

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Modellbrandversuche zur Bestimmung des
Brandablaufes von Feststoffbränden.

34

**ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V - UNTERAUSSCHUSS "FEUERWEHRANGELEGENHEITEN"**

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

Forschungsbericht Nr. 34

Modellbrandversuche zur Bestimmung des
Brandablaufes von Feststoffbränden.

von
Dipl.-Ing. Dieter Brein

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Juli 1978

FA. Nr. 71 (3/75)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. GRUNDLAGEN	4
2.1. Abbrandverhalten von Holzkrippen in Abhängigkeit von Lage und Größe der Zündquelle	5
2.2. Vorgänge am Einzelelement	11
3. ENTWICKLUNG EINES MODELLS FÜR DIE ENTZÜNDUNG UND BRANDAUSBREITUNG IN HOLZKRIPPEN	14
3.1. Geometrische Vereinfachungen	14
3.2. Annahmen über die Reaktion	17
3.3. Mathematische Beschreibung des Rohrmodells	20
4. ZUSAMMENFASSUNG	27
5. FORMELZEICHEN	29
6. LITERATURVERZEICHNIS	31
7. BILDER	35

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Das reale Brandgeschehen wird ursächlich von mehreren Faktoren bestimmt. Diese sind die Brandursache, bestimmt durch die Position, die Art und die Größe der Zündquellen und das Material in deren unmittelbaren Bereich, sowie das weitere Brandgut bzw. Brandobjekt in der Nähe dieses Zündbereichs, dessen Art, Lage und Gehalt an brennbarem Material. Neben zusätzlichen Einwirkungen von außen (Ventilation) bestimmen diese die räumliche und die zeitliche Brandausbreitungsgeschwindigkeit sowie die Rauchausbreitungsgeschwindigkeit, die für die Brandbekämpfung und die resultierende Schadenshöhe eines Brandes von ganz entscheidender Bedeutung sind.

Ziel einer systematischen Untersuchung des Brandgeschehens muß es daher sein, die Gesetzmäßigkeit zu erforschen, nach denen im Zusammenwirken von spezifischen Eigenschaften der Zündquelle und des Brandgutes ein Brand entstehen und sich bis zum Zustand des vollentwickelten Brandes ausbreiten kann. Wenn man die Gesetzmäßigkeiten kennt und auf den Problemfall anwenden kann, dann ist damit eine Basis geschaffen, mit deren Hilfe Brandrisiken besser erkannt werden können und damit ein Beitrag zu deren Verringerung geleistet werden kann.

Systematische Untersuchungen bedingen, daß man die möglichen Einflußgrößen problembezogen verändern und damit die Größe ihrer Einflußnahme bestimmen kann. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen versucht man häufig in der Forschung, den zur Diskussion stehenden Vorgang experimentell und mathematisch an einem einfachen und doch variablen, im Maßstab verkleinerten Modell zu simulieren, was den Vorteil hat, daß die Ergebnisse vieler Forschungs-

labors, die dieses Modell verwenden, verglichen werden können und außerdem Versuchsdaten für die Überprüfung der Gültigkeit theoretischer Ansätze zur Verfügung gestellt werden können. Der Rückschluß von den Ergebnissen der Modelluntersuchung auf den realen Brandfall sollte dann zur Brandrisikoverminderung beitragen.

Heskestad [1] hat in einer Übersicht vier verschiedene Möglichkeiten der Modelltechnik beschrieben und dabei auf die Schwierigkeiten hingewiesen, einen realen Brand mit einem Modell originalgetreu nachzubilden, da viele Effekte, wie z.B. die vollständige Untersuchung des Strahlungsaustausches, bei vertretbarem Aufwand noch nicht hinreichend berücksichtigt werden können. Die Anwendungsgebiete der Modelluntersuchungen sind überwiegend die Verbrennung von Feststoffen im Freien oder in geschlossenen Räumen sowie deren Löschung. Daneben ist auch das Brandverhalten flüssiger und gasförmiger, in Tanks gelagerter Brennstoffe für den Brandschutz von großem Interesse. Bevor man eine vollständige Beschreibung des Brandablaufes anhand der Kenntnisse aus den Versuchen und aus theoretischen Überlegungen geben kann, ist es wegen der Komplexität des Vorganges notwendig, zunächst bzw. begleitend zu den umfangreichen Modellen, Einzelabläufe zu untersuchen.

Im Rahmen der Untersuchungen des Abbrandverhaltens von Brandlasten in geschlossenen Räumen im Modellmaßstab, die bei verschiedenen Brandforschungsinstituten durchgeführt wurden, ergab sich, daß aufgrund eines Mangels an Informationen über das Abbrandverhalten der verwendeten Modellbrandlast im Freien Unterschiede beim eingeschlossenen Fall bei gleichen Versuchsbedingungen nicht schlüssig erklärt werden konnten.

Das Verhalten des aus Holz als einem viel verwendeten Material gebildeten Brandlast mußte also untersucht werden.

Die in der Brandschutzforschung übliche geometrische Anordnung für diese Brandlast ist die Krippenform. Eine Holzkrippe besteht aus mehreren Lagen parallel und im gleichen Abstand zueinander gelegter Stäbe meist quadratischen Querschnitts, wobei nachfolgende Lagen jeweils im rechten Winkel über der vorhergehenden liegen. Die Wahl der Holzart, der Holzfeuchte und der geometrischen Abmessungen wie Stabdicke, Krippenhöhe, Stababstand und Anzahl der Stäbe je Lage läßt eine Vielzahl von Variationen zu.

Der vorliegende Bericht ist Teil eines an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Forschungsprogramms [2,3] zur Beschreibung des Abbrandverhaltens von Holzkrippen, die neben dem oben angegebenen Verwendungszweck auch noch bei der Prüfung der Löscheinleistung von tragbaren Feuerlöschern nach DIN 14406 als Prüfobjekt Anwendung finden. Auch dort ist eine genauere Kenntnis des Abbrandverhaltens des Prüfobjekts erforderlich, da die Beurteilung der Löscheinleistung von Feuerlöschern nur dann exakt sein kann, wenn sich die Unterschiede bei den Brandobjekten aufgrund verschiedener Einflüsse erfassen lassen und quantitativ in die Beurteilung der Löscher eingehen können.

Der Schwerpunkt des Forschungsprogramms lag bisher [2,3] auf der experimentellen Ermittlung von Temperaturen, Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes, Gaskonzentrationen und Abbrandgeschwindigkeiten. Diese Versuchsdaten dienen u.a. dazu, die Überprüfung der Richtigkeit der Annahmen für das im vorliegenden Bericht entwickelte Gleichungssystem zu ermöglichen, sobald dieses mathematisch gelöst ist.

2. GRUNDLAGEN

Über die Untersuchung des Brandverhaltens von aus Holzstäben gebildeten Krippen wurden aus den vergangenen Jahren verschiedene Arbeiten bekannt, die dieses Thema mit unterschiedlicher Zielsetzung in Bezug auf die praktischen Bedürfnisse behandelten, d.h. für welche Art eines Brandes die Versuche Rückschlüsse ermöglichen sollten. Als Beispiel an dieser Stelle seien Waldbrände, Brände in Regallagern und Brände in Gebäuden (bzw. Gebäudeeinrichtungen) genannt. Für diese drei Anwendungsfälle läßt sich zusammenfassend feststellen, daß die Aufgabenstellung unterschiedliche Vorgehensweisen erforderte, die sich primär in der Wahl der Lage und der Größe der Zündquelle unterschieden.

Die experimentell dabei am einfachsten verifizierbare Phase des Abbrandes ist die der stationären Verbrennung, die zwischen der Anfangs-, d.h. Brandentwicklungsphase und der Abklingphase liegt. Dieser Sachverhalt ist qualitativ im Bild 1 dargestellt. Über der Zeitachse ist dabei der Massenverlust der Modellbrandlast aufgetragen. Der Abbrandverlauf wurde dabei in die drei obengenannten Abschnitte unterteilt.

Zweifellos kann dieses Bild nur sehr unvollständig den Ablauf der beim Brand auftretenden Vorgänge wiedergeben, die sich bei genauer Betrachtung wesentlich komplizierter darstellen. Wenn es trotzdem hier als Ausgangspunkt genommen wird, dann nur, um die nachfolgende Beschreibung anschaulich zu

begleiten, die in zwei Abschnitte aufgeteilt wird. Der erste Abschnitt streift kurz den Brandverlauf, so wie er sich im Makromaßstab darstellt, d.h. an der Gesamtheit der Krippe, der zweite Abschnitt befaßt sich mit den Vorgängen an den Oberflächen des Einzelstabes, der hier stellvertretend für die Innenwand eines senkrechten Strömungskanals einer Krippe verstanden werden soll.

2.1. Abbrandverhalten von Holzkrippen in Abhängigkeit von Lage und Größe der Zündquelle

Die Wahl von Lage und Größe der Zündquelle relativ zur Form und Größe der Holzkrippe läßt grundsätzlich mehrere Möglichkeiten offen, die im Falle der drei obengenannten realen, im Modell darzustellenden Brandfälle Waldbrand, Regallager und Gebäude(- einrichtungen), zu den folgenden Kombinationen führen:

a) Zur Simulation eines Waldbrandes wird eine Krippe mit rechteckiger Grundfläche gewählt (Längsseite >> Schmalseite), die mit einer relativ kleinen Zündquelle über die gesamte Breite einer Schmalseite entzündet wird. Die resultierenden stationären Abbrandgeschwindigkeiten der von der Schmalseite nach einer an der gesamten Branddauer gemessenen kurzen Brandentwicklungsphase weglaufernden Verbrennungsfrent in Abhängigkeit von Stoff- und Geometrieparametern der Krippe waren Gegenstand von Untersuchungen von Fons et.al. [4] und Thomas et.al. [5]. Die Hauptausbreitungsrichtung der Flammenfrent ist dabei notwendigerweise horizontal. Die im Bild 1 dargestellten Bereiche I und III sind dabei zeitlich kurz, der Bereich II lang, da bezogen auf die gesamte Krippe sehr rasch ein stationärer Zustand erreicht wird. Erst wenn die

Flammenfront das Ende der Krippe erreicht hat, klingt der Gewichtsverlust ab. Im unmittelbaren Bereich der Flammenfront selbst spielen sich allerdings kontinuierlich die durch die Phasen I bis III beschriebenen Vorgänge ab, doch darauf soll erst später, bei der Diskussion der Vorgänge am Einzelstab, eingegangen werden.

b) Eine weitere mögliche Kombination beinhaltet Krippen quadratischer Grundfläche mit quasi punktförmiger Zündquelle, entweder unter einer Randecke oder zentral unter der Krippenmitte. Diese Art des Versuchsaufbaues führt zu Formen einer sowohl horizontalen als auch vertikalen Brandausbreitung vom Zündort weg. Die Form der Flammenfront läßt sich dabei am besten mithilfe der Wannenform veranschaulichen, die in dem Falle, wo der Boden der Krippe unten offen ist, mehr in eine zylindrische Form übergeht. Dies zeigt, daß die Geometrie einer Krippe, insbesondere die Größe des Hohlraumanteils und die Richtung der Luftzuströmung an die Flammenfront von entscheidendem Einfluß auf die Abbrandgeschwindigkeit und auf die Richtung der Flammenausbreitung sind. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien von Arbeiten der genannten Art folgende zitiert: Gross [6], Brein und Schatz [2], Brein [3], Smith und Thomas [7], Delichatios [8] und die dort aufgeführten Literaturzitate.

Auch bei diesem Brandverlauf kann die Unterteilung in die drei Bereiche des Bildes 1 vorgenommen werden.

Wie bei den Krippen mit großer Längsausdehnung treten die drei Phasen des Abbrandes in unmittelbarer Umgebung der Flammenfront nebeneinander auf. Die Art der Flammenfrontausbreitung kommt hier dem Brandgeschehen in Regallagern oder Wohn- und Geschäftsgebäuden am nächsten, bei dem in aller Regel auch mit einer relativ kleinen Zündquelle, bezogen auf das gesamte Brandgut, zu rechnen ist.

c) Die dritte sinnvolle Kombination von Krippe und Zündquelle ist die in den Arbeiten von Block [9, 10], Thomas [11], Thomas und Nilsson [12] und Yamashika und Kurimoto [13] dargestellte, wobei eine Zündwanne, deren Grundfläche so groß oder geringfügig größer als die der Krippe ist, verwendet wurde. Diese Wahl der Größenordnung von Zündquelle und Krippe hat den Vorteil, daß die gesamte Krippe innerhalb kurzer Zeit von den Flammen erfaßt wird, so daß anschließend nahezu überall an den Staboberflächen fast gleiche Bedingungen für die Verbrennung vorliegen. Damit ist dieses Modell für die Untersuchung der beim Abbrand ablaufenden Teilprozesse am besten geeignet, weil zu gleicher Zeit dieselben Vorgänge an allen Einzelelementen (Holzstäben) der Krippe ablaufen. Es liegt hier außerdem eine klare Hauptströmungsrichtung vor, die Aufheizung erfolgt über die gesamte Grundfläche und die Austauschvorgänge von Stoff und Wärme lassen sich geometrisch eindeutig begrenzen. Für dieses Modell trifft die Untergliederung der Kurve im Bild 1 am besten zu, da hier an einem beliebigen Ort innerhalb der Krippe gleichzeitig mit allen anderen Orten in der Krippe, wie oben festgestellt, die drei Phasen der Brandentwicklung, des stationären Abbrandes und des Abklingvorganges ablaufen.

Die in den drei vorhergehenden Abschnitten genannten

Arbeiten waren auf die Untersuchung der stationären Abbrandphase, die bei Krippen des Falles c zwischen ca. 80 % bis 30 % der Anfangsmasse liegt, konzentriert. Von den meisten Autoren wurde die Abbrandgeschwindigkeit als Massenverlust pro Flächeneinheit der Staboberfläche und Zeit dargestellt. Der Wert dieser Größe setzt sich aus verschiedenen, durch den Verbrennungsvorgang hervorgerufenen Massenverlusten zusammen. Diese sind die Ausgasung und Zersetzung der Holzsubstanz in flüchtige Bestandteile und Holzkohle und die Verbrennung des zurückbleibenden Holzkohlegerüsts. Während die flüchtigen Bestandteile vorwiegend außerhalb der Holzoberfläche mit durch den Auftrieb herangeführter Umgebungsluft reagieren, findet die Holzkohlenverbrennung überwiegend an der Oberfläche statt. Diese Einzelvorgänge werden bei der Beschreibung des Zünd- und Brandverhaltens eines einzelnen Stabes eingehender dargestellt werden. Die Untersuchungen haben ergeben, daß diese vielleicht besser als " globale " Massenverlustgeschwindigkeit bezeichnete Abbrandgeschwindigkeit sich als Funktion geeigneter Stoff- und Geometrieparameter darstellen läßt. Die teils auf Versuchen und teils auf Bilanzrechnungen basierenden Formeln für die Abbrandgeschwindigkeit geben die Verhältnisse bei der stationären Verbrennung mit hinreichender Genauigkeit wieder. Die als Ausgleichskurve für Messungen bei [2,3] in [3] gewählte Darstellung

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

für die Entzündung einer Krippe an einer Ecke entspricht bis auf die Konstanten der von Thomas [14] angegebenen Gleichung

$$\frac{\dot{m}'' (50)}{\rho_{\infty} \sqrt{gh_c}} = 2 \cdot 10^{-2} \left(\frac{a_v}{a_s} \right)^{0,6} \quad (2)$$

für die Entzündung in der Mitte mit einer kleinen Zündquelle.

Beide Gleichungen sind spezielle Formen der allgemeinen Gleichung

$$\frac{\dot{m}'' (50)}{\rho_{\infty} \sqrt{gh_c}} = A \cdot \left(\frac{a_v}{a_s} \right)^B \quad (3)$$

wobei die Konstanten A und B von den Stoffgrößen, der Geometrie und den Umgebungsbedingungen abhängig sind. Die Größe $\frac{\dot{m}'' (50)}{\rho_{\infty} \sqrt{gh_c}}$ wird dabei aus der

dimensionslosen Froude'schen Kennzahl abgeleitet, die das Verhältnis von Trägheitskräften zu Auftriebskräften in der Strömung durch die Krippe angibt. Die Verwendung einer dimensionslosen Kennzahl für die Beschreibung des Abbrandverhaltens ergibt sich daraus, daß Krippen geometrisch untereinander ähnlich sind und damit auch ein ähnliches Strömungsbild in den Kanälen aufweisen. Da es sich um auftriebbehaftete, d.h. im wesentlichen durch Temperatur- bzw. Dichtedifferenzen zwischen heißen Rauchgasen und Umgebungsluft bestimmte Strömungen handelt, wurde die Froude'sche Kennzahl gewählt. Da der Verbrennungsvorgang von der Vermischung von brennbaren Gasen mit Umgebungsluft abhängig ist, und die Menge der zugeführten Umgebungsluft

in die Kanäle eine Funktion der Krippenporosität, also letztlich der Strömungswiderstände ist, ergibt sich die in Gleichung 3 gegebene funktionelle Abhängigkeit. Die Größe $\left(\frac{a_v}{a_s}\right)_0$ gibt das Verhältnis der

Querschnittsfläche eines vertikalen Kanals zu der Umfangsfläche dieses Kanals vor der Entzündung der Krippe an und ist damit für die Reibungsverluste innerhalb der Krippe maßgebend. Die Gleichung 3 gibt in kurzen Worten folgenden Sachverhalt wieder: Wenn die Kanalquerschnitte bezogen auf die brennbare Oberfläche klein sind, dann sind die Strömungswiderstände für die Zuführung von Verbrennungsluft groß und die Abbrandgeschwindigkeit ist klein. Mit wachsenden Querschnitten nehmen die Strömungswiderstände ab und damit kann auch die Abbrandgeschwindigkeit zunehmen.

Bei hinreichend großer Porosität der Krippe nimmt der Einfluß der Strömungswiderstände auf die Verbrennung ab, sodaß die Abbrandgeschwindigkeit im wesentlichen sich der annähert, die man bei einem einzelnen, in freier Umgebung brennendem Stab findet, bei dem der aus Experimenten gefundene Zusammenhang lautet [9] :

$$\dot{m} \text{ "(50) } \sim b^{-0,5} \quad (4)$$

Während also die im Bild 1 mit Bereich II bezeichnete Phase des stationären Abbrandes durch die vorstehend dargestellten Gleichungen wiedergegeben werden kann, ist die Brandentwicklungsphase bei Holzkrippen und holzkrippenähnlichen Geometrien noch nicht ausreichend behandelt worden. Diese Behandlung wird jedoch nur dann

möglich, wenn man sich eine Vorstellung über die Mechanismen machen kann, die am einzelnen, in einer definierten Beziehung zur Umgebung stehenden Element ablaufen. Dazu ist es notwendig, von der stationären zur instationären Verbrennung überzugehen. Die dabei ablaufenden Vorgänge werden, soweit aus der Literatur bekannt, im nächsten Abschnitt behandelt.

2.2. Vorgänge am Einzelelement

Die an einem Element bei Temperatureinwirkung ablaufenden Vorgänge von der Aufheizung von der Umgebungs- bis zur Entzündungstemperatur wurden detailliert in einer Reihe von Arbeiten beschrieben, von denen die von Friedman [15], Merzhanov und Averson [16] und Welker [17] die umfassendsten zu dieser Thematik darstellen.

In diesen Arbeiten findet sich ein Überblick über die Ergebnisse von Untersuchungen zur Pyrolyse und Zündung von Feststoffen der verschiedensten geometrischen Abmessungen bei Einwirkung verschiedenster Zündquellen, z.B. Wärmestrahlung, heiße Luft, heiße Inertgase, heiße Rauchgase und Kombinationen davon. Für die hier zu behandelnde Problemstellung der Aufheizung einer Holzkrippe bis zur Entzündung und der weiteren Brandentwicklung bis zur stationären Abbrandphase stellt sich der Vorgang kurz zusammengefaßt folgendermaßen dar, wobei darauf verzichtet wird, die für das Problem relevanten und in den Arbeiten [15 bis 17] aufgeführten Literaturnachweise jeweils zu zitieren, vgl. auch [3].

Während der instationären Wärmeeinleitung durch Wärmezufuhr von außen heizt sich die Substanz auf. Nach dem Austreiben von Wasserdampf aus der oberflächennahen Schicht bei 100 °C setzt eine langsame Zersetzung bis zu Temperaturen von ca. 200 °C ein; die dabei entstehenden

Gase sind nicht zündfähig; die Zersetzungsreaktion läuft unter Wärmeaufnahme ab, ist also endotherm. Bis zu einer Temperatur von 280 °C bleibt die Reaktion endotherm, die freigesetzten Gase bestehen hauptsächlich aus CO₂, Wasserdampf und Essigsäure. Zwischen 280 °C und 500 °C nimmt die Geschwindigkeit der Reaktion stark zu, wobei bei Anwesenheit von Sauerstoff nach allgemeiner Auffassung die Reaktion exotherm ist.

Die dabei überwiegend entstehenden Zersetzungsprodukte sind CO, H₂, CH₄, CO₂, Essigsäure und Ameisensäure, Äthanol, Aldehyde, Ketone und Teer, die an die Oberfläche diffundieren und dort entzündet werden können. Bei Temperaturen über 500 °C beginnt auch die bei der Zersetzung entstehende Holzkohle zu brennen. Damit die Verbrennung aufrechterhalten werden kann und die Flammen sich weiter ausbreiten können, auch wenn die primäre Wärme (und Zünd-)quelle entfernt ist, müssen mehrere Bedingungen erfüllt sein:

1. Die Zersetzungsgase müssen in ausreichender Menge an die Oberfläche diffundieren und dabei die Strömungsgrenzschicht aus der Oberfläche durchqueren, damit der Einfluß des Löschabstandes außer Kraft tritt.
2. Die Flamme muß die Oberfläche weiter aufheizen und Wärme an die Oberfläche abgeben, damit die weitere Nachlieferung von Zersetzungsgasen aus dem Feststoff möglich wird.
3. Die Wärmeverluste aus der Flamme an die Umgebung dürfen nicht so groß werden, daß der unter 2. beschriebene Vorgang versiegt. Das bedeutet also im Fall von Krippen, daß die Rückstrahlung von der Flamme oder heißen benachbarten Oberflächen diesen Verlust kompensieren muß.

Es müssen also im Wechselspiel die Freisetzung von Pyrolysegasen aus dem Element und die Wärmeproduktion durch Verbrennung der Gase mit Umgebungsluft in der Flamme außerhalb des Elements die Verbrennung aufrechterhalten.

Die dabei auf den Verbrennungsvorgang und die Flammenausbreitung einflußnehmenden Parameter lassen sich in physikalische, geometrische und chemische unterteilen [15].

Physikalische und geometrische Parameter:

- Orientierung der Oberfläche im Raum
- Richtung der Flammenausbreitung
- Dicke des Einzelelements
- Oberflächenrauigkeit und Auftreten scharfer Berandungen
- Anfangstemperatur
- Geschwindigkeit der Umgebungsluft (freie oder erzwungene Konvektion)
- Zusätzliche Wärmeeinwirkung von außen

Chemische:

- Zusammensetzung des Feststoffs
- Zusammensetzung des Oxydationsmittels (im allgemeinen Umgebungsluft)

Die Darstellung des Vorganges im Modell erfordert damit die Wiedergabe folgender Vorgänge:

Im Element:

- Wärmeleitung
- Diffusion
- Chemische Umsetzungen

An der Grenzschicht Gas - Element:

- Konvektion
- Strahlung
- Chemische Umsetzungen.

3. ENTWICKLUNG EINES MODELLS FÜR DIE ENTZÜNDUNG UND BRANDAUSBREITUNG IN HOLZKRIPPEN

Es muß die Aufgabe eines Modells sein, die wirklich ablaufenden Vorgänge hinreichend genau zu simulieren. Dies ist jedoch nur im Rahmen der Kenntnisse möglich, die man über Einzelabläufe hat, z.B. über die Pyrolyse, über die Entzündung oder über das Wechselspiel zwischen Wärmeaufnahme der Stäbe und Wärmeabgabe an die Umgebung, sei es durch die Zündquelle selbst oder bereits gezündete Pyrolysegase.

Um dem hier vorliegenden sehr komplexen Problem näherungsweise eine Lösung anbieten zu können, wird es notwendig sein, einige vereinfachende Annahmen zu treffen, die zu einer einfacheren Beschreibung der Abläufe führen, besonders im Hinblick auf die mathematischen Schwierigkeiten, die ein zu umfangreiches Modell mit sich bringt. Diese Vereinfachungen werden die geometrischen Verhältnisse, die Stoffgrößen und die Gesetzmäßigkeiten von Wärme- und Stoffaustausch betreffen. Zunächst sollen die geometrischen Vereinfachungen betrachtet werden.

3.1. Geometrische Vereinfachungen

Im Bild 2 ist eine Ansicht eines Kanals in einer Krippe mit der Stabdicke b , dem Stababstand s und der Krippenhöhe h_c dargestellt. Da nach den im Abschnitt 2.2. dargelegten Vorgängen der für die Verbrennung interessanteste Bereich die oberflächen-nahe Schicht an den Stäben ist, hier also ein Grenzschichtproblem vorliegt, wird offenbar, daß die Behandlung mit dieser Geometrie zu großen Schwierigkeiten führen muß, da die senkrechte Hauptströmung einem starken Wechsel der Grenzschicht unterworfen ist.

Die Feststoff- Gas- Grenzschicht an der untersten Lage zu beiden Seiten des Kanals geht also in eine Gas- Gas- Grenzschicht (sog. freie Grenzschicht) über, worauf wieder eine Feststoff- Gas- Grenzschicht folgt, bis die letzte Lage der Krippe erreicht ist. Das bedeutet, daß eine wesentliche Vereinfachung dadurch erreicht werden könnte, daß man die Geometrie unter Berücksichtigung der in der Krippe ablaufenden Vorgänge von Feststoff- Gas- Austausch in Höhe der einen Lage und Umgebungsluftzuströmung in der folgenden Lage so modifiziert, daß nur noch eine einheitliche Grenzschicht für den gesamten Vorgang zutrifft.

Die naheliegendste geometrische Vereinfachung ist die, daß man die in der Krippe ablaufenden Vorgänge stellvertretend nur an einem vertikalen Kanal studiert und diesen so verändert, daß er nach den oben gemachten Überlegungen die Bedingung eines einzigen Grenzschichttyps von der Unterseite der Krippe bis zur Oberseite, d.h. über die gesamte Krippenhöhe erfüllt.

Block [9,10] hat bei der Behandlung der Vorgänge im Kanal während der Phase des stationären Abbrandes die Verwendung eines porösen Kanals mit sehr rauher Oberfläche vorgeschlagen, der die folgenden Eigenschaften aufweist:

Luft tritt am Boden und durch die seitlichen Öffnungen ein und reagiert im Innern des Kanals mit den aus der Kanaloberfläche herausdiffundierenden Pyrolysegasen, wobei der Strömungswiderstand für die zuströmende Luft dem im Windkanal an einem kalten Modell gemessenen entspricht.

Aufgrund der bei [2,3] durchgeführten Versuche wird diese Vorstellung soweit modifiziert, daß auf die Zuströmung von unten verzichtet wird. Eine weitere Veränderung besteht darin, daß statt des quadratischen Querschnitts ein Rohrquerschnitt gewählt wird. Die Berechtigung hierfür ergibt sich aus einem Vergleich zwischen einem quadratischen Querschnitt und einem Kreisquerschnitt in Bezug auf die Strömungsverhältnisse.

Nach der Definition des hydraulischen Durchmessers für Rohre von nichtkreisförmigem Querschnitt [18],

$$d_H = \frac{4F}{U} ,$$

ergibt sich beim Kanal mit quadratischem Querschnitt d_H zu s , dem Stababstand. Beim Rohr mit kreisförmigem Querschnitt ist d_H mit d identisch, dem Rohrdurchmesser. Das im Abschnitt 2.1 eingeführte, für die relative Luftzufuhr maßgebende Verhältnis von Kanaloberfläche zu Querschnittsfläche berechnet sich zu:

$$\frac{a_s}{a_v} = \frac{2 \cdot s \cdot bN}{s^2} = \frac{2 \cdot bN}{s} = \frac{2 \cdot h_c}{s} = \frac{2 \cdot h_c}{d_H} (\text{Kanal}) \quad (5)$$

bzw.

$$\frac{a_s}{a_v} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot d \cdot h_c}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{2 \cdot h_c}{d} (\text{Kreisrohr}), \quad (6)$$

wobei in die Gleichung für das Kreisrohr wie bei dem quadratischen Kanal die halbe Oberfläche entsprechend den realen Verhältnissen eingeführt wurde. Auch bei diesem aus Versuchen als maßgeblich erkannten Flächenverhältnis stimmen beide geometrische Formen überein,

sodaß man die Vereinfachung von der Krippengeometrie auf das poröse Rohr wohl durchführen kann.

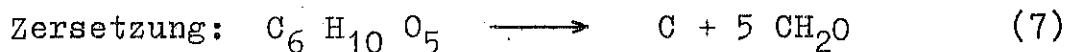
Eine weitere Vereinfachung besteht darin, anzunehmen, daß die Volumenverringerung der Krippe während der Verbrennung, über die in [3] berichtet wird, keinen wesentlichen Einfluß auf die Strömungsverhältnisse im Rohr ausübt, da zumindest im Bereich der Brandentwicklung in der Anfangsphase die Volumenänderung und die daraus resultierende Änderung der Abmessungen noch relativ klein ist. Die Erklärung dafür ist die, daß zunächst die Ausgasung von Zersetzungsprodukten und dann erst die Verbrennung des Holzkohlegerüsts mit merklichem Volumenverlust einsetzt. Im Bild 3 ist das Rohrmodell schematisch dargestellt. Es handelt sich dabei also um einen Hohlzylinder mit dem inneren Durchmesser $2 R$, der eine quasi unendliche Ausdehnung (" halb- unendlicher Körper ") in radialer Richtung und eine endliche Ausdehnung (Länge h_0 entsprechend der Krippenhöhe) in senkrechter Richtung aufweist. Gemäß den vorhin getroffenen Annahmen tritt das Oxydationsmittel mit der Geschwindigkeit v_{Luft} aus der Oberfläche in den Gasraum aus, wo es zusammen in einer exothermen Reaktion mit den Zersetzungsgasen im Gasraum reagiert. Der Boden des Zylinders ($z = 0$) ist dicht, an der Stelle $z = h_0$ treten die Reaktionsprodukte zusammen mit noch unverbranntem Brennstoff aus. Dort kann weitere Verbrennung mit aus der Umgebung herangeführtem Oxydationsmittel stattfinden.

3.2. Annahmen über die Reaktionen

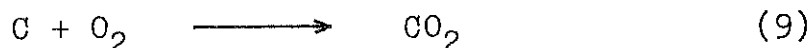
Goos (zitiert bei Welker [16]) hat allein bei der Pyrolyse von Holz 213 Bestandteile der Zersetzungs-

produkte angegeben, von denen mit Ausnahme weniger die meisten in irgendeiner Form an der Reaktion in der Gasphase beteiligt sind, sofern sie sich nicht bereits während der Diffusion aus dem Holz an die Feststoff- Gas- Grenzschicht zu anderen Produkten umsetzen. Die Anzahl der möglichen Reaktionen in der Gasphase dürfte in derselben Größenordnung liegen und ist für die hier durchzuführende Betrachtung damit völlig ungeeignet.

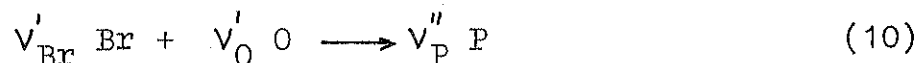
Die vermutlich einfachste Vorstellung über die Reaktion in zwei Schritten wurde in [13] angegeben:



Zusätzlich zu der Verbrennungsreaktion des Zersetzungsproduktes mit Luft könnte auch noch die globale Reaktionsgleichung für die Verbrennung des Holzkohlegerüstes mit angegeben werden:



Wenn man sich auf die Verbrennung in der Gasphase beschränkt, dann lautet die Gleichung allgemein nach Williams [19]:



d.h. es wird eine Reaktion zwischen den zwei Partnern Brennstoff und Luftsauerstoff angenommen,

die in einem Schritt zu den Reaktionsprodukten führt.

In der Reaktionskinetik wird allgemein die Beziehung verwendet, daß die Reaktionsgeschwindigkeit dem Produkt aus den Konzentrationen der Reaktionsteilnehmer proportional ist,

$$w = k \cdot \prod_{i=1}^N \cdot c_i^{V_i'} \quad , \quad (11)$$

wobei k , die spezifische Reaktionsgeschwindigkeitskonstante, hier nur von der Temperatur abhängig sein soll,

$$k = h \cdot \exp (- E / RT) . \quad (12)$$

Dies ist die bekannte exponentielle Abhängigkeit der spezifischen Reaktionsgeschwindigkeit nach Arrhenius, die auch als Arrhenius - Gleichung bezeichnet wird.

Damit wird die Reaktionsgeschwindigkeit

$$w = k (T) \cdot c_{\text{Br}}^{V'_{\text{Br}}} \cdot c_{\text{O}}^{V'_{\text{O}}} \quad (13)$$

und mit $V_i' = 1$ (wie in Gleichung 8)

$$w = k (T) \cdot c_{\text{Br}}^1 \cdot c_{\text{O}}^1 \quad . \quad (14)$$

Dies bezeichnet man als die Geschwindigkeit einer Reaktion 2. Ordnung [20]. Weitere Vereinfachungen des Modells werden im nächsten Abschnitt bei der mathematischen Beschreibung der Einzelvorgänge getroffen.

3.3. Mathematische Beschreibung des Rohrmodells

Das Verbrennungsmodell wird durch die Bilanzgleichungen für die Gasphase und für den Feststoff beschrieben. Die beiden Phasen werden durch die Rand- und die Anfangsbedingungen verknüpft. Zusätzlich zu den Vereinfachungen bei der Reaktion in der Gasphase werden nach Kung [21] folgende Annahmen gemacht:

- die Gase verhalten sich wie ideale Gase, d.h. es gilt das ideale Gasgesetz:

$$p \cdot V = RT \quad (15)$$

- der Druck ist konstant, die Ableitungen des Drucks nach Zeit und Raum sind 0; also

$$p = \text{Konst.}; \quad \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad \text{und} \quad (16)$$

$$\rho_{G\infty} \cdot T_{G\infty} = \rho_G \cdot T_G \quad (15a)$$

- Strahlungseinflüsse werden vernachlässigt,
- die Stoffgrößen sind nur temperaturabhängig;
- kein Einfluß der Viskosität auf die Energiebilanz, d.h. die Dissipation ist 0 und schließlich
- laminare Strömung,
- die einströmende Umgebungsluft ist nicht in thermischem Kontakt mit dem Holzkörper.

Damit lauten die Gleichungen für die Gasphase:

a) Kontinuitätsgleichung im instationären Fall:
Die Kontinuitätsgleichung besagt, daß eine Änderung des Massenstromes im Volumenelement in horizontaler (r-) Richtung und in vertikaler (z-) Richtung durch eine

zeitliche Dichteänderung im Volumenelement, z.B. hier durch chemische Reaktion, hervorgerufen wird. Sie lautet im zweidimensionalen Fall für Zylinderkoordinaten:

$$\frac{\partial \rho_G}{\partial t} + \frac{\partial \rho_G v_r}{\partial r} + \frac{\partial \rho_G v_z}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

b) Impulsbilanzen

Die Navier-Stokes-Gleichung für den Horizontalimpuls:

$$\frac{\partial \rho_G v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial \rho_G v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial \rho_G v_r}{\partial z} = \mu_G \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \quad (18)$$

Die Navier-Stokes-Gleichung für den Vertikalimpuls:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho_G v_z}{\partial t}}_I + \underbrace{v_r \frac{\partial \rho_G v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial \rho_G v_z}{\partial z}}_{II} = \underbrace{-(\rho_G - \rho_\infty)g}_{III} + \underbrace{\mu_G \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\mu_G}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r}}_{IV}, \text{ wobei} \quad (19)$$

I $\hat{=}$ substantielle Trägheitskraft

II $\hat{=}$ konvektive Trägheitskraft

III $\hat{=}$ Auftrieb (Schwerkraft)

IV $\hat{=}$ Reibungskraft

c) Energiebilanz:

$$\underbrace{\rho_G c_{pG} \frac{\partial T_G}{\partial t}}_I + \underbrace{\rho_G c_{pG} v_r \frac{\partial T_G}{\partial r} + \rho_G c_{pG} v_z \frac{\partial T_G}{\partial z}}_{II} =$$

$$\underbrace{\lambda_G \frac{\partial^2 T_G}{\partial r^2} + \frac{\lambda_G}{r} \frac{\partial T_G}{\partial r} + \lambda_G \frac{\partial^2 T_G}{\partial z^2}}_{III} + \underbrace{\dot{Q}_v}_{IV}, \text{ wobei} \quad (20)$$

- I $\hat{=}$ substantieller Energietransport
- II $\hat{=}$ Energietransport durch Konvektion
- III $\hat{=}$ Energietransport durch Leitung
- IV $\hat{=}$ Durch Verbrennung freigesetzte Energie

Aufgrund der im Abschnitt 3.2. getroffenen Annahmen über die Reaktion wird

$$\dot{Q}_v = \dot{Q}_{Br} \cdot \rho_G^2 \cdot c_{Br} \cdot c_O \cdot h_{RG} \cdot \exp(-E_{RG}/RT_G) \quad (21)$$

d) Stoffbilanzen für Brennstoff und Luft.
Brennstoff:

$$\underbrace{\rho_G \frac{\partial c_{Br}}{\partial t}}_I + \underbrace{\rho_G v_r \frac{\partial c_{Br}}{\partial r} + \rho_G v_z \frac{\partial c_{Br}}{\partial z}}_{II} = \quad (22)$$

$$\underbrace{\rho_G D \frac{\partial^2 c_{Br}}{\partial r^2} + \frac{\rho_G D}{r} \frac{\partial c_{Br}}{\partial r} + \rho_G D \frac{\partial^2 c_{Br}}{\partial z^2}}_{III} + \underbrace{w_{Br}}_{IV}, \text{ wobei}$$

- I $\hat{=}$ substantieller Stofftransport
- II $\hat{=}$ konvektiver Stofftransport
- III $\hat{=}$ Stofftransport durch Diffusion
- IV $\hat{=}$ Reaktion

mit

$$w_{Br} = - \rho_G^2 \cdot c_{Br} \cdot c_O \cdot h_{RG} \cdot \exp(-E_{RG}/RT_G) \quad (23)$$

Luft:

$$\rho_G \frac{\partial c_O}{\partial t} + \rho_G v_r \frac{\partial c_O}{\partial r} + \rho_G v_z \frac{\partial c_O}{\partial z} =$$

$$\rho_G D \frac{\partial^2 c_O}{\partial r^2} + \frac{\rho_G D}{r} \frac{\partial c_O}{\partial r} + \rho_G D \frac{\partial^2 c_O}{\partial z^2} + w_O \quad (24)$$

mit:

$$w = -n \rho_G^2 c_{Br} c_O h_{RG} \exp(-E_{RG}/R T_G). \quad (25)$$

Die Größen w_{Br} und w_O für den Verbrauch an Brennstoff bzw. Luft unterscheiden sich durch den Faktor n , der den Stickstoffanteil in der Luft berücksichtigt und außerdem das Brennstoff - Luftverhältnis für stöchiometrische Verbrennung beinhaltet. Falls man $v'_{Br} = v'_O = 1$ setzt (vergl. Gleichung 8), gibt n lediglich das erstgenannte Verhältnis zwischen Stickstoff und Sauerstoff in der Luft wieder, und wenn man die Bilanz für Sauerstoff statt für Luft aufstellt, wird $n = 1$.

Die Gleichungen (15) und (17) bis (25) geben vollständig den Wärme- und Stoffaustausch in der Gasphase wieder. Setzt man die Lewis-Zahl für die Gasphase

$$Le_G = \frac{a_G}{D} = \frac{\lambda_G}{\rho_G c_p G D} = 1, \quad (26)$$

was nach Günther [22] für Feuergase und damit auch für Brandgase zutrifft, dann sieht man, daß sich die Differentialgleichungen (20), (22) und (24) formal nur durch ihre Bildungsterme \dot{Q}_V bzw. w_i unterscheiden.

Da Druckkonstanz vorausgesetzt wurde, sind die Stoffgrößen λ , ρ , c_p und D nur Funktionen der Temperatur und der Zusammensetzung, also

$$\begin{aligned} \lambda_G &= f_1 (T, c_i) \\ \rho_G &= f_2 (T, c_i) \\ c_{pG} &= f_3 (T, c_i) \\ D &= f_4 (T, c_i) \end{aligned} \quad (27)$$

Die Energiebilanz für den Feststoff lautet:

$$\lambda_H \frac{\partial^2 T_H}{\partial r^2} + \frac{\lambda_H}{r} \frac{\partial T_H}{\partial r} + \lambda_H \frac{\partial^2 T_H}{\partial z^2} = \quad (28)$$

$$\underbrace{\frac{\partial \rho_H c_{p,H} T_H}{\partial t}}_I + \underbrace{Q_{pyr} \cdot \frac{\partial \rho_H}{\partial t}}_{II} - \underbrace{\frac{\partial \rho_H c_{p,pyr} T_H}{\partial t}}_{III}$$

Die linke Seite der Gleichung (28) beschreibt die Änderung des Energieinhaltes des Elements durch Wärmeleitung in radialer und vertikaler Richtung. Die rechte Seite der Gleichung (28) enthält die folgenden Terme:

- I Zeitliche Enthalpieänderung des Elementes
- II Zur Freisetzung von Pyrolysegasen notwendige Wärmezufuhr
- III Verlust an Wärme durch Konvektion der Pyrolysegasen an die Oberfläche

Hierbei wird zur Vereinfachung angenommen, daß keine Diffusion in senkrechter Richtung stattfindet.

Die Zersetzung hat eine örtliche und zeitliche Dichteabnahme im Element zur Folge, die durch einen Arrheniusausdruck beschrieben werden kann:

$$\frac{\delta \rho_H}{\delta t} = - (\rho_H - \rho_K) \cdot h_{\text{pyr}} \cdot \exp \left(- E_{\text{pyr}} / RT_H \right) \quad (29)$$

Damit kommt also die Zersetzungsreaktion zum Stillstand, sobald ρ_H den Wert von ρ_K , der Dichte des Restkohlegerüstes, angenommen hat. Die Beziehung zwischen der zeitlichen Dichteabnahme des Elementes und der Abbrandgeschwindigkeit lautet:

$$\frac{\delta \dot{m}''}{\delta r} = - \frac{\delta \rho_H}{\delta t} \quad (30)$$

Da zur Zeit noch keine Daten über die Wärmeleitfähigkeit λ_H und die spezifische Wärme $c_{p,H}$ von teilzersetztem Holz verfügbar sind, wird für λ_H und $c_{p,H}$ eine lineare Interpolation nach einem Vorschlag von Kung [21] verwendet:

$$\lambda_H = \frac{\rho_H - \rho_K}{\rho_0 - \rho_K} \lambda_0 + \frac{\rho_0 - \rho_H}{\rho_0 - \rho_K} \lambda_K \quad \text{für die Wärmeleitfähigkeit} \quad (31)$$

und

$$c_{p,H} = \frac{\rho_H - \rho_K}{\rho_0 - \rho_K} c_{p,H0} + \frac{\rho_0 - \rho_H}{\rho_0 - \rho_K} c_{p,K} \quad (32)$$

für die spezifische Wärme .

Die qualitative Darstellung der linearen Abhängigkeit der Stoffwerte λ_H und $c_{p,H}$ von der aktuellen Holzdichte ρ_H ist in Bild 4 wiedergegeben.

Wie oben angegeben, werden die Gasbilanzen mit der Feststoffbilanz über die Anfangs- und die Randbedingungen miteinander gekoppelt.

Die Randbedingungen lauten unter Vernachlässigung des Austausches parallel zur Wand:

An der Stelle $r = R$:

Energiebilanz:

$$\lambda_G \left. \frac{\partial T_G}{\partial r} \right|_R = \lambda_H \left. \frac{\partial T_H}{\partial r} \right|_R \quad (20)$$

Brennstoffbilanz:

$$\rho_G v_r c_{Br} \left|_R - \rho_G D \left. \frac{\partial c_{Br}}{\partial r} \right|_R = \dot{m}'' \quad (21)$$

Sauerstoffbilanz:

$$\rho_G v_r c_O \left|_R = G^D \left. \frac{\partial c_O}{\partial r} \right|_R \quad (22)$$

$$T_H = T_G \quad (23)$$

An der Stelle $z = 0$:

$$v_z = 0 \quad v_r = 0 \quad (24)$$

Die Randbedingung (20) wird als eine Randbedingung 2. Art bezeichnet [21]. Bevor die Anfangsbedingungen formuliert werden können, müssen einige Annahmen über den Zündmechanismus getroffen, sowie eine Definition für die Zündquelle gefunden werden. Unter Berücksichtigung der Daten für die Abbrandgeschwindigkeit, die bei der Verwendung heißer Rauchgase als Zündquelle bei den an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Arbeiten [2, 3] ermittelt wurden, scheint es sinnvoll zu sein, für die begrenzte Zeit vom Zeitpunkt $t = 0$ bis zum Zündzeitpunkt, der bei einer Oberflächentemperatur von 545°C (nach Kung [21]) festgesetzt wird, einen durch Konvektion Wärme übertragenden Strom von heißer Luft mit einer Temperatur von 800°C vorzugeben.

Damit lauten die Anfangsbedingungen:

$$\begin{aligned} t &\cong t_z; \\ T_{\text{Gas}} &= 800 \text{ }^\circ\text{C}; c_{\text{Br}} = 0; c_0 = c_{0,\infty} \\ t &\cong t_z; r = R; z = 0: \\ T_{\text{H}} &= 545 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (25)$$

Es könnte hier allerdings genausogut eine andere Zündquelle, z.B. eine Wärmestrahlungsquelle, eingeführt werden. Dadurch würden sich jedoch auch die Randbedingungen für $t = t_z$ ändern. Die Lösung des Gleichungssystems ist in geschlossener Form nicht möglich. Aus diesem Grunde wird man auf numerische Lösungen mit Hilfe eines Digitalrechners angewiesen sein, die zu finden eine der Aufgaben des anschließenden Forschungsauftrages sein wird.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Auf der Grundlage der Erkenntnisse, die in eigenen Arbeiten und in Arbeiten anderer Autoren über die Holzverbrennung, beginnend mit der Holzzersetzung bei niedrigen Temperaturen, über die Zündung der Zersetzungsgase, bis zur stationären Abbrandphase gewonnen wurden, wurde ein Rechenmodell entwickelt.

Dieses Rechenmodell abstrahiert die in einer Holzkrippe ablaufenden Vorgänge auf die innere Oberfläche eines Hohlzylinders. Die das Problem bestimmenden Differentialgleichungen mit den angepassten Rand- und Anfangsbedingungen geben den Fall wieder, daß ein solcher Hohlzylinder von einer Wärmequelle mit konstanten Eigenschaften von innen aufgeheizt wird und Zersetzungsgase in ausreichender Menge abgibt, die gezündet werden.

Aus dem Wechselspiel zwischen Wärmetransport in den Feststoff aufgrund der Verbrennung innerhalb des Zylinders und Nachlieferung von brennbaren Gasen aus der Wand des Zylinders an die Flamme entwickelt sich die Verbrennung bis zu einem stationären Stadium.

Die Ermittlung der mathematischen Lösung des hier vorgestellten Gleichungssystems wird im Rahmen des anschließenden Forschungsauftrages durchgeführt werden.

5. FORMELZEICHEN

a	Temperaturleitzahl
a_s	Oberfläche eines einzelnen Kanals ($= 4 sh_c$)
a_v	Querschnittsfläche eines einzelnen Kanals ($= s^2$)
b	Stabdicke
c	Konzentration
c_p	spezifische Wärme bei konstantem Druck
d	Durchmesser
d_H	hydraulischer Durchmesser
D	Diffusionszahl
E	Aktivierungsenergie
F	Querschnittsfläche
g	Erdbeschleunigung
h	Häufigkeitsfaktor
h_c	Krippenhöhe
k	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
Le	Lewiszahl = $\frac{a}{D}$
\dot{m}	Massenstromdichte der Zersetzungsgase
$\dot{m}''(50)$	Stoffumsetzungsgeschwindigkeit bei stationärem Abbrand
N	Anzahl der Lagen einer Holzkrippe
Q	Heizwert
Q_{pyr}	Für die Zersetzung aufzubringende Wärme
\dot{Q}_v	Durch Verbrennung freigesetzter Wärmestrom
R	Universelle Gaskonstante; Radius
r	Ortskoordinate radial
s	Stababstand
T	Temperatur
t	Zeit
U	Umfang
V	Volumen
v_r	Radialkomponente des Geschwindigkeitsvektors
v_z	Vertikalkomponente des Geschwindigkeitsvektors
w	Reaktionsgeschwindigkeit
z	Ortskoordinate vertikal

λ	Wärmeleitfähigkeit
μ	dynamische Viskosität
ν'	Stöchiometriekoeffizient vor der Reaktion
ν''	Stöchiometriekoeffizient nach der Reaktion
ρ	Dichte
ρ_{∞}	Dichte der Umgebungsluft

Indices

Br	Brennstoff
G	Gas
H	Holz
i	laufende Numerierung
k	Kohle, Restkohlegerüst
Pyr	Pyrolyse
P	Reaktionsprodukte
RG	Reaktion Gasphase
O	Oxydationsmittel; Anfangsbedingungen
Z	Zündung
∞	Umgebung

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Heskestad, G.: Physical modeling of fire.
J. Fire and Flammability
6 (1975), S. 253 - 273
- [2] Brein, D. Modellbrandversuche zur
Schatz, H.: Bestimmung des Brandab-
laufs von Feststoffbränden.
Forschungsbericht Nr. 27
der Arbeitsgemeinschaft
Feuerschutz (AGF) (1975)
- [3] Brein, D.: Modellbrandversuche zur
Bestimmung des Brandab-
laufs von Feststoffbränden.
Forschungsbericht Nr. 30
der Arbeitsgemeinschaft
Feuerschutz (AGF) (1976)
- [4] Fons, W.L. Scale effects on propagation
Clements, H.B. rate of laboratory crib fires.
George, P.M.: 9. Symposium (International)
of Combustion
New York: Academic Press
(1963), S. 860 - 866
- [5] Thomas, P.H. Fire spread in wooden cribs.
Simms, D.L. Fire Research Note No. 599,
Wraight, H.G.H.: Borehamwood: Fire Research
Station (1965)
- [6] 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

- [7] Smith, P.G.
Thomas, P.H.: The rate of burning of cribs of wood.
Fire Research Note No. 728,
Borehamwood: Fire Research
Station (1968)
- [8] Delichatios, M.A.: Fire growth rates in wood
cribs.
Combustion and Flame 27
(1976), S. 267 - 278
- [9,10] Block, J.A.: A theoretical and experimental
study of nonpropagating free-
burning fires.
Cambridge, Harvard Univ.,
Diss. (1970), und 13. Symposi-
um (International) on
Combustion, S. 971 - 978
Pittsburgh: The Combustion
Institute (1971)
- [11] Thomas, P.H.: On the rate of burning of
cribs.
Fire Research Note No. 965,
Borehamwood: Fire Research
Station (1973)
- [12] Thomas, P.H.
Nilsson, L.: Fully developed compartment
fires: new correlations of
burning rates.
Fire Research Note No. 979,
Borehamwood: Fire Research
Station (1973)
- [13] Yamashika, S.:
Kurimoto, H.: Burning rate of wood crib.
Report of Fire Research
Institute of Japan (1976)
Nr. 41, S. 8 - 15

- [14] Thomas, P.H.: Behavior of fires in enclosures—some recent progress. 14. Symposium (International) on Combustion, S. 1007 - 1020
Pittsburgh: The Combustion Institute (1973)
- [15] Friedman, R.: Ignition and burning of solids.
Fire Standards and Safety. ASTM STP 614 (1977)
S. 91 - 111
- [16] Merzhanov, A.G.
Averson, A.E.: The present state of the thermal ignition theory: an invited review.
Combustion and Flame 16 (1971), S. 89 - 124
- [17] Welker, J.R.: The pyrolysis and ignition of cellulose materials: a literature review.
J. Fire Flammability 1 (Jan. 1970), S. 12 - 29
- [18] Schlichting, H.: Grenzsicht - Theorie, 5. Auflage Karlsruhe: Verlag G. Braun (1965)
- [19] Williams, F.A.: Combustion Theory.
Reading, Palo Alto, London: Addison - Wesley Publishing Company, Inc. (1965)

7. B I L D E R

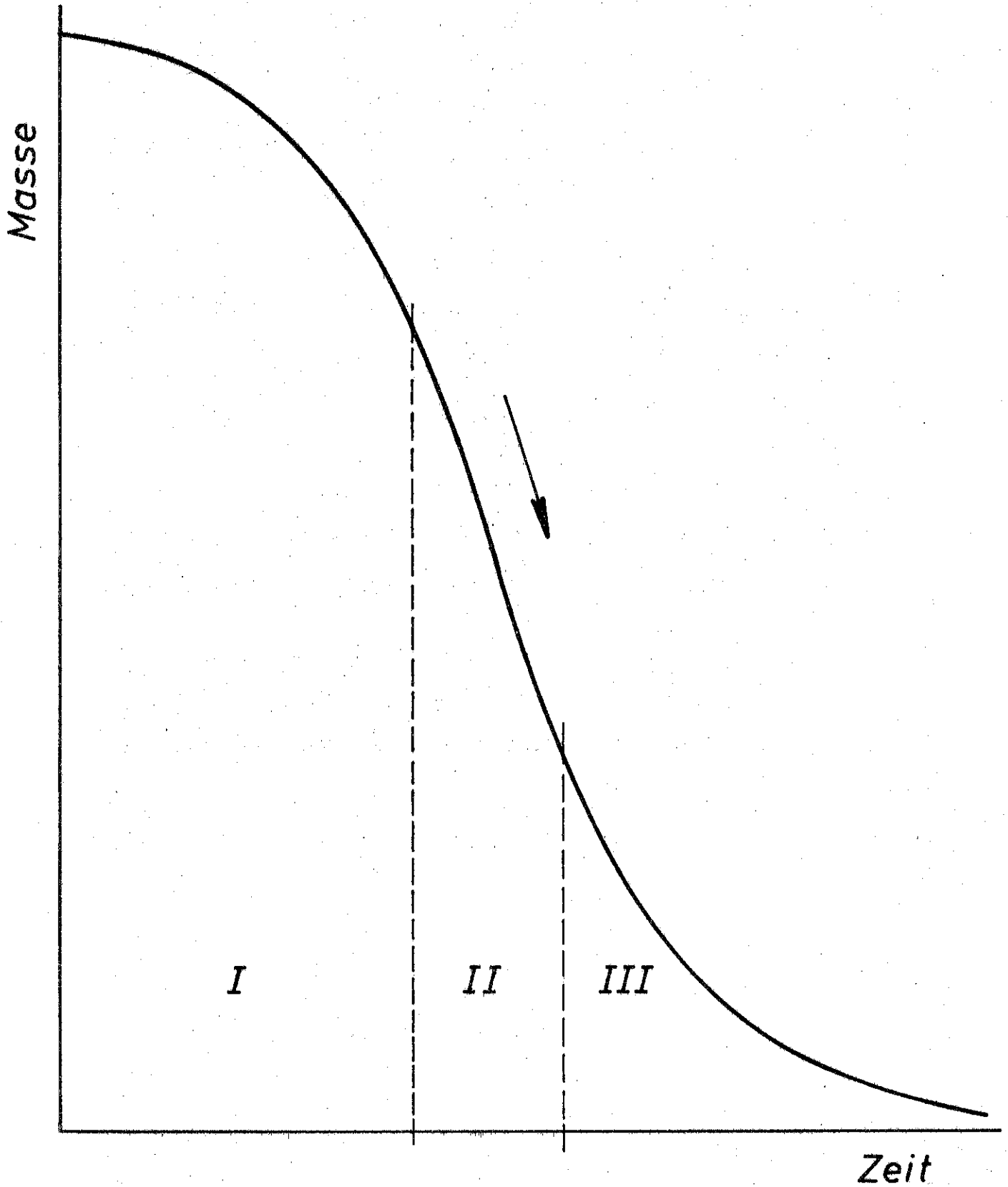


Bild 1. Zeitlicher Massenverlust bei einer Holzkrippe
Bereich I Brandentwicklungsphase
Bereich II Stationärer Abbrand
Bereich III Abklingphase

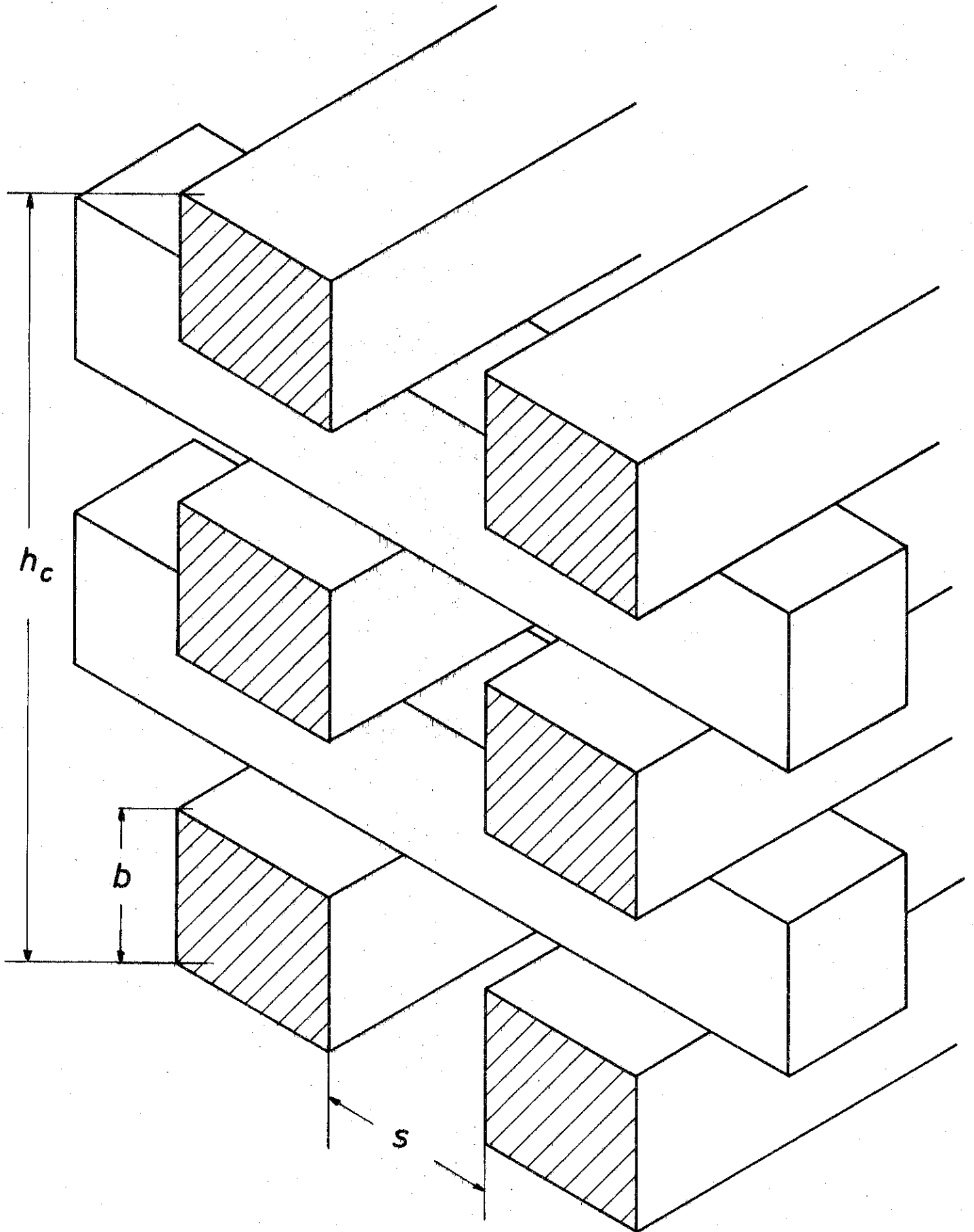


Bild 2. Ansicht eines Kanals einer Krippe

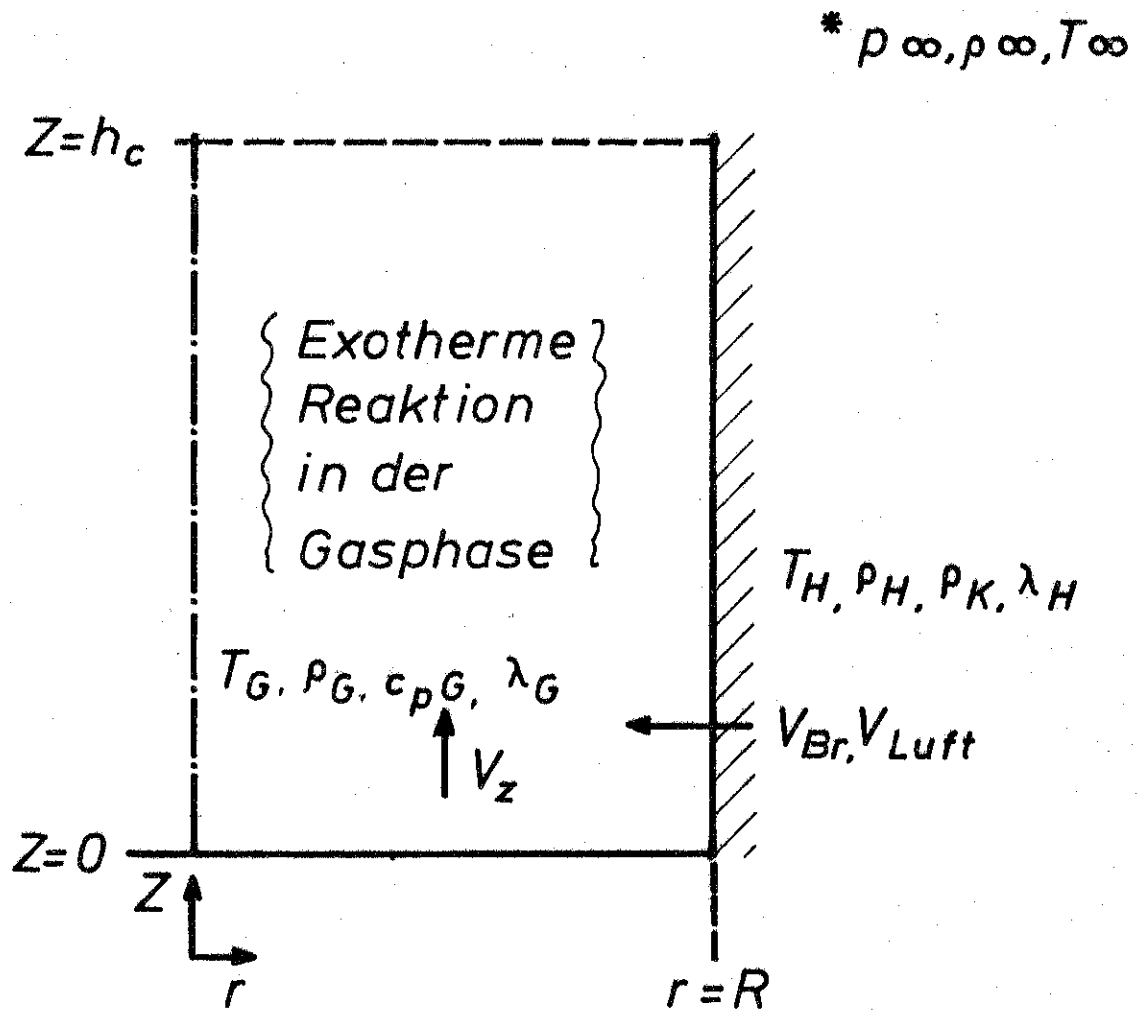


Bild 3. Schematische Darstellung des Rohrmodells

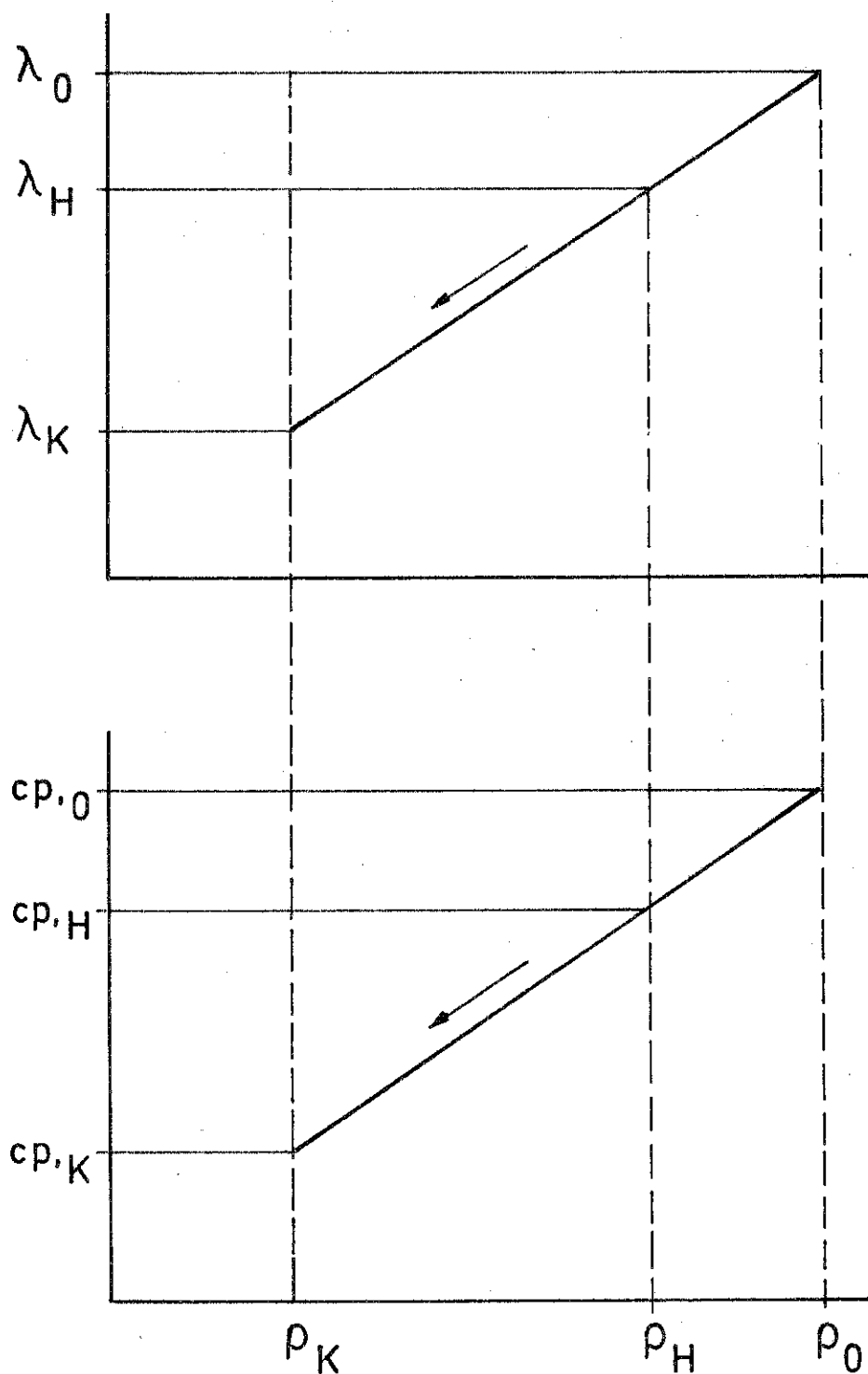


Bild 4. Schematische Darstellung der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärme von teilzersetztem Holz als Funktion der Holzdicke