Krippe ist bei den hier gemessenen Kanalgrößen der Sauerstoffgehalt 0 Vol.%, d.h. sämtliche seitlich in die Krippe einströmende, durch den Flammenauftrieb angesaugte Luft wird für die Verbrennung benötigt. Die Verbrennung ist jedoch unvollständig, wie der hohe CO-Gehalt der Abgase von 12 - 16 Vol% zeigt.

In doppelter Krippenhöhe haben sich die Verhältnisse wesentlich verändert. Hier wird genügend Luft von der Seite zugemischt, so daß der CO-Gehalt merklich sinkt.

Die Erklärung der Verläufe im Bild 12 kann durch die Dicke der Flammenzone geliefert werden. Die Flammenzone nimmt nämlich mit zunehmendem Kanaldurchmesser an Dicke zu, wodurch die Diffusion von Luftsauerstoff in die Mittelzone dieser Flamme gegenüber der dünneren Flamme bei kleinen Kanalquerschnitten erschwert wird. Damit resultieren hier höhere CO- und CO₂-Maxima als bei den kleinen Kanalquerschnitten.

7. ZUSAMMENFASSUNG

An Holzkrippen aus quadratischen Kiefernstäben wurden Messungen der Abbrandgeschwindigkeit, der Wärmestrahlung und der Gaszusammensetzung des Abgases über der Krippe durchgeführt. Anhand der Ergebnisse wurde der Verbrennungsablauf in der Krippe, insbesondere die Ausbreitung der Verbrennungszone und die Massen-, Volumen- und Oberflächenabnahme erörtert. Die hier erhaltenen Werte dienen als Grundlage für ein Rechenmodell, mit dem die Zündung und die Verbrennung von Holzkrippen beschrieben werden kann.

8. FORMELZEICHEN

a_v	Querschnittsfläche eines einzelnen Kanals ($= s^2$)
a_s	Oberfläche eines einzelnen Kanals ($= 4 s \cdot h_G$)
b	Stabdicke
f	Reibungsfaktor
g	Schwerebeschleunigung
h_G	Krippenhöhe
\dot{m}''	Stoffumsetzungsgeschwindigkeit
n	Anzahl der Stäbe pro Lage der Krippe
r	Abbrandgeschwindigkeit in g/sec
$\dot{q}_{str.}$	Wärmestrahlung in Watt/Raumwinkel
s	waagrechter Abstand zwischen den Stäben
t	Zeit
v	Geschwindigkeit
A_v	Querschnittsfläche aller Kanäle einer Krippe = $(n - 1)^2 a_v$
A_s	Gesamte freie Oberfläche des Brennstoffs
G	Dimensionslose Kenngröße
M	Masse der Krippe
L	Länge eines Stabes
N	Anzahl der Lagen pro Krippe
R	Restmasse der abbrennenden Krippe in %
R'	Massenverlustgeschwindigkeit in % der Anfangsmasse pro Zeiteinheit
ϑ	Temperatur
ρ_o	Dichte der Umgebungsluft
φ	Porosität der Krippe
χ	Porosität (Block

Index

o Zustand vor der Verbrennung

9. LITERATURVERZEICHNIS

1. Thomas, P.H. Effects of Fuel Geometry in Fires.
Building Research Establishment
Current Paper 29/74, Feb. 1974
2. Brein, D. Modellbrandversuche zur Bestimmung
Schatz, H. des Brandablaufs von Feststoffbränden.
Forschungsbericht Nr. 27 der Arbeits-
gemeinschaft Feuerschutz (AGF), 1975
3. Martin, S. Diffusion-Controlled Ignition of
Cellulosic Materials by Intense
Radiant Energy.
Tenth Symposium on Combustion
pp. 877 - 896, The Combustion Institute,
1965
4. 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
5. Fons, W.L. Scale Effects on Propagation Rate of
et al. Laboratory Crib Fires.
Ninth Symposium on Combustion
pp. 860 - 866, The Combustion Institute,
1963
6. Block, I. Study of nonpropagating free burning
fires
Harvard Univ., Dr. phil Thesis, 1970
7. Thomas, P.H. The Size of Flames from Natural Fires.
Ninth Symposium on Combustion, The
Combustion Institute, 1963

10. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1. Einige typische Brandausbreitungsgeschwindigkeiten von Brandstoffen nach [1].

Verbrennungsart bzw. Brennstoff	ca. Ausbreitungsgeschwindigkeit in m/h
Holzverkohlung	0,03
Holzkippen (ruhende Luft)	0,13 - 1,6
Papier 10 g/m ² (horizontal)	15
Brandkatastrophen in Gemeinden (ruhende Luft)	70
Papier, Baumwolle (aufwärts)	90 - 700
Heide (Wind c 4 m/s)	20 - 800
Wipfelbrände in Wäldern	900 - 10 000
Laminare Vermischflammen	600 - 150 000

Tabelle 2. Abbrandmessungen

Krippentypus *	Zündung	a_{so}/a_{vo}	R' (50) in %/min	$\frac{100 \dot{m}'' (50)}{\rho_o \sqrt{g h_c}}$
2 / $\frac{1}{3}$ / 13 / 8	Ecke	96	1,61	0,072
2 / 1 / 13 / 8	"	32	7,14	0,264
2 / 3 / 13 / 8	"	10,67	9,52	0,325
2 / $\frac{1}{3}$ / 21 / 8	"	96	1,30	0,059
2 / $\frac{1}{3}$ / 21 / 16	"	192	1,20	0,055
2 / $\frac{2}{3}$ / 21 / 8	"	48	2,20	0,092
2 / 1 / 21 / 8	"	32	4,55	0,173
2 / 1 / 21 / 16	"	64	1,74	0,066
2 / 1,5 / 21 / 8	"	21,33	5,90	0,222
2 / 2 / 21 / 8	"	16	10,00	0,344
2 / 3 / 21 / 8	"	10,67	9,09	0,313

* 2 / $\frac{1}{3}$ / 21 / 8 : Stabdicke 2 cm, Stababstand $\frac{1}{3}$ mal Stabdicke;
Stablänge 21 x Stabdicke; Krippenhöhe 8 Lagen

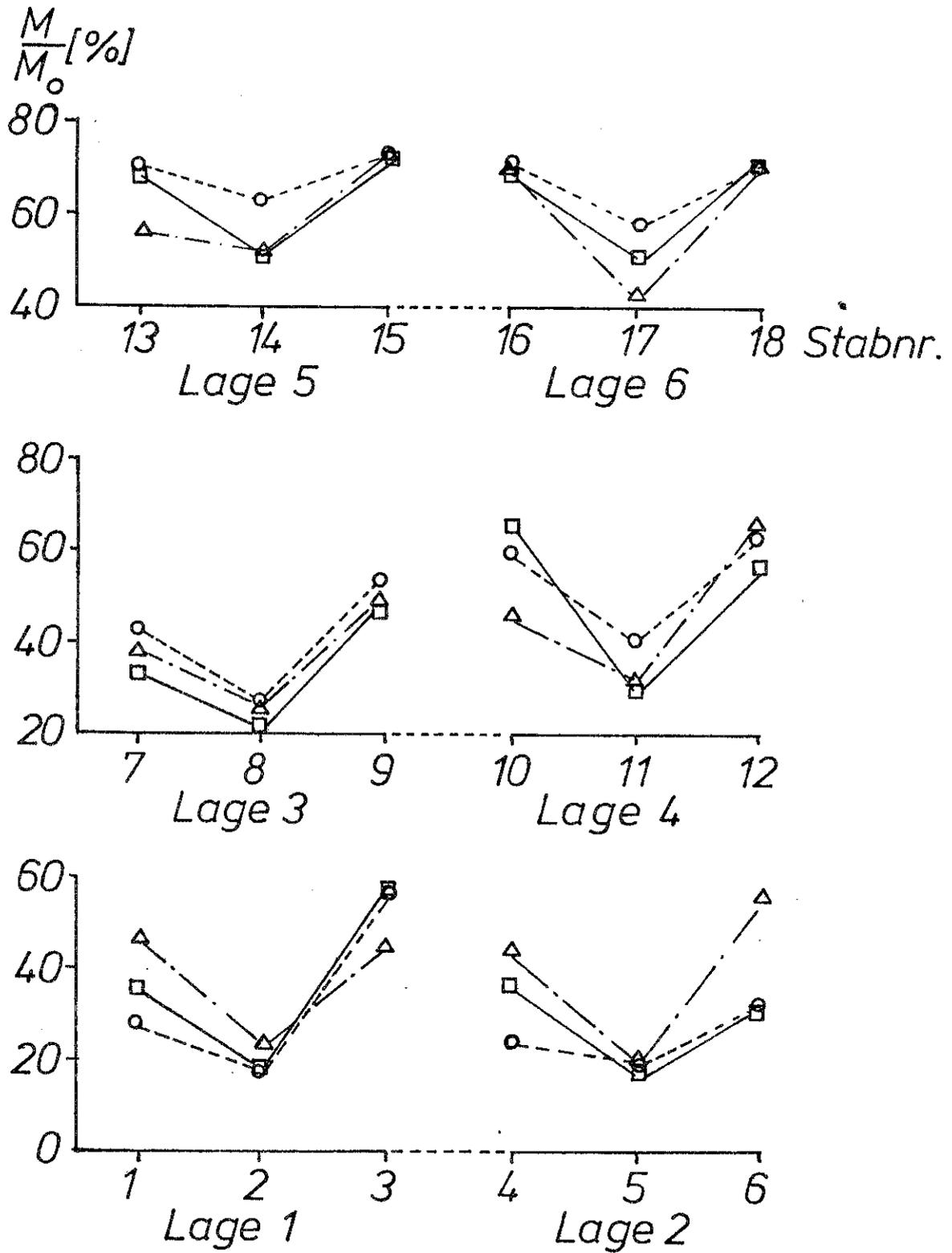


Bild 1 Massenverlust der Einzelstäbe bei einem Gesamtmassenverlust der Krippe von 50 % .
□ Versuch 1; ○ Versuch 2; △ Versuch 3.

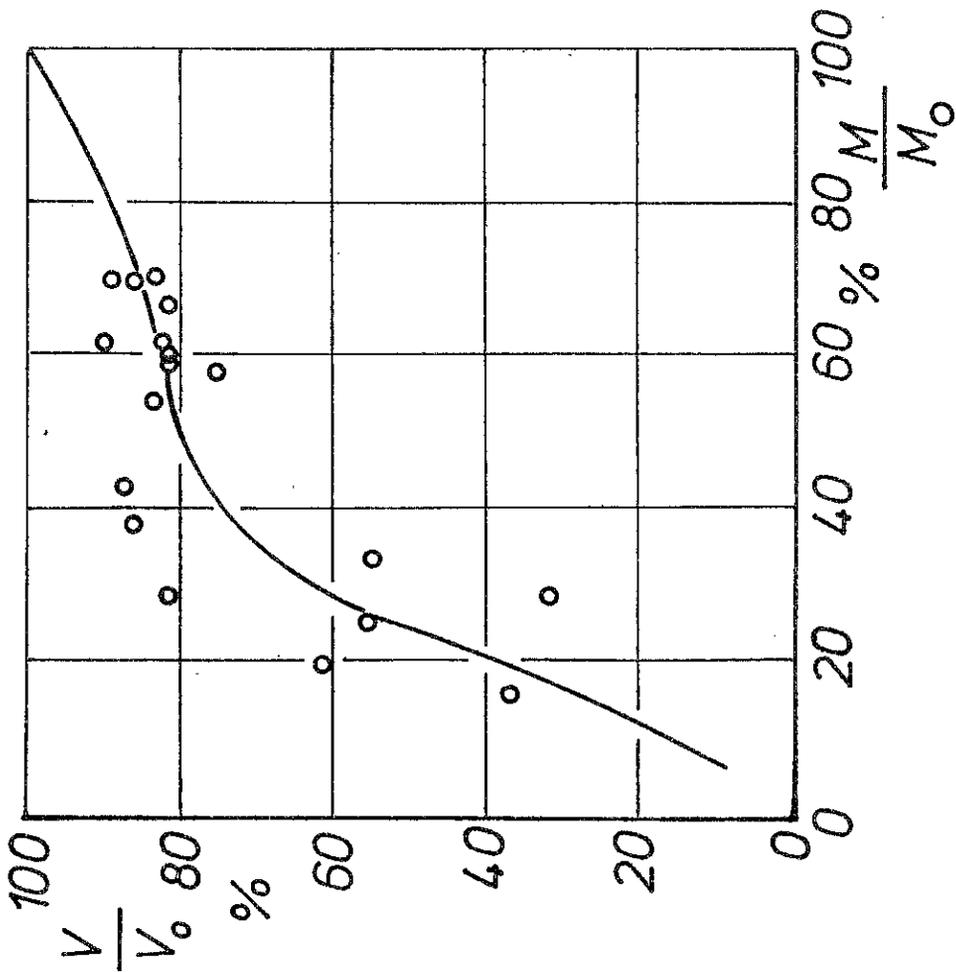


Bild 2 Volumenabnahme des Einzelstabs im Verband der Krippe während der Verbrennung.

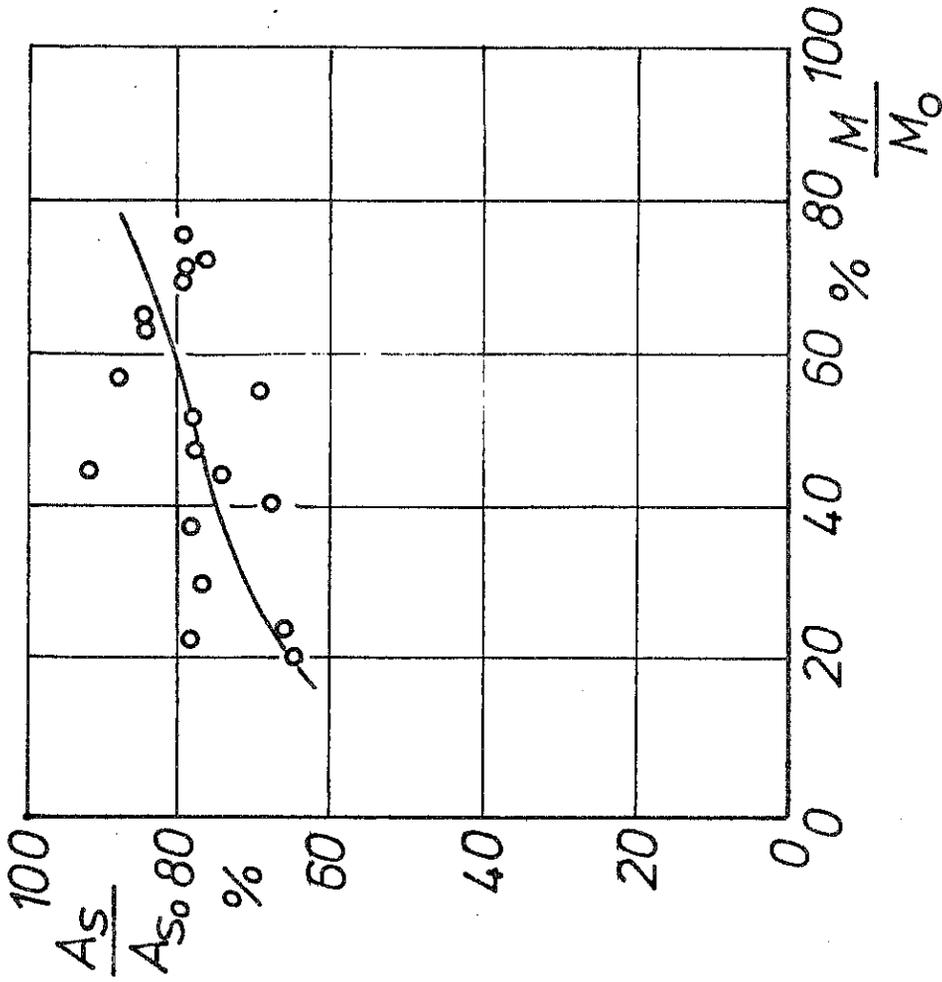


Bild 3 Zusammenhang zwischen dem Massenverlust und der für die Verbrennung vorhandenen Oberfläche.

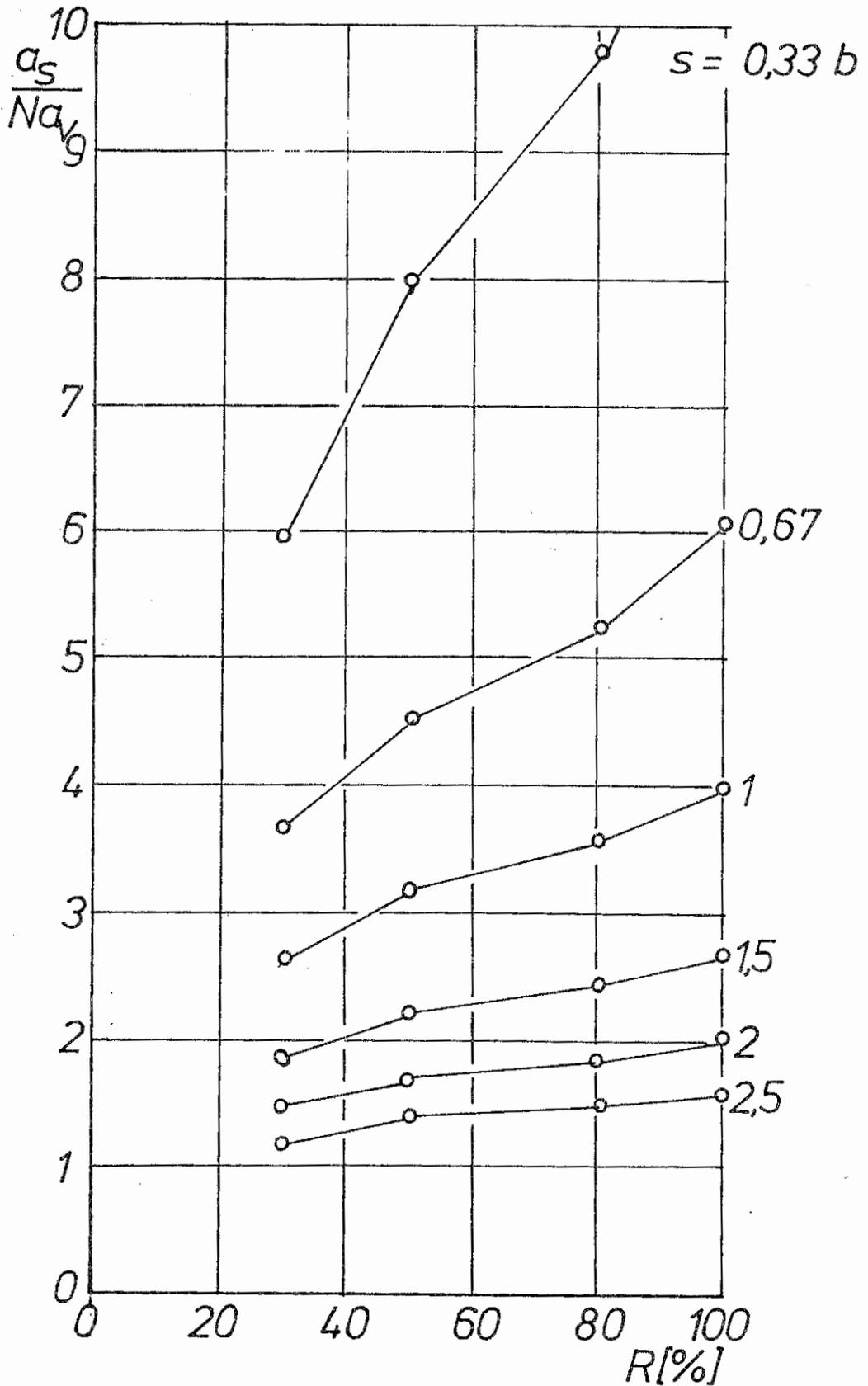


Bild 4 Porosität des Einzelkanals in Abhängigkeit vom Abbrandstadium.

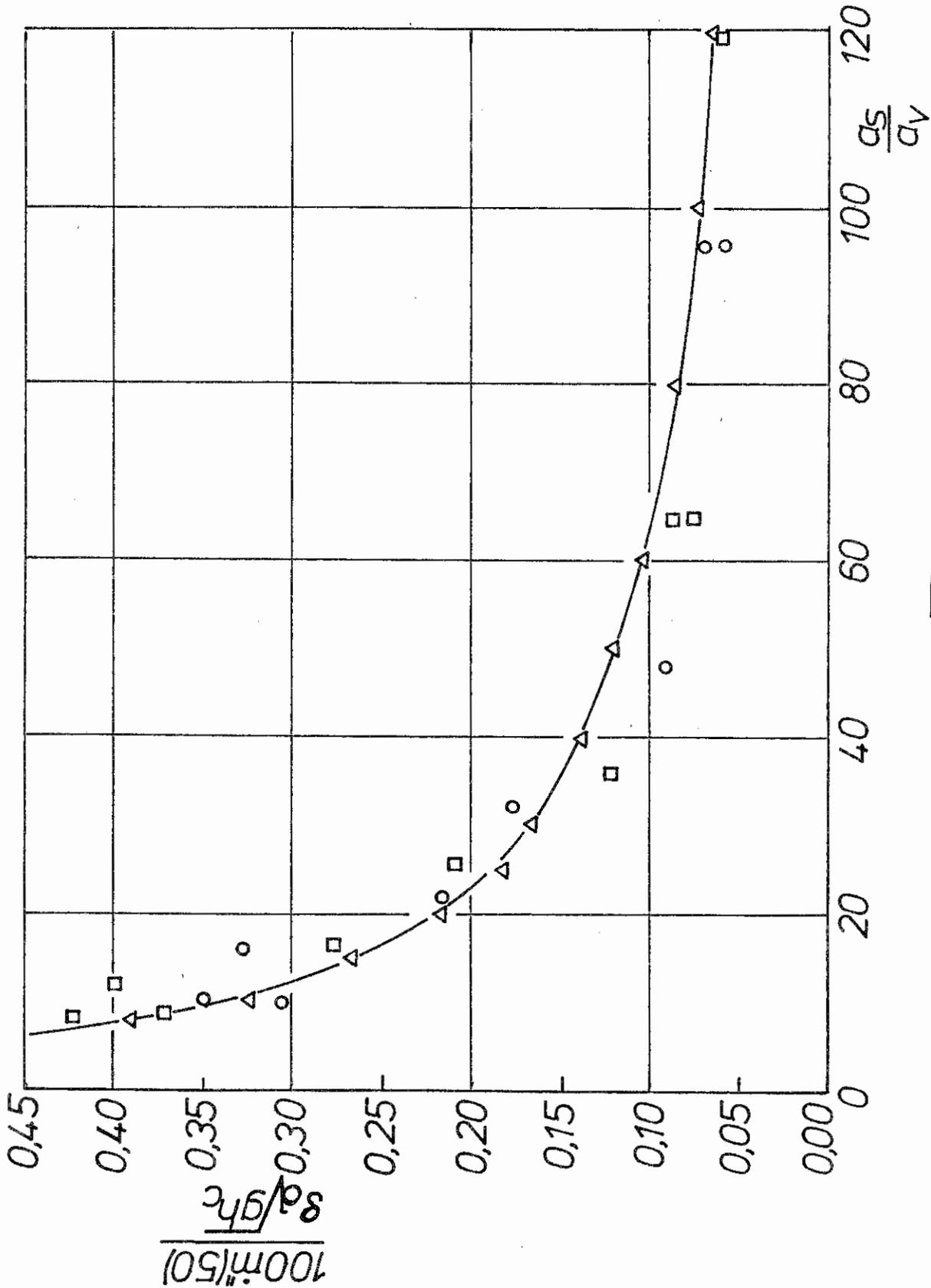


Bild 5 Abbrandkenngröße $\hat{m}'' (50) / \rho_0 \sqrt{g h_c}$ in Abhängigkeit vom kennzeichnenden Flächenverhältnis a_s / a_v .
 Δ Werte nach Gl. (8); \circ Meßwerte mit a_{s0} / a_{v0} und A_{s0} ;
 \square Meßwerte mit a_s / a_v nach Bild 4 und A_s .

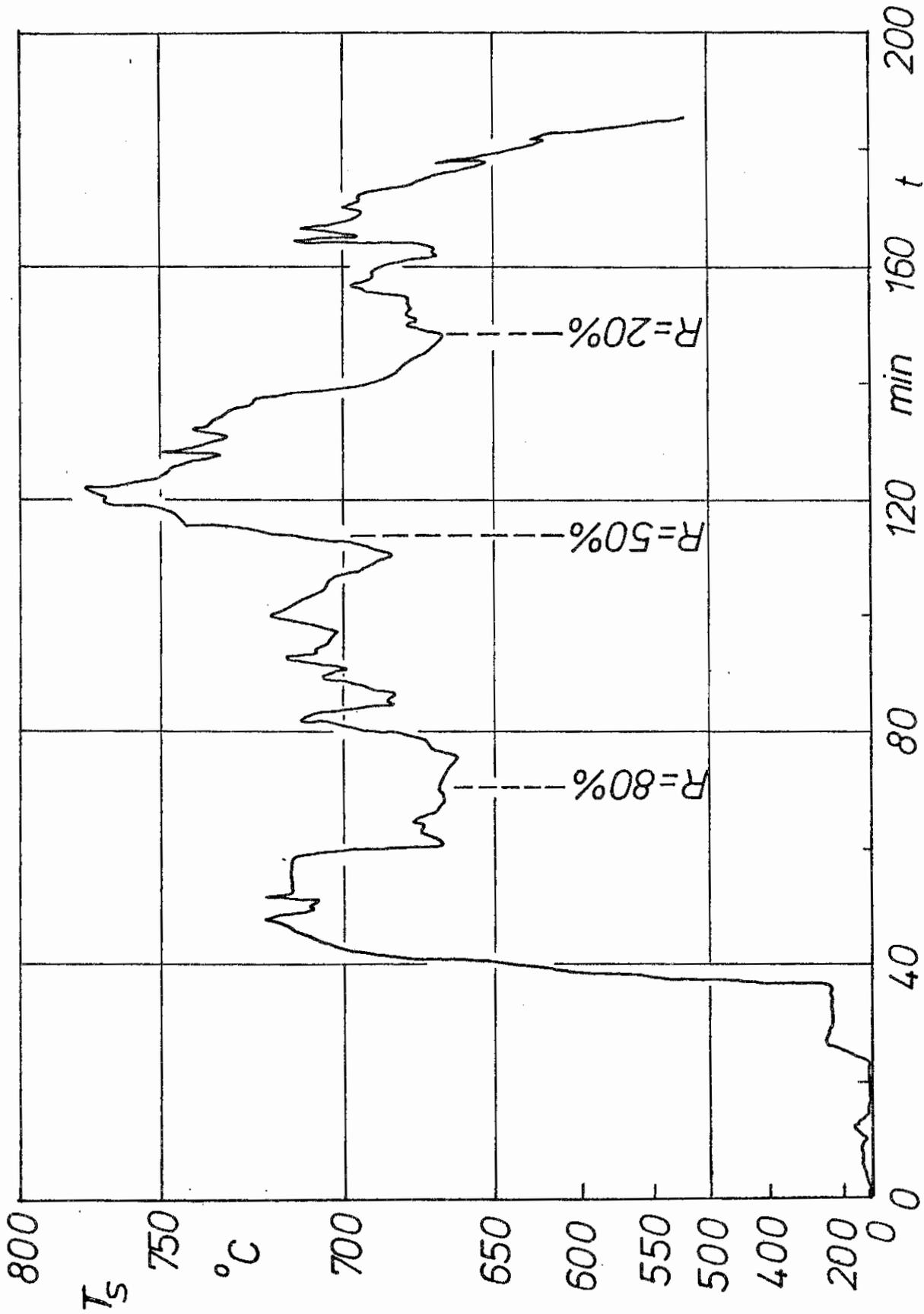


Bild 6 Zeitlicher Verlauf der der Wärmestrahlung äquivalenten Schwarzkörper-temperatur T_s an der Oberfläche einer Krippe $2/1/21/8$ und diagonalem Flammenfortschritt.

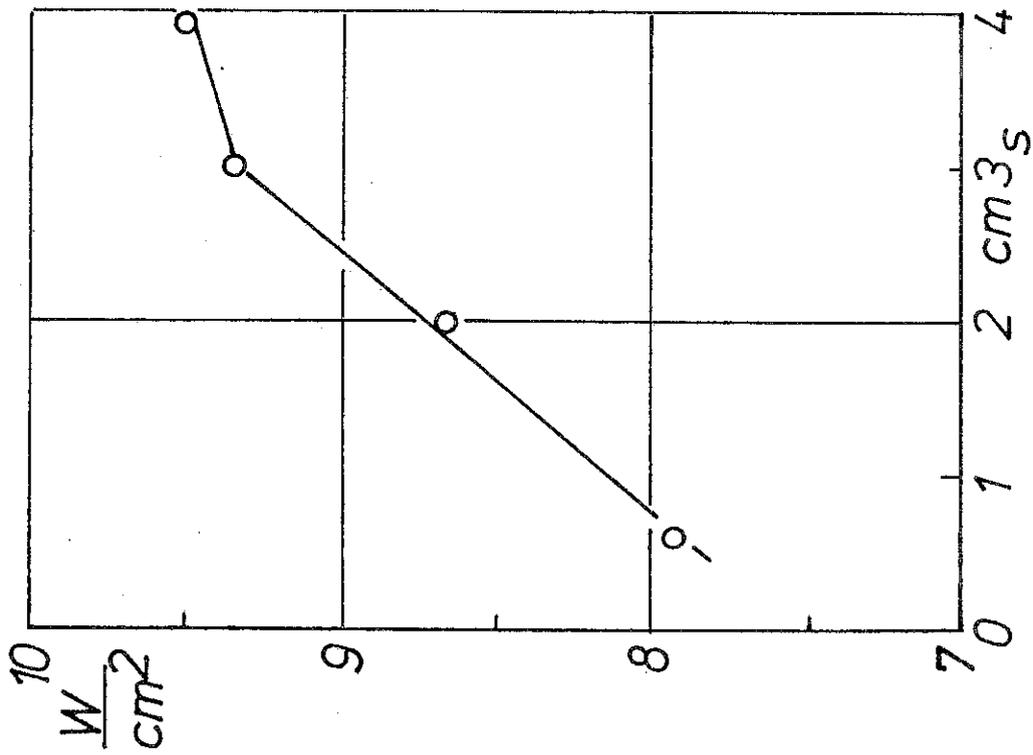


Bild 7 Maximale Strahlungsintensität von Krippen in Abhängigkeit vom Stababstand .

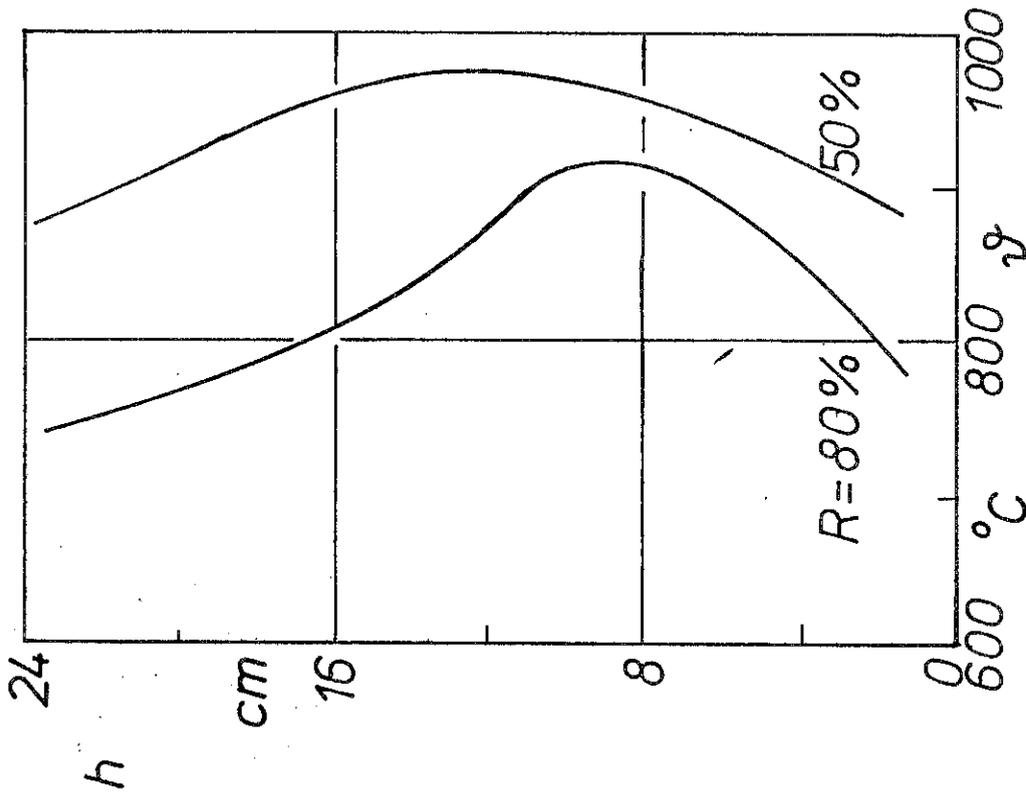


Bild 8 Temperaturverlauf in einem Kanal einer Krippe 2/1/21/8 über der Höhe bei verschiedenen Abbrandzuständen.

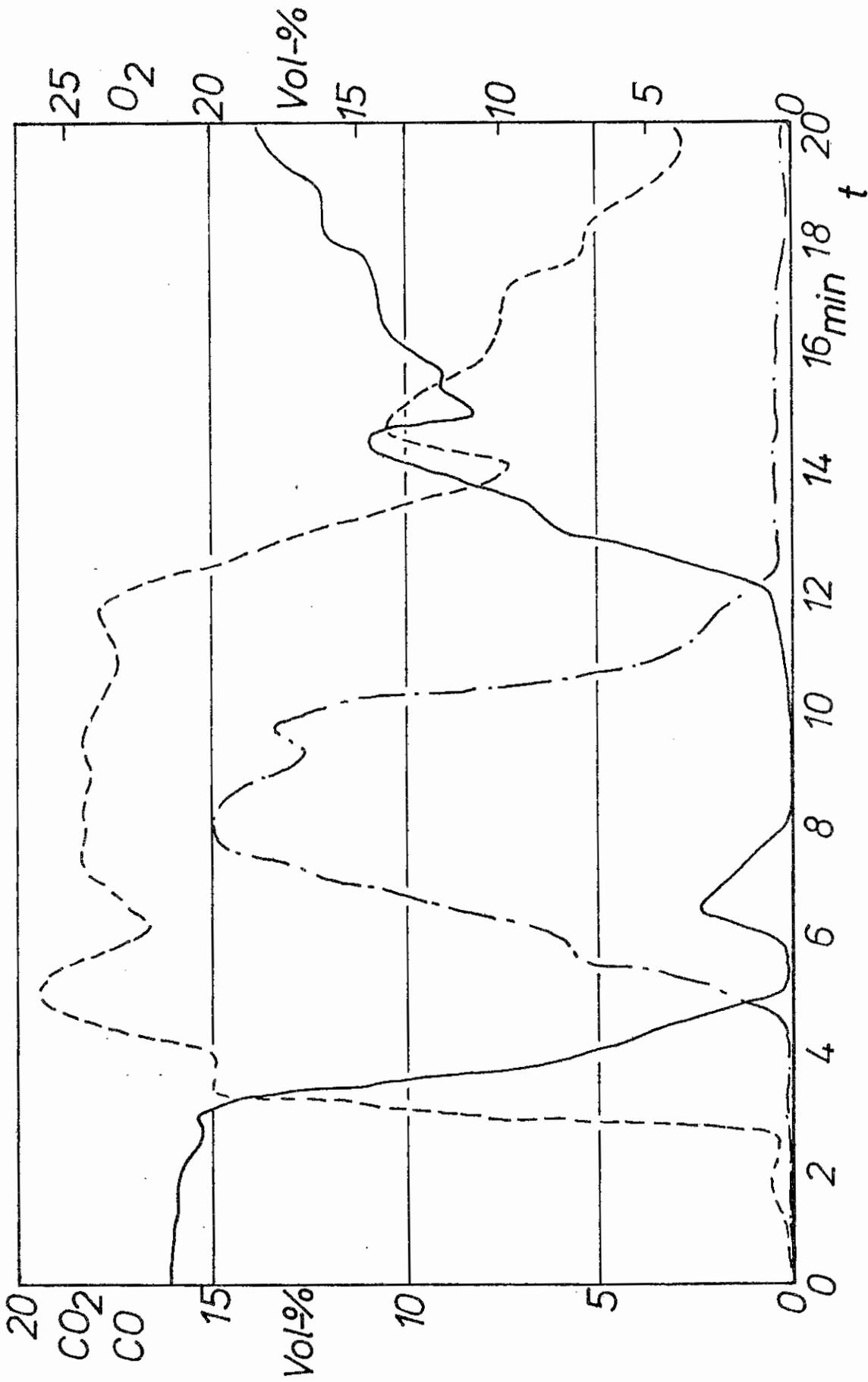


Bild 9 Zeitlicher Konzentrationsverlauf von O₂, CO₂ und CO in Vol.-%.
Meßort : Krippe 2/1/21/8, direkt über der Kanalöffnung Mitte.

— O₂ ; - - - - CO₂ ; - · - · - CO

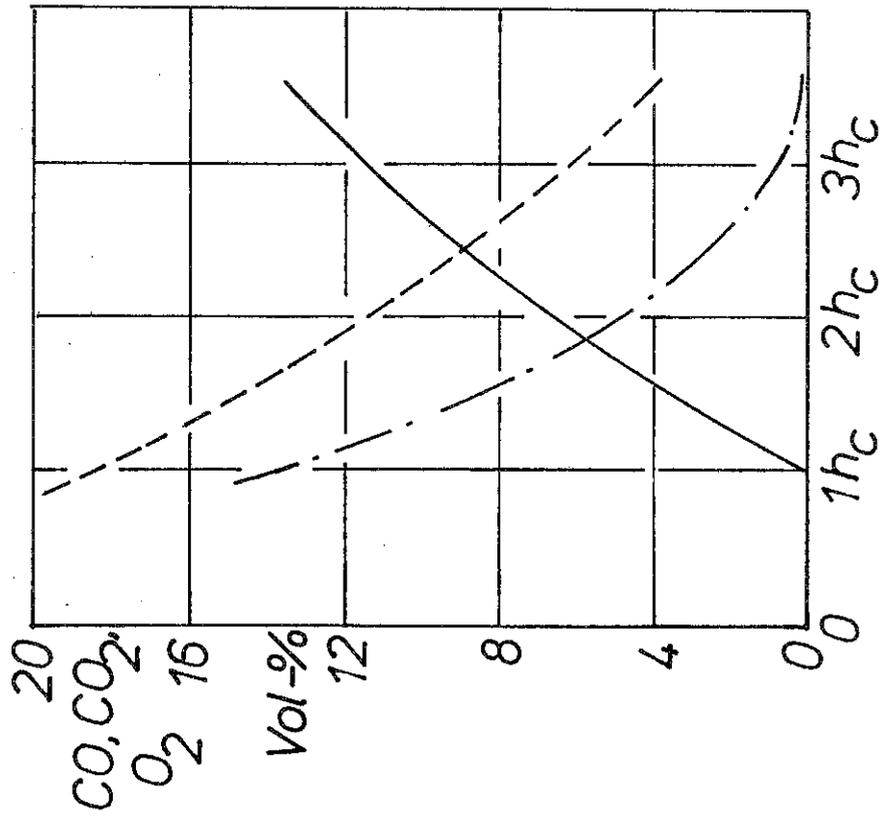


Bild 10 Örtlicher Konzentrationsverlauf von O₂ , CO₂ und CO in Vol.-%.
 Meßort : Krippe 2/2/21/8 , Höhen variiert .
 — O₂ ; - - - CO₂ ; - · - · CO .

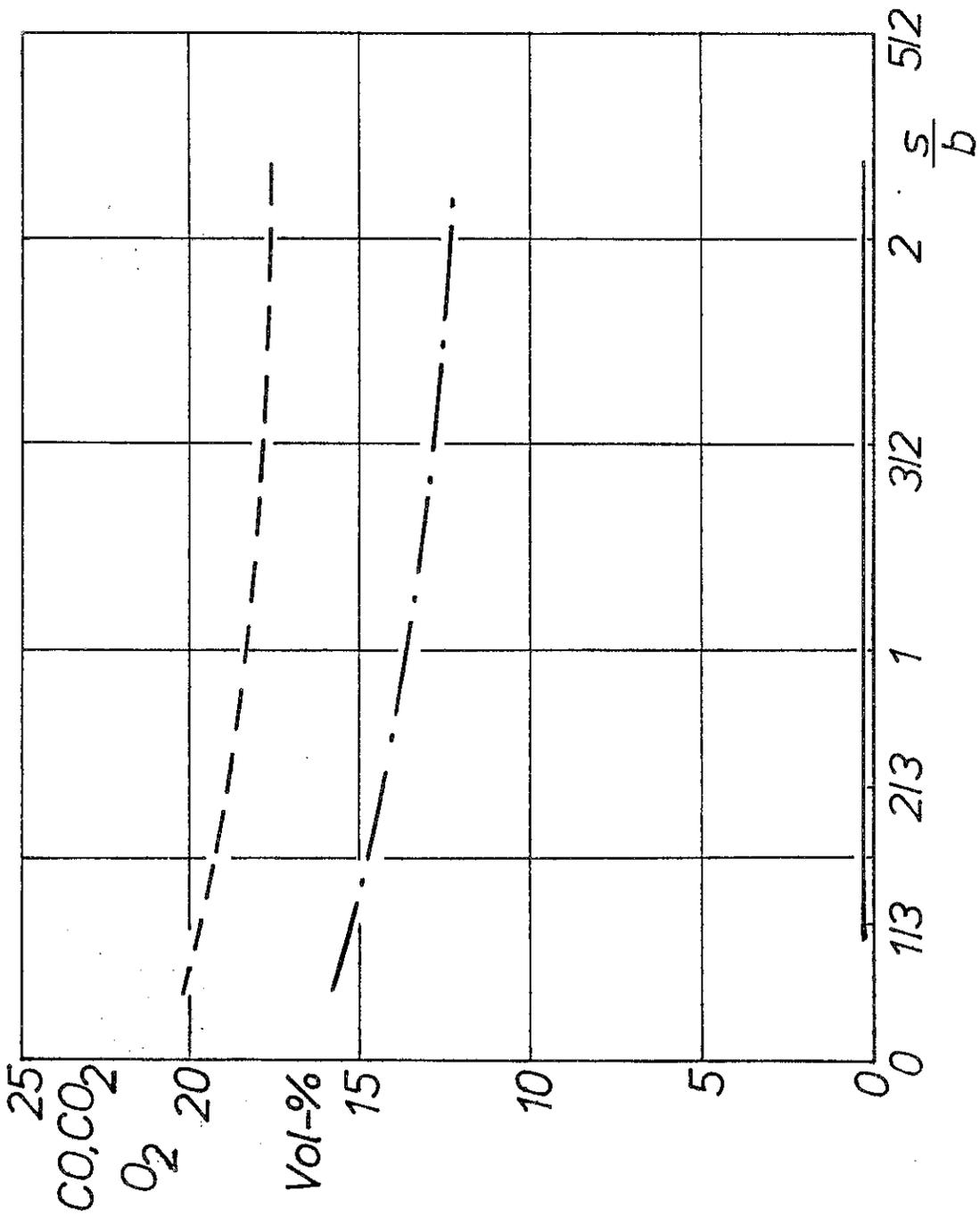


Bild 11 Örtlicher Verlauf des Maximalgehaltes an O₂, CO₂ und CO in Vol.-% in Abhängigkeit vom Stababstand, gemessen direkt über der Krippe.
—— O₂ ; - - - - CO₂; - · - · - CO .

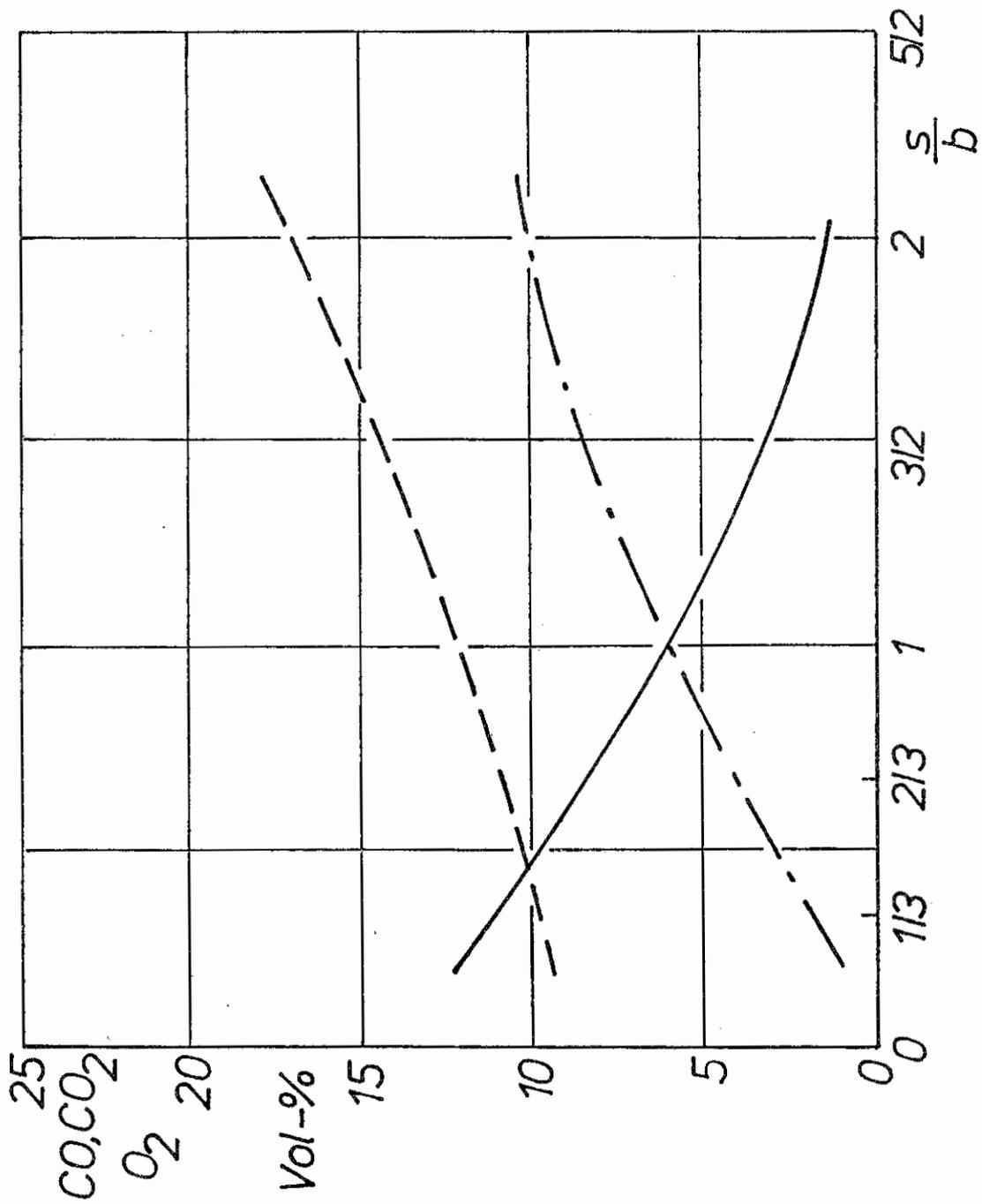


Bild 12 Örtlicher Verlauf des Maximalgehaltes an O_2 , CO_2 und CO in Vol.-% in Abhängigkeit vom Stababstand, gemessen in doppelter Krippenhöhe .
—— O_2 ; - - - CO_2 ; ····· CO .