

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Untersuchung der Löschwirkung verschiedener
Löschmittel und Löschmethoden bei
unterschiedlichen Brandgütern.

36

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

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

Forschungsbericht Nr. 36

Untersuchung der Löschwirkung verschiedener
Löschmittel und Löschmethoden bei unter-
schiedlichen Brandgütern.

von

Dipl.-Ing. Peter Fuchs

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Januar 1979

FA.Nr. 76 (2/77)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung und Zielsetzung	1
2. Theoretische Beschreibung des Löschvorganges	2
2.1 Diskussion des mathematischen Modells	9
3. Untersuchung des Einflusses der Holzzersetzung auf die Temperaturleitzahl	11
3.1 Versuchsbeschreibung	11
3.2 Versuchsauswertung	12
4. Vergleich der Modellrechnung mit Meßergebnissen aus Löschversuchen bei Zimmerbränden in natürlichem Maßstab	18
5. Zusammenfassung	20
6. Formelzeichen	22
7. Literaturverzeichnis	23
8. Bilder	26

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Das Löschen eines Brandes kann auf verschiedene Weise erfolgen, wobei im wesentlichen folgende Mechanismen einzeln oder gemeinsam zum Löscherfolg führen:

Abkühlen des Brandstoffes unter die Entzündungs-
temperatur,
Verdünnung des Brandstoffes durch Inertstoffe,
Trennung des Oxydationsmittels (Luftsauerstoff)
vom Brandstoff und
Inhibition der Verbrennungsreaktion.

Die Klärung der physikalischen Vorgänge beim Löschen wurde erst in jüngster Zeit zusammen mit der Entwicklung neuer gasförmiger und pulverförmiger Löschmittel versucht. Obwohl Wasser aufgrund seiner speziellen physikalischen und chemischen Eigenschaften das weitverbreitetste Löschmittel ist und diese Stellung auch in Zukunft behalten wird, sind bislang über den Wirkungsmechanismus des Löschens mit Wasser keine exakten Aussagen möglich. Es liegen einige Untersuchungen zu diesem Thema vor, die aufgrund empirischer Ergebnisse die Löschwirkung des Wassers mehr oder weniger einhellig den speziellen thermischen Eigenschaften zuschreiben. Die Löschwirkung von Wasser beruht danach in erster Linie auf dem Kühleffekt, hervorgerufen durch die große Verdampfungsenthalpie, während die Verdrängung des Luftsauerstoffes oder die Inhibition der Verbrennungsreaktion keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Eine Klärung dieser Vorgänge beim Löschen ist für den Anwender - also für den Feuerwehrmann - von besonderem Interesse, da die Zielsetzung bei der Brandbekämpfung nicht nur darin besteht, das Feuer zu löschen, sondern den Löscherfolg mit möglichst wenig Wasser zu erreichen, um Wasserschäden zu vermeiden. Eine genaue Kenntnis der physikalischen Vorgänge beim Löschen kann helfen, die Lösung dieser Aufgabe zu erleichtern. Zu diesem Zweck wird in der hier vorliegenden Arbeit ein mathematisches Modell benutzt, das in vereinfachter Form die thermischen

Prozesse beim Löschvorgang berücksichtigt. Erste Versuchsergebnisse werden mit der Modellrechnung verglichen, um zu erkennen, inwieweit Änderungen sowohl am mathematischen Modell als auch an den experimentellen Untersuchungen nötig sind.

2. Theoretische Beschreibung des Löschvorganges

In einigen Arbeiten [1-9] wurde mit experimentellen Untersuchungen versucht, die wichtigsten Einflußgrößen, die die Vorgänge beim Löschen eines Brandes bestimmen, zu beschreiben.

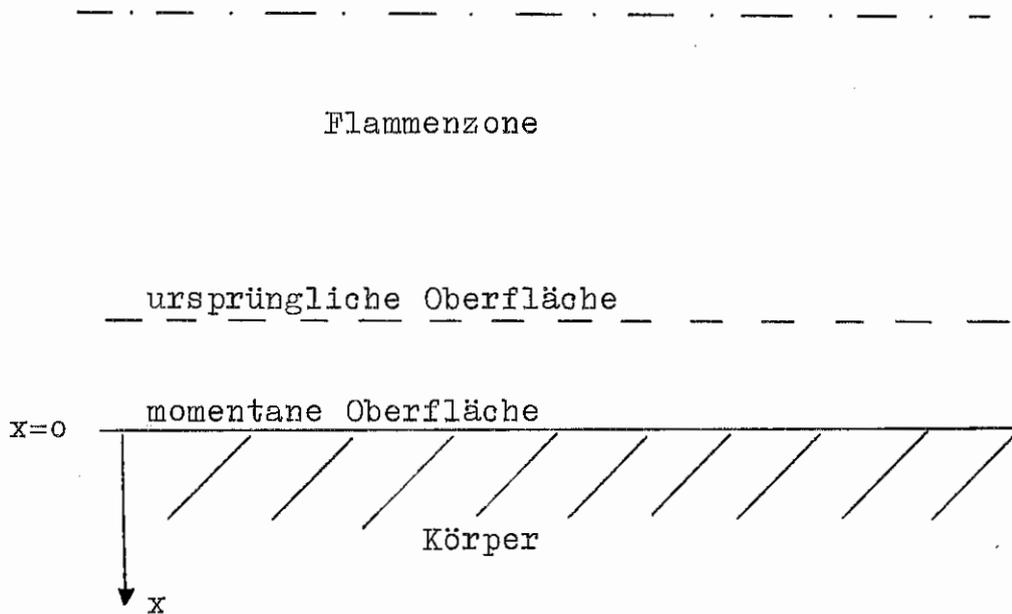
So wurde z.B. der Zusammenhang zwischen Wasseraufgaberate \dot{m}_w und Massenverlust des Brandgutes während des Löschvorganges untersucht [2, 5, 6, 9]. Tamanini [2,5] fand bei seinen Experimenten folgende kritische Werte für die Wasseraufgaberate \dot{m}_w .

Bei einer Wasseraufgaberate \dot{m}_w weniger als 0,19 - 0,24 mg/cm² s, konnte der Brand nicht gelöscht werden; es blieb auch keine Restmasse erhalten. Bei einer Steigerung der Wasseraufgaberate \dot{m}_w über 0,8 - 1,0 mg/cm² s war keine Verbesserung der Löschwirkung mehr zu erkennen.

Die angeführten Arbeiten stellen ihre experimentell gefundenen Ergebnisse in empirischen Formeln dar, die die wichtigsten Einflußgrößen berücksichtigen. Alle Autoren stimmen darin überein, daß die Löschwirkung von Wasser hauptsächlich darauf beruht, daß das Wasser das Brandgut während des Löschens unter die Zündtemperatur abkühlt. Aufgrund dieser Erkenntnis liegt es nahe der theoretischen Beschreibung des Löschvorganges ein mathematisches Modell zugrunde zu legen, das die thermischen Vorgänge beim Löschen beschreibt. Ein solches Modell wurde bereits von Lode und Detmar [10] entwickelt und soll hier in modifizierter Form dargestellt werden.

Es wird dabei von der Berechnung des eindimensionalen Temperaturfeldes in einem isotropen Körper in Form einer unendlich ausgedehnten, planparallelen und hinreichend

dicken Platte ausgegangen, die an einer Oberfläche brennt, wie in der Skizze angedeutet. Während der Verbrennung wird Substanz des Körpers an dieser einen Oberfläche pyrolytisch zersetzt, sie gasförmig ausströmt und verbrennt in Form einer Flamme über dem Körper. Durch diesen Prozess, ändert sich die Lage der Oberfläche des Körpers im Raum. Sie bewegt sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit v zur Körpermitte hin. Es wird angenommen, daß eine Wärmeproduktion im Körper nicht auftritt.



Skizze: Modellvorstellung des Brandgeschehens

Die Fourier'sche Differentialgleichung für die Wärmeleitung

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) + \frac{1}{c_p \rho} f(x, y, z, t) \quad (1)$$

vereinfacht sich durch die o.g. Annahmen zu

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (2)$$

mit folgenden Grenzbedingungen:

1. der Brand ist stationär, d.h. der zeitliche Massenverlust ist konstant.
2. damit sind auch die Temperatur an der Oberfläche und die Flammentemperatur konstant
3. die Temperatur zur Zeit $t < t_1$ ist eine Funktion der Tiefe x im Körper und relativ zur Oberfläche zeitunabhängig.

Eine analytische Lösung der Differentialgleichung (2) ist möglich, wenn man wie in der Skizze dargestellt die Lage der Oberfläche des Körpers stets als im Raum fixiert betrachtet und von dieser Lage aus x in Richtung Körpermitte positiv zählt [10, 11]:

$$T(x,t) = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty}) e^{-v x \frac{\rho c_p}{\lambda}} \quad (3)$$

Mit Gleichung (3) kann der Temperaturverlauf im Körper bis zum Löschbeginn zur Zeit $t=t_1$ berechnet werden. Die freigesetzte Energie

$$\dot{Q}_1 = \dot{m} H_u - \dot{Q}_K \quad (4)$$

wird von der über dem Körper stehenden Flamme an die Umgebung gestrahlt. Gleichzeitig wird von der Flamme der Wärmestrom \dot{Q}_K an den Körper übertragen. Der Abbrand der Oberfläche ist nicht direkt abhängig vom zeitlichen Massenverlust \dot{m} des Körpers während der Verbrennung, weil sich die Dichte ρ des Körpers in den zersetzten Schichten während der Zersetzung des Holzes zu Holzkohle ändert [13]. Da die Dichte in den sich zersetzenden Schichten kleiner wird, ist der Abbrand der Oberfläche tatsächlich geringer, als die theoretisch aus dem Massenverlust berechnete. Unter den vorausgesetzten Bedingungen herrscht im Körper bis zum Zeitpunkt des Löschens ein Temperaturfeld, dessen Beschreibung durch Gleichung (3) möglich ist. Während des Löschprozesses, der zur Zeit $t = t_1$ einsetzt, muß der Körper soweit abgekühlt werden, daß an der Oberfläche die Entzündungstemperatur unterschritten wird. Dazu muß dem Körper die Wärmemenge Q_2 entzogen werden. Gleichzeitig muß die freigesetzte Energie Q_1 abgeführt werden.

Eine Lösung der Gleichung (2) ist nach [10] durch folgende Gleichung gegeben:

$$T(x, t) = T_{\infty} + \frac{T_0 - T_{\infty}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-vx \frac{c_p \rho}{\lambda}} \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-u}^{+u} e^{-\frac{w^2}{2}} dw \right) \cdot \sqrt{2\pi} \cdot e^{-\frac{w^2}{2}} \right] \quad (5)$$

mit

$$w = \sqrt{2 \frac{t}{a}} \cdot v \quad (6)$$

$$u = w - \frac{x}{w a} \quad (7)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (8)$$

Setzt man den Zeitpunkt des Löschbeginns $t_1 = 0$, so geht diese Gleichung für $t \rightarrow 0$ in Gleichung (3) für die stationäre Temperaturverteilung über.

Dem Körper wird während des Löschens die Wärmemenge Q_2 entzogen, sodaß die Oberflächentemperatur sinkt.

Die Berechnung der Oberflächentemperatur erfolgt nach Gleichung (5). Setzt man $x = 0$, so erhält man

$$T(0, t) = T_{\infty} + \frac{T_0 - T_{\infty}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \quad (9)$$

$$\left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-u}^{+u} e^{-\frac{w^2}{2}} dw \right) \cdot \sqrt{2\pi} \cdot e^{-\frac{w^2}{2}} \right]$$

$$u = w \quad \text{für } x = 0 \quad (10)$$

Der abzuführende Wärmestrom \dot{Q}_2 errechnet sich aus

$$\frac{d Q_2}{d t} = A \lambda \frac{\delta T}{\delta x} \Big|_{x_1 = 0} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_2 = A \frac{v \cdot c_p \cdot \rho}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{T_0 - T_\infty}{2} \cdot \left[\frac{-1 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-u}^{+u} e^{-\frac{w^2}{2}} dw}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{w^2}{2}}} + \frac{2}{w} \right] \quad (12)$$

Bei der hier angegebenen Lösung zur Berechnung der Temperaturverteilung nach Gleichung (9) springt die Oberflächentemperatur zur Zeit $t = 0$ schlagartig auf $(T_0 + T_\infty) / 2$ ab.

Sobald die Temperatur an der Oberfläche unter die Entzündungstemperatur T_z gesunken ist, ist der Verbrennungsvorgang beendet und die Flamme erlischt. Es wird angenommen, daß die Wärmeproduktion durch die Verbrennung in dieser Zeit linear auf 0 zurückgeht. Diese Annahme wird durch verschiedene Untersuchungen [2, 4, 6] bestätigt. In dieser Phase muß die entstehende Wärme Q_1 durch das Löschwasser abgeführt werden. Für diesen Prozess wird hier vereinfacht angenommen, daß das Löschwasser die Wärmemenge durch Verdampfen aufnimmt.

In Wirklichkeit ist die Wärmeübertragung von der Flamme auf die Wassertropfen wesentlich komplizierter. Eine ausführlichere Beschreibung dieser Wärmeübertragung wurde z.B. in [12] unternommen. Dabei werden im wesentlichen die Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeit und damit die Eindringtiefe der Tropfen in die Flamme als Parameter zur Berechnung der Wärmeübertragung herangezogen.

Im vorliegenden Fall wird der Mechanismus der Wärmeübertragung an das Löschwasser außer acht gelassen, es wird lediglich angenommen, daß das Löschwasser die durch die Verbrennung erzeugte Wärmemenge Q_1 sowie die zur

Abkühlung des Körpers notwendige Wärmemenge Q_2 in der Zeitspanne $t = t_1$ bis $t = t_e$, dem Ende des Löschvorganges, abführt. In dieser Zeitspanne stellt sich ein Wärmefluß im Körper in umgekehrter Richtung ein, also von innen nach außen. In der Zeit nach dem Erlöschen der Flamme muß dem Körper noch soviel Wärme entzogen werden, daß die Oberflächentemperatur aufgrund des Wärmeflusses von innen nach außen die Entzündungstemperatur nicht übersteigt. Um eine Berechnung der Löschwassermenge zu ermöglichen, wird der während des Löschens von der Flamme an den Körper übertragene Wärmestrom vernachlässigt und der Wärmestrom im Körper nur in Richtung der betrachteten Oberfläche zugelassen. Dieser Wärmestrom \dot{Q}_2 läßt sich mit Gleichung (12) berechnen. Setzt man zu Beginn des Löschvorganges $t_1 = 0$, so wird im Bereich sehr kleiner Zeiten $t \rightarrow 0$ nach Gleichung (12) der Wärmestrom unendlich groß, sodaß zur praktischen Berechnung eine Näherungslösung eingeführt werden muß. Lode und Dettmar [10] nehmen für den Zeitbereich $t = 0$ min bis $t = 0,1$ min eine Näherung zur Berechnung der Löschwassermenge an. Diese Näherung wird hier nicht verwendet, da bereits 0,3 s nach Löschbeginn der an der Oberfläche des Körpers entzogene Wärmestrom annähernd so groß ist wie der entstehende Reaktionswärmestrom. Linearisiert man den Bereich $t = 0$ bis $t = 0,3$ s, so ist der Fehler bei der Berechnung der Gesamtwärmemenge vernachlässigbar klein.

In der Modellvorstellung wird angenommen, daß diese Wärmemenge unmittelbar vom Löschwasser aufgenommen wird, dieses sich sofort erwärmt und nach Verdampfen die Wärme abführt.

Da 1 kg Wasser bei der Erwärmung von 20 °C auf 100 °C und Verdampfung bei einem Druck von 1 bar eine Wärmemenge von 2592 k/J aufnimmt, berechnet sich die Lösch-

wassermenge zu

$$m_{w_1} = \frac{1}{2592} \int_{t=0}^{t=t_z} (\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2) dt \quad (13)$$

$$m_{w_2} = \frac{1}{2592} \int_{t=t_z}^{t=t_e} \dot{Q}_2 dt \quad (14)$$

$$m_w = m_{w_1} + m_{w_2} \quad (15)$$

Im ersten Abschnitt der Löschphase wird die Wassermenge m_{w_1} verdampft, die durch Wärmeentzug sowohl den Körper abkühlt (Q_2), als auch die freiwerdende Reaktionswärme entzieht (Q_1). In der zweiten Phase wird die Wassermenge m_{w_2} verdampft, um die Oberfläche des Körpers unter die Entzündungstemperatur abzukühlen.

2.1 Diskussion des mathematischen Modells

Das hier dargestellte mathematische Modell beschreibt in vereinfachter Form die thermischen Vorgänge beim Löschen mit Wasser. Die wichtigsten Vereinfachungen betreffen den Verbrennungsprozess vor und während des Löschvorganges, den Wärmeübergang sowie die Behandlung der Stoffgrößen des Brandgutes. Für die folgenden experimentellen Untersuchungen wird als Brandgut Holz gewählt, obwohl es wegen seines komplexen chemischen Aufbaus theoretischen Betrachtungen nur schwer zugänglich ist. Holz ist jedoch der am häufigsten verwendete Brand-

stoff in der Brandschutzforschung, sodaß es auch hier Gegenstand der Betrachtungen sein soll. Der Temperaturverlauf ist vor Löschbeginn nach Gleichung (3) von der Oberflächentemperatur, der Temperaturleitzahl a und der Abbrandgeschwindigkeit v der Oberfläche abhängig.

In Bild 1 ist die örtliche Temperaturverteilung im Holz nach Gleichung (3) für verschiedene Oberflächentemperaturen von $T_0 = 500$ °C bis $T_0 = 1\ 000$ °C dargestellt. Die Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur nimmt mit der Tiefe x im Körper ab.

Im Bild 2 ist die örtliche Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Abbrandgeschwindigkeit v der Oberfläche dargestellt. v variiert zwischen $0,02$ cm/min und $0,2$ cm/min. Mit $v \rightarrow 0$ nähert sich die Temperaturverteilung einer linearen Form. Die Parameter Oberflächentemperatur und Abbrandgeschwindigkeit der Oberfläche sind für das mathematische Modell nicht von solch ausschlaggebender Bedeutung, wie der Einfluß der Stoffgrößen, Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität. Diese Größen ändern sich im Verlaufe des Verbrennungsvorganges entsprechend dem Zersetzungsfortschritts von Holz zu Holzkohle.

Die Temperaturleitzahl a nimmt von ca. $3 \cdot 10^{-4}$ cm²/s für Holz auf ca. $90 \cdot 10^{-4}$ cm²/s für Holzkohle zu [2, 5, 6, 11].

Bild 3 zeigt den Temperaturverlauf im Holz für verschiedene Temperaturleitzahlen. Man sieht, daß mit der Zersetzung die Temperatur in der zersetzten Schicht wegen der höheren Temperaturleitzahl steigt.

Die Kenntnis der Stoffgrößen λ , ρ und c_p ist also eine Voraussetzung für die Berechnung der Temperaturverteilung nach Gleichung (1) bzw. Gleichung (3). Auch zur Berechnung der Wärmeabgabe während des Löschvorganges ist die Kenntnis der einzelnen Stoffwerte unerlässlich.

Zur Untersuchung dieser Stoffgrößen bzw. deren Veränderung unter Temperatureinwirkung wurden Brandversuche durchgeführt, die im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

3. UNTERSUCHUNGEN DES EINFLUSSES DER HOLZZERSETZUNG AUF DIE TEMPERATURLEITZAHL.

Ziel der Versuche war es, die Temperaturleitzahl a , sowie die Geschwindigkeit des Abbrandes der Oberfläche an Holzstäben zu messen, die durch eine äußere Wärmequelle lokal derart erwärmt wurden, daß sich die Holzsubstanz zersetzte.

3.1 Versuchsbeschreibung

An einem Kiefernholzstab mit einem Querschnitt von 20 mm x 20 mm und einer Länge von 420 mm wurden wie Bild 4 zeigt an der Oberfläche sowie in drei verschiedenen Tiefen mit gleichem Abstand Δx voneinander die Temperaturmeßstellen T 1 bis T 4 angebracht.

Die Dicke Δx der Schichten zwischen den Temperaturmeßstellen T 1 bis T 4 betrug jeweils 2 mm bzw. 4 mm.

Die Holzstäbe waren bei Raumtemperatur gelagert und hatten eine relative Feuchte von 11 % - 14 %.

Es wurden Mantelthermoelemente aus Chromel/Alumel mit einem Außendurchmesser von 0,5 mm verwendet. Das Thermoelement an der Stelle T 5 war federnd gegen die Oberfläche des Stabes gedrückt, sodaß es den Veränderungen der Staboberfläche folgen konnte. Eine Strahlungsquelle strahlte mit einer Intensität von ca. 8 W/cm² in ca. 15 cm Abstand parallel zur Staboberfläche.

Mit Hilfe einer rechnergesteuerten Meßdatenerfassungsanlage wurden die Meßwerte registriert und digital gespeichert. Auf diese Weise war es möglich, eine große Anzahl von Meßdaten auszuwerten und miteinander zu korrelieren.

3.2 Versuchsauswertung

Bild 5 zeigt die typischen Temperaturverläufe bei einem Versuch mit einer Schichtdicke von 4 mm an den Meßstellen T_1 bis T_5 . Sobald die Wärmequelle eingeschaltet wurde, stieg die Temperatur an den Stellen T_5 an der Staboberfläche und T_1 in der Staboberfläche ($x = 0$) rasch an. Die Temperaturen an den Stellen T_2 , T_3 und T_4 im Stabinnern stiegen ebenfalls an, blieben jedoch eine gewisse Zeitspanne bei ca. 100°C konstant, was auf verdampfendes Wasser im Holzinne zurückzuführen ist. Ab einer Zeit von ca. 15 min war die Oberflächentemperatur an der Stelle T_5 konstant. Die Temperatur an der Meßstelle T_1 fiel ab diesem Zeitpunkt leicht ab, da das Thermoelement aufgrund der Querschnittsänderung des Stabes aus der Oberfläche in die Umgebung ragte. Die Temperaturen im Stabinnern stiegen weiter an, wobei die Temperatur an der Stelle T_2 wegen des Abbrandes der Oberfläche dabei etwa die Temperatur an der Oberfläche annahm.

Bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse ist zu beachten, daß an der Staboberfläche keine selbstständige Verbrennung auftrat. Die Holzoberfläche glühte solange die Wärmequelle einwirkte, nach Entfernen der Wärmequelle fand jedoch keine Verbrennungsreaktion statt, wie in Voruntersuchungen ermittelt wurde. Bei den hier besprochenen Versuchen wurde die Wärmequelle erst unmittelbar vor dem Abkühlen der Oberfläche mit Wasser entfernt. Diese Abkühlung ist an der ausgeprägten Temperaturabsenkung zur Zeit $t = t_1$ zu erkennen. Die Abbrandgeschwindigkeit v der Oberfläche wurde bei diesen Versuchen dadurch bestimmt, daß die Abbrandtiefe x_a von der ursprünglichen Oberfläche gemessen, nach dem Abkühlen des Stabes mit Wasser ermittelt wurde. Die Abbrandgeschwindigkeit v der Oberfläche wurde ermittelt aus dem Quotient der Abbrandtiefe x_a und der Zeitspanne $t_1 - t_{300}$; t_1 gibt den Zeitpunkt an, an dem begonnen wurde, die Oberfläche des Stabes mit Wasser abzukühlen und

damit die thermische Zersetzung zu beenden. t_{300} gibt den Zeitpunkt an, an dem an der Meßstelle T_1 ca. $300\text{ }^\circ\text{C}$ erreicht wurden. Da erst ab einer Temperatur von ca. $300\text{ }^\circ\text{C}$ eine merkliche thermische Zersetzung von Holz einsetzt, wird durch die Bildung der Differenz $t_1 - t_{300}$ die Zeit vor $t = t_{300}$ nicht berücksichtigt. Damit ergibt sich v zu

$$v = \frac{x_a}{t_1 - t_{300}} \quad (16)$$

Es wurden insgesamt 20 Versuche durchgeführt, wobei je 10 Versuche senkrecht und parallel zur Holzfaser erfolgten. Als Mittelwerte wurden für die Geschwindigkeiten des Abbrandes der Oberflächen senkrecht zur Faser $v = 0,31\text{ mm/min}$ und parallel zur Faser $v = 0,34\text{ mm/min}$ gefunden. Eine statistische Beurteilung der Ergebnisse nach [14] zeigte, daß dieser Unterschied nicht signifikant ist und daher ein gemeinsamer Mittelwert von $v = 0,325\text{ mm/min}$ mit einer Schwankung von $0,02\text{ mm/min}$ angenommen werden kann. Es sei betont, daß diese Werte nur für diese Untersuchungen gelten und eine Verallgemeinerung auf Brandversuche mit anderen Bedingungen nicht zulässig ist. Mit Kenntnis der Temperaturen T_{x_i} und $T_{x_{i+1}}$ an den Stellen x_i und x_{i+1} kann man aus Gleichung (3) die Stoffgrößen wie folgt bestimmen:

$$a = \frac{\lambda}{\sigma_p \rho} = \frac{v (x_{i+1} - x_i)}{\ln \frac{T_{x_i} - T_\infty}{T_{x_{i+1}} - T_\infty}} \quad (17)$$

In Bild 6 ist ein typischer Verlauf von $\ln (T_{x_i} - T_\infty)$ über der Tiefe x im Holzstab mit der Versuchszeit t als Parameter aufgetragen. Bei der Auswertung ist berücksichtigt, daß sich x mit $v \cdot (t_i - t_{300})$ ändert:

$$x(t_i) = x(t_i = 0) - v \cdot (t_i - t_{300}) \quad (18)$$

Man sieht aus Bild 6, daß sich für größer werdende Zeiten t , die Steigungen der Geraden ändern. Die Steigung entspricht nach Gleichung (3) dem Ausdruck

$$- \frac{v}{a}$$

d.h. sie ist der reziproken Temperaturleitzahl $1/a$ proportional, da der Wert v als konstant in der Zeitspanne $t_i - t_{300}$ angenommen wird. Damit ändert sich folglich die Temperaturleitzahl mit der Versuchszeit. Für die Phase der Abkühlung wird sie negativ, weil hier der Wärmefluß von innen nach außen verläuft. In Bild 7 ist die aus Schicht 2 + 3 (siehe Bild 4) nach Gleichung (17) gemittelte reziproke Temperaturleitzahl $1/a$ über der Versuchszeit $t - t_{300}$ für Versuche mit einer Schichtdicke von $\Delta x = 2$ mm aufgetragen. Tendenziell ist hier nur ein geringer Unterschied zwischen den Versuchen parallel und senkrecht zur Holzfaser zu erkennen. Auffallend ist der große Bereich der Änderungen von ca. $3500 \frac{\text{s}}{\text{cm}^2}$ bis ca. $200 \frac{\text{s}}{\text{cm}^2}$ zum Zeitpunkt der Abkühlung.

Die Bestimmung der Temperaturleitzahl nach dieser Methode ist problematisch, weil die Temperaturmessung im Holzinnern durch verschiedene Wirkungen wie z.B. makroskopische Rissbildung, Wärmeverluste, Stofftransport etc. stark beeinflußt werden kann. Beachtenswert ist, daß die reziproke Temperaturleitzahl in der Phase der Abkühlung mit $t > t_1$ nicht den niedrigen Wert vor $t = t_1$ behielt, sondern für alle Versuche auf konstante Werte zwischen $1\,000 \frac{\text{s}}{\text{cm}^2}$ und $4\,000 \frac{\text{s}}{\text{cm}^2}$ stieg.

Eine exakte Erklärung für diesen Vorgang kann hier nicht gegeben werden, es ist aber zu vermuten, daß Wasser ins Holzinnere eindrang bzw. Wasserdampf eindiffundierte und so die reziproke Temperaturleitzahl durch Veränderung der Stoffgrößen λ, ρ und c_p anstieg.

Die Auswertung für Versuche mit einer Schichtdicke von $\Delta x = 4$ mm ist in Bild 8 dargestellt. Hier ist der Unterschied zwischen den Versuchen senkrecht und parallel zur Holzfaser deutlich zu erkennen. Der Einfluß der Faserrichtung trat bei Versuchen mit einer Schichtdicke $\Delta x = 4$ mm stärker auf als bei Versuchen mit $\Delta x = 2$ mm. Der Anstieg der reziproken Temperaturleitzahl im Zeitbereich $t_1 - t_{300} = 0$ bis $t_1 - t_{300} = 6$ min ist dadurch zu erklären, daß in diesem Zeitbereich in den tieferen Schichten des Holzstabes Wasser verdampfte, sodaß die örtliche Temperatur an dieser Stelle bei ca. 100°C konstant blieb.

Wichtigstes Ergebnis dieser Auswertung ist die lineare Abhängigkeit der reziproken Temperaturleitzahl von der Zeit $t - t_{300}$. Im Falle der Versuche mit einer Schichtdicke von 4 mm ist diese Linearität ab dem Maximum der Kurve ebenfalls gegeben.

Dieses Ergebnis stimmt gut mit denen von Nolan, Brown und Rothwell [13] überein, die bei ähnlichen Versuchen eine lineare Abhängigkeit der Dichte von Holz von der Versuchszeit feststellten. Da bei ihren Versuchen die Temperaturen ebenfalls linear mit der Versuchszeit anstieg, nahm die Dichte von Holz während des Zersetzungsprozesses annähernd linear mit der Temperatur ab:

$$(T) = K_1 \cdot T \quad \text{mit } K_1 < 1 \quad (19)$$

Die Abhängigkeit der reziproken Temperaturleitzahl $1/a$ von der Temperatur ist für eine Schichtdicke von 2 mm in Bild 9 und für eine von 4 mm in Bild 10 dargestellt. Als Bezugstemperatur wurde das arithmetische Mittel der Temperaturen an den Stellen T_2 , T_3 und T_4 gewählt. Ausgewertet wurde der Zeitbereich zwischen $t = t_{300}$ und $t = t_1$, dem Zeitpunkt der Abkühlung. Man erkennt auch

hier, wie schon in den Bildern 7 und 8, daß die Meßkurven der verschiedenen Versuche gut durch Geraden mit gleicher Steigung dargestellt werden können. Bei Versuchen mit einer Schichtdicke von 4 mm gilt dies ab dem Maximum. Der Anstieg zu Beginn ist auf die gleichen Gründe wie bei der Auftragung in Abhängigkeit von der Zeit zurückzuführen. Aus Bild 9 und 10 wird deutlich, daß die reziproke Temperaturleitzahl proportional zur Temperatur fällt:

$$\frac{1}{a} = \frac{c_p(T) \rho(T)}{\lambda(T)} = K_2 T \quad \text{mit } K_2 < 1 \quad (20)$$

Die Temperaturleitzahl ändert sich von $a \approx \frac{1}{3500} = 0,000286 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ für Holz bis $a \approx \frac{1}{200} = 0,0005 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ einen Wert, der in [11] für Holzkohle angegeben wird. Die Temperaturleitzahl a ist danach abhängig vom Grad der Zersetzung von Holz zu Holzkohle.

Mit den verschiedenen Temperaturleitzahlen kann die Änderung des Temperaturverlaufes im Holz nach Gleichung (3) berechnet werden, wie sie in Bild 3 dargestellt ist. Anhand der Versuchsergebnisse nimmt die Temperatur im Holz mit dem Zersetzungsgrad zu, weil mit dem Zersetzungsgrad die Temperaturleitzahl steigt.

Entsprechend der höheren Temperaturverteilung im Holz nimmt der nach Gleichung (12) zu berechnende Wärmestrom \dot{Q}_2 zu. Dieser Wärmestrom ist abhängig von der Wärme-eindringzahl b

$$b = \sqrt{\rho c_p \lambda} = \sqrt{a} \cdot c_p \rho \quad (21)$$

was bedeutet, daß zur Berechnung von \dot{Q}_2 die Stoffgrößen λ, ρ und c_p einzeln bekannt sein müssen. Für das Brandstadium, in dem die Zersetzung von Holz an der Oberflächen-

schicht erst teilweise erfolgt ist, können die Gleichungen (19) und (20) als erste Näherungen für die Bestimmung der Stoffgrößen a bzw. λ, ρ und c_p herangezogen werden.

Mit zunehmender Branddauer, d.h. mit zunehmender Einwirkung von Wärme zersetzt sich Holz stetig bis zur Bildung von Holzkohle, wobei dieser Vorgang eine Funktion der Temperatur und der Tiefe im Holz ist. Damit wird auch

$$a = f (T, x) \quad (22)$$

Die gesamte, beim Löschvorgang abzuführende Wärmemenge setzt sich zusammen aus dem Anteil, der zur Abkühlung der Brandgütoberfläche notwendig und dem Anteil, der als Reaktionswärme abzuführen ist. Die Verbrennungsreaktion gilt nach der Modellvorstellung dann als beendet, wenn die Oberflächentemperatur des Brandgutes unter die Entzündungstemperatur gesunken ist. Die Zeitspanne vom Löschbeginn bis zu dem Zeitpunkt zu dem die Entzündungstemperatur unterschritten wird, beeinflusst ganz entscheidend den Bedarf an Löschwasser, weil hier zusätzlich zur Abkühlung Reaktionswärme entzogen werden muß.

Der abzuführende Reaktionswärmestrom beträgt im allgemeinen bereits nach kurzer Zeit ($t \approx 0,2$ min) ein Vielfaches des beim Abkühlvorgang entzogenen Wärmestromes. Das bedeutet, daß die zum Löschen notwendige Wassermenge davon abhängt, wie schnell die Verbrennungsreaktion beendet werden kann. Der Löschwasserbedarf wächst nach der Modellvorstellung etwa linear mit der Zeitspanne, in der die Verbrennungsreaktion auf Null zurückgeht.

Zur Berechnung des entzogenen Wärmestromes \dot{Q}_2 beim Löschvorgang nach Gleichung (12) kann man eine ausreichend dicke Schicht an der Oberfläche des Körpers als verkohlt betrachten, sodaß in dieser Schicht konstante Stoffwerte gelten. Diese Annahme erleichtert die

Berechnung von \dot{Q}_2 . In Bild 11 ist der pro Zeit und Flächeneinheit entzogene Wärmestrom ohne Berücksichtigung der Reaktionswärme für mittlere Temperaturleitahlen, d.h. verschiedene Zersetzungsgrade aufgetragen. Der Wärmefluß während des Löschvorganges nimmt mit dem Zersetzungsgrad von Holz zu Holzkohle bzw. $a = 10 \cdot 10^{-4} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ bis $a = 50 \cdot 10^{-4} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ zu, was bedeutet, daß mit dem Zersetzungsgrad die abzuführende Wärmemenge beim Löschvorgang wächst.

Für die Praxis bedeutet dies, daß in der ersten Phase des Löschvorganges die Flammen möglichst schnell niedergeschlagen werden müssen, um die Verbrennungsreaktion zu beenden. Danach ist das Brandgut nur noch soweit abzukühlen, daß kein Wiederaufflammen mehr möglich ist.

4. VERGLEICH DER MODELLRECHNUNG MIT MESSERGEBNISSEN AUS LÖSCHVERSUCHEN BEI ZIMMERBRÄNDEN IN NATÜRLICHEM MASSTAB.

Bei Löschversuchen in einem Versuchsraum in natürlicher Größe, wie sie in [15, 16] beschrieben sind, wurde festgestellt, daß beim Ablöschen des Brandes mit Wasser oder Schaum als Löschmittel im Mittel ca. 95 l Wasser verdampften. Diese verdampfte Wassermenge war unabhängig von der Aufgabeeart des Löschmittels. Im einzelnen wurde Wasser mit DM-, CM- Strahlrohren, sowie mit einem Pistolenstrahlrohr aufgegeben. Es wurde sowohl reines Wasser (Trinkwasserqualität) als auch Wasser mit Zusatz von Netzmitteln und Fluortensiden verwendet. Schaum wurde mit Luftschaumrohren L 200 (Verschäumungszahl ca. 10 $\hat{=}$ Schwerschaum) und L 400 (Verschäumungszahl ca. 40 $\hat{=}$ Mittelschaum) durch Zumischung von etwa 3% eines handelsüblichen Mehrbereichsschaummittels erzeugt. Trotz dieser unterschiedlichen Löschmittel und Löschmittelaufgabeearten sowie den daraus resultierenden unterschiedlichen Löschzeiten schwankte die verdampfte

Löschwassermenge nur wenig um den Mittelwert von 95 l. Dies bedeutet, daß dem Brandherd durch verdampfendes Wasser eine Wärmemenge von ca. 246.000 kJ entzogen wurde. Bei einer Massenverlustrate von ca. 10,9 kg/min betrug die Reaktionswärme ca. 185.000 kJ/min. Da die Verbrennung im Versuchsraum unter Luftmangel vonstattenging, betrug die freiwerdende Reaktionswärme ca. 92.500 kJ/min, die beim Löschen in einer Zeit von ca. 2 Minuten linear auf etwa Null reduziert wurde. Dazu war eine Wärmeabfuhr von ca. 92.500 kJ \cong 35,7 l Wasser bei 2590 kJ Wärmeaufnahme pro Liter Wasser notwendig.

Die Restmenge von 64,3 l Wasser kühlte das Brandgut nach der Modellvorstellung unter die Entzündungstemperatur. Bei einer Brandgutfläche von ca. 40 m² entsprach dies einer Wasseraufgaberate von etwa 1,6 l/m² bis der Brand entgültig gelöscht war.

Der Zersetzungsgrad bzw. die Temperaturleitzahl des Brandgutes hat auf die zur Abkühlung notwendige Wassermenge großen Einfluß. Bei einer Temperaturleitzahl von $a = 20 \cdot 10^{-4} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ ergibt sich nach der Modellrechnung im Zeitintervall von 2 min ca. 1,5 l/m², für $a = 50 \cdot 10^{-4} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ ca. 2,6 l/m². Da der gesamte Abbrand des Mobiliars ca. 40% betrug, ist anzunehmen, daß die Temperaturleitzahl der hölzernen Teile des Brandgutes nahe der von Holzkohle lag.

Von der Überlegung ausgehend, daß beim Löschen zunächst die Verbrennungsreaktion beendet und danach ein Wiederaufflammen verhindert werden muß, wurde versucht, den Brand mit vorwiegend inhibitorisch wirkenden Mitteln wie ABC-Pulver und Halon 1301 zu löschen und danach mit Hilfe von Wasser ein Wiederaufflammen zu verhindern. Diese Kombination von Löschmitteln führte bei den oben angeführten Versuchen nicht zu einer Reduzierung der Löschwassermenge, auch die verdampfte Wassermenge war so hoch wie beim Löschen mit Wasser bzw. Schaum. Eine Erklärung liegt darin, daß der Brand nach Beendigung des

ersten Löschangriffs mit inhibitorisch wirkenden Löschmitteln sofort wieder aufflammte, sodaß beim Löschen mit Wasser wieder die volle Brandintensität herrschte. Ein exakter Vergleich zwischen den Versuchswerten und den theoretischen Ergebnissen ist z.Z. nicht möglich, da das Brandgut bei diesen Versuchen neben Holz auch Papier und Textilien enthielt, die unterschiedliche Stoffgrößen aufwiesen.

Hinzu kommt, daß der Zersetzungsgrad des Brandgutes von der örtlichen und zeitlichen Brandausbreitung abhing und somit bei den erwähnten Versuchen nicht alle Teile des Brandgutes gleichermaßen zersetzt waren. Trotz dieser Einschränkungen stimmen die theoretischen Werte gut mit den Versuchsergebnissen überein.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Im ersten Teil eines Forschungsvorhabens, das die Löschwirkung verschiedener Löschmittel bei unterschiedlichen Brandstoffen untersucht, wurde ein mathematisches Modell zur theoretischen Beschreibung des Löschvorganges mit Wasser als Löschmittel entwickelt. Das Modell berücksichtigt die thermischen Eigenschaften von Wasser und beschreibt in vereinfachter Form den Brand- und Löschvorgang. Die genaue Kenntnis der Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Brandgutes ist zur Berechnung der Wärmeaustauschvorgänge unerlässlich. Da sich diese Stoffdaten während der Verbrennung mit dem Zersetzungsgrad ändern, wurden an Kiefernholzstäben Messungen zur Bestimmung der Temperaturleitzahl und der Abbrandgeschwindigkeit der Oberfläche durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß die Temperaturleitzahl etwa umgekehrt proportional zur jeweiligen Temperatur im Holzinne ist. Aus der Modellrechnung ergibt sich damit, daß mit dem Zersetzungsgrad, d.h. mit der Branddauer die zum Löschen

benötigte Wassermenge steigt.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnung mit experimentellen Werten aus Löschversuchen in natürlichem Maßstab zeigt gute Übereinstimmung, obwohl bei den Versuchen verschiedene Löschmittel und Löschmittelaufgaberaten verwendet wurden.

Die Untersuchungen werden mit dem Ziel weitergeführt, die physikalischen Vorgänge beim Löschen mit verschiedenen Löschmitteln zu beschreiben, sodaß in der Praxis eine optimale Ausnutzung der Löscheffekte verschiedener Löschmittel möglich ist.

6. FORMELZEICHEN

a	Temperaturleitzahl
b	Wärmeeindringzahl
c _p	Wärmekapazität
m	Masse
\dot{m}	zeitlicher Massenfluß
t	Zeit
v	Abbrandgeschwindigkeit der Oberfläche
x	Tiefe, Koordinate
y	Koordinate
z	Koordinate
Δx	Schichtdicke
A	Fläche
H _u	unterer Heizwert
Q	Wärmemenge
\dot{Q}	Wärmestrom
T	Temperatur
λ	Wärmeleitfähigkeit
ρ	Dichte

Indices

a	abgebrannt
e	Ende der Löschphase
i, 1, 2..	fortlaufende Nummer
k	in Richtung auf den Körper
D	Löschphase
w	Wasser
x	an der Stelle x
z	Zündung
O	Oberfläche
∞	Umgebung

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bryan, J.:
Smith, D.N. The Effekt of Chemicals
in Water Solution on Fire
Extinction
Engineering 159, Part I,
457 Part II (1945)
- [2] Tamanini, F.: The Application of Water
Sprays to the Extinguishment
of Crib Fires
Technical Report 22359 - 1
Factory Mutual Research (1975)
- [3] Folke, F.: Über Messung von Löschungs-
und Imprägnierungseffekt
durch Wiegen eines Scheiter-
haufens während der Ver-
brennung
Das Dänische Feuerschutz-
Komitee Kopenhagen (1934)
- [4] Kida, M.: Extinction of Fires of
Small Wood Cribs with Sprays
of Water and Some Solutions
Report of Fire Research
Institute Japan Nr. 36 (1973)
- [5] Tamanini, F.: A Study of the Extinguishment
of Vertical Wood Slabs in Self-
Sustained Burning by Water
Spray Application
Harvard University
Cambridge, Mass, 02139 (1975)
- [6] Kung, H.C.
Hill, S.P.: Extinction of Wood Crib and
Pallet Fires
Combustion and Flame 24
(1975) Nr. 3 S.305-317

- [7] Salzberg, F.;
Vodvarka, F.I;
Maatman, G.C.: Minimum Water Requirements
for Suppressing of Room Fires
Fire Technology 6 Nr. 1 (1970)
S. 22-28
- [8] Hird, D., Pickard, R.W.
Fittes, D.W. Nash, P.: The Use of High an Low
Pressure Water Sprays against
Fully Developed Room Fires
Fire Research Note No. 388
März (1959)
- [9] Stolp, M.: The Extinction of Small
Wood Crib Fires by Water
In: Internationales Brand-
schutzseminar 1976 in Karlsruhe
Karlsruhe: Vereinigung zur
Förderung des Deutschen
Brandschutzes e.V. 1976
Bd. 2, S. 127-141
- [10] Lode, Dettmar: Untersuchung über die Lösch-
wassermenge bei einem Modell-
brand
VFDB-Zeitschrift 2 (1956) Nr. 4
S. 141-142
- [11] Evans, O.W.
Emmons, H.W.: Combustion of Wood Charcoal
Fire Research 1 (1977) Nr. 1
S.57 - 66
- [12] Rasbash, D.I.: Heat Transfer Between Water
Sprays and Flames of Freely
Burning Fires
Proceedings of the Symposium
on the Interaction Between
Fluids and Particles
London (1963)
- [13] Nolan, P.F;
Brown, D.J.
Rothwell, E.: Gamma - Radiographic Study
of Wood Combustion
14. Symposium on Combustion
Pittsburgh, The Combustion
Institute (1973) S, 1143-1150

- [14] Kreyszig, E.:
Statistische Methoden und
ihre Anwendungen.
5. Auflage
Göttingen: Van den Hoeck &
Rupprecht, (1975)
- [15] Fuchs, P.:
Brand- und Löschversuche in
natürlichem Maßstab, um ge-
eignete Löschmittel oder
Kombinationen von Lösch-
mitteln zu finden, die den
bei der derzeitigen Brand-
bekämpfung üblichen Wasser-
schaden verringern könnten.
Forschungsbericht Nr. 29 der
Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz
(1975) Teil II
- [16] Fuchs, P.:
Brand- und Löschversuche in
natürlichem Maßstab, um ge-
eignete Löschmittel oder
Kombinationen von Lösch-
mitteln zu finden, die den
bei der derzeitigen Brand-
bekämpfung üblichen Wasser-
schaden verringern könnten.
Forschungsbericht Nr. 31
der Innenministerien der
Bundesländer Arbeitskreis V
Unterausschuß "Feuerwehrange-
legenheiten"
(1975) Teil II

8. BILDER

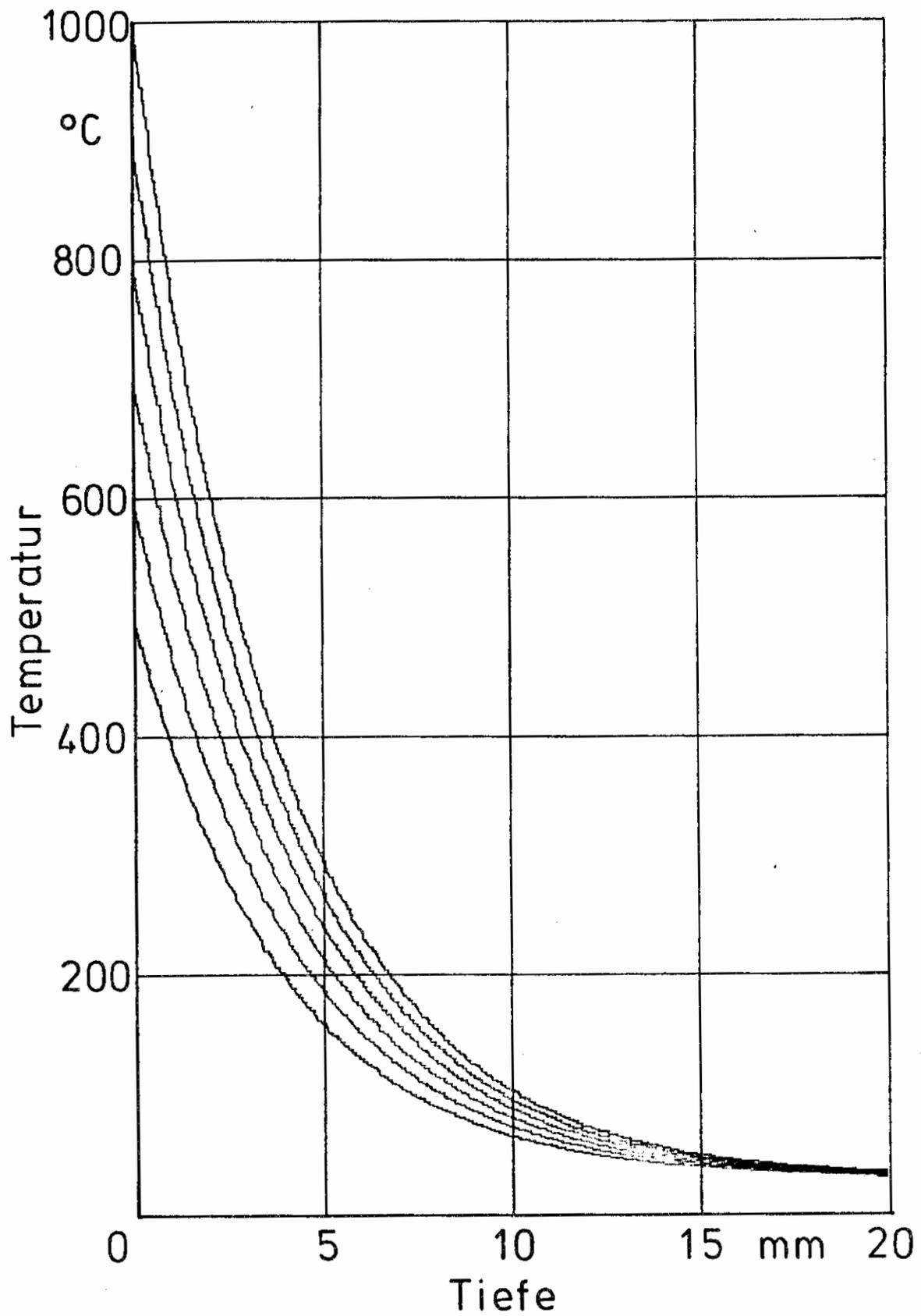


Bild 1. Temperaturverteilung in Holz bei verschiedenen Oberflächentemperaturen

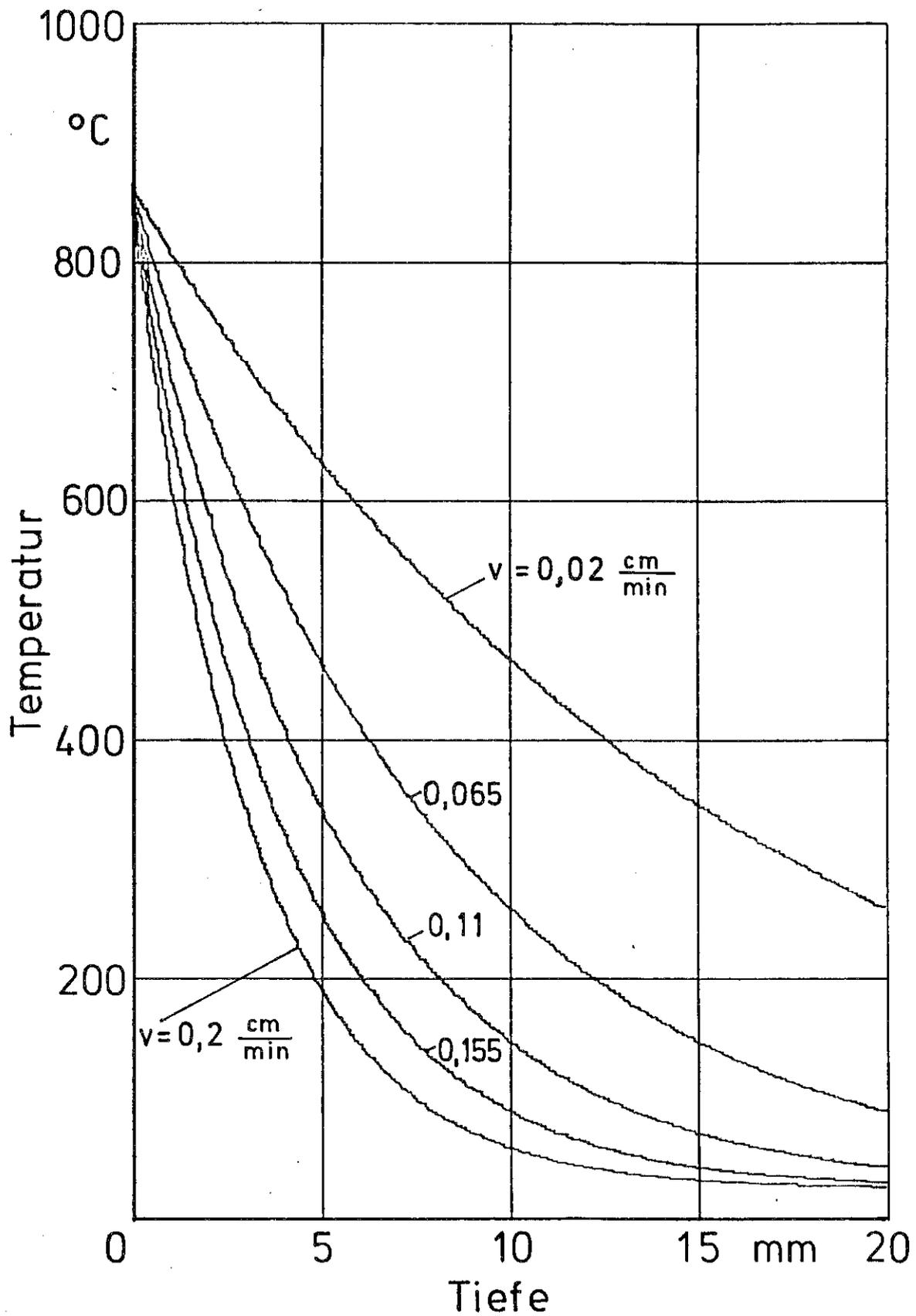


Bild 2. Temperaturverteilung in Holz in Abhängigkeit verschiedener Geschwindigkeiten v des Abbrandes der Oberfläche

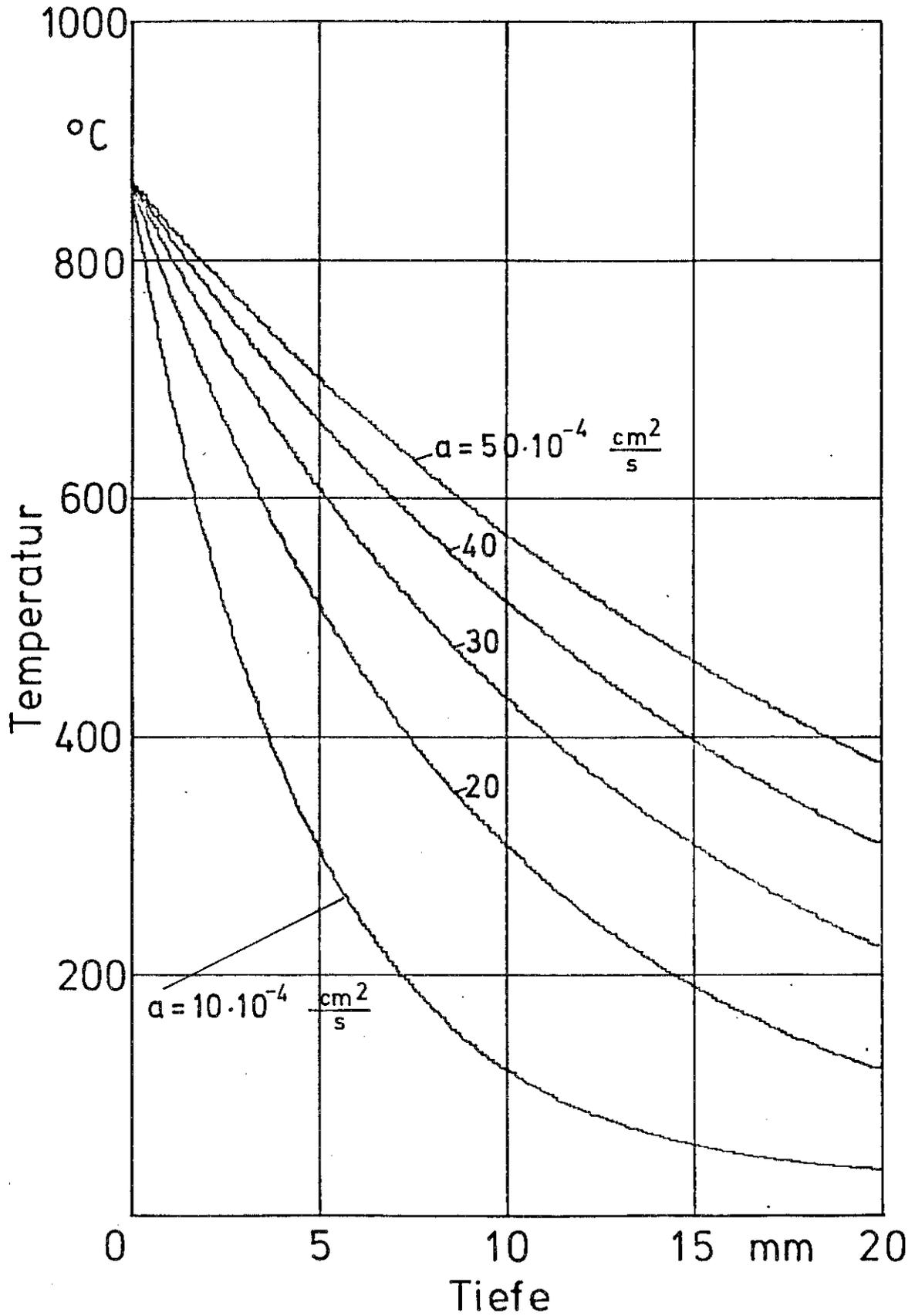


Bild 3. Temperaturverteilung in Holz in Abhängigkeit verschiedener Temperaturleitzahlen

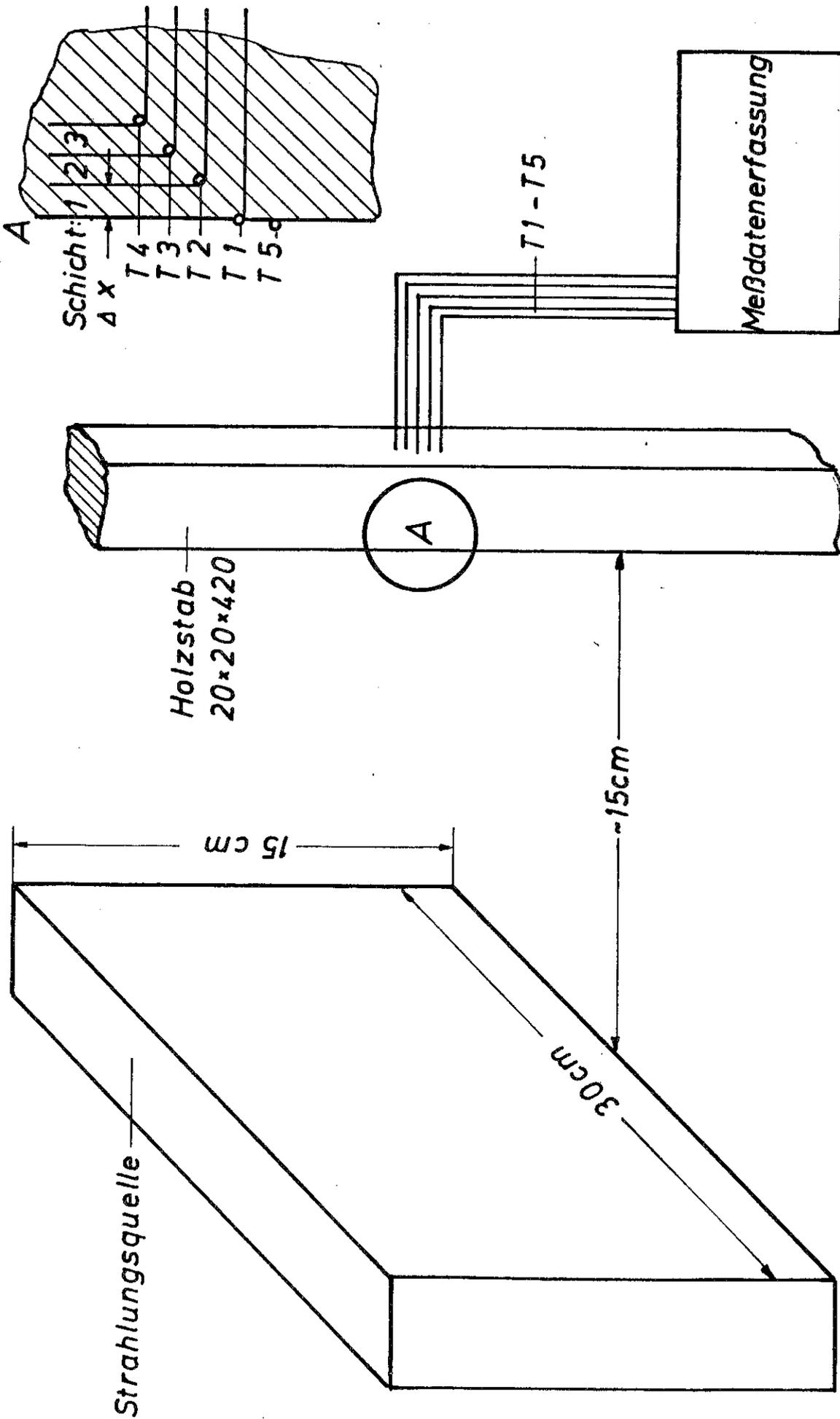


Bild 4. Schematischer Aufbau der Versuchsanordnung mit Lage der Thermolemente

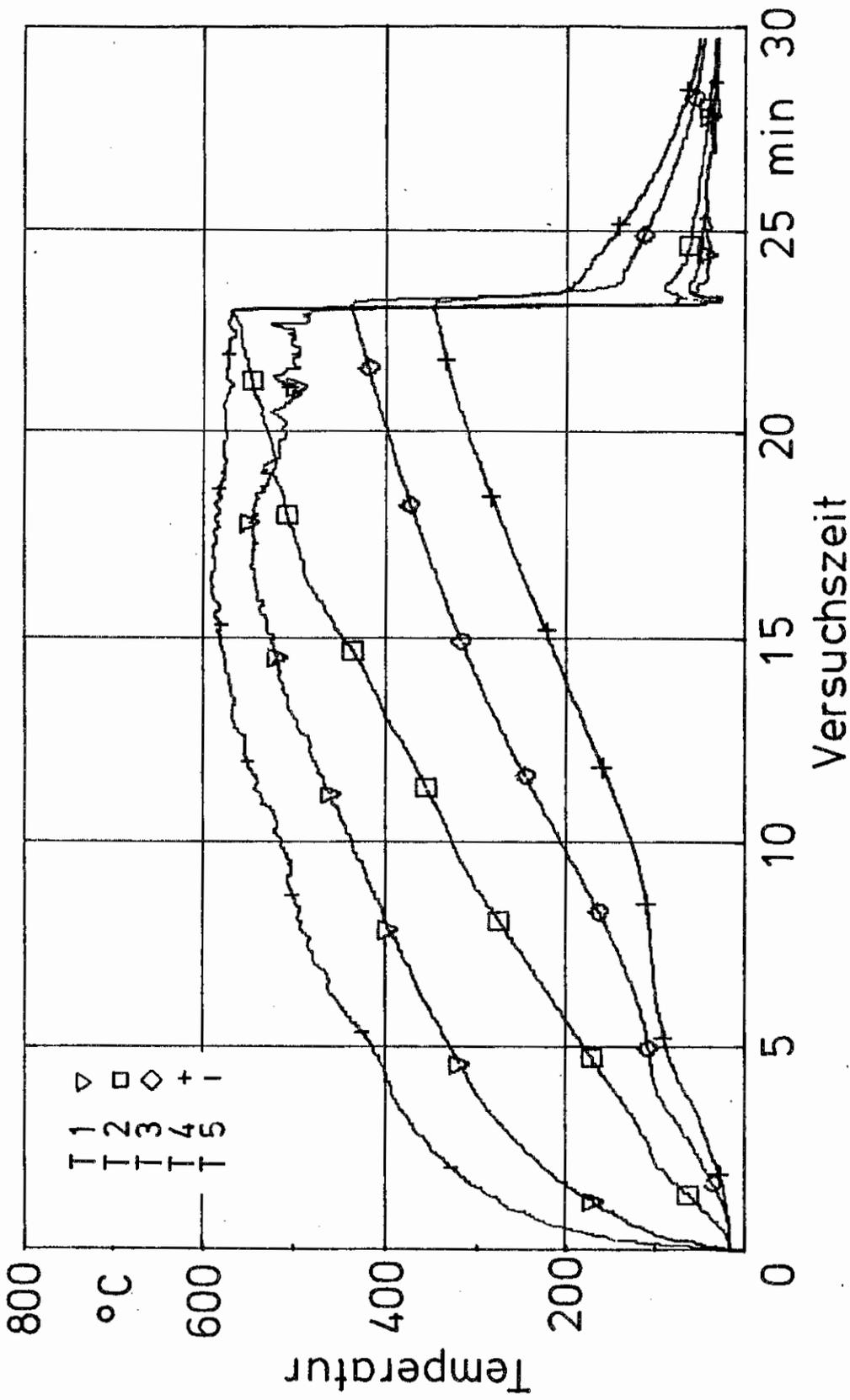


Bild 5. Typischer zeitlicher Temperaturverlauf an den Meßstellen T1 bis T5 für eine Schichtdicke von 4 mm

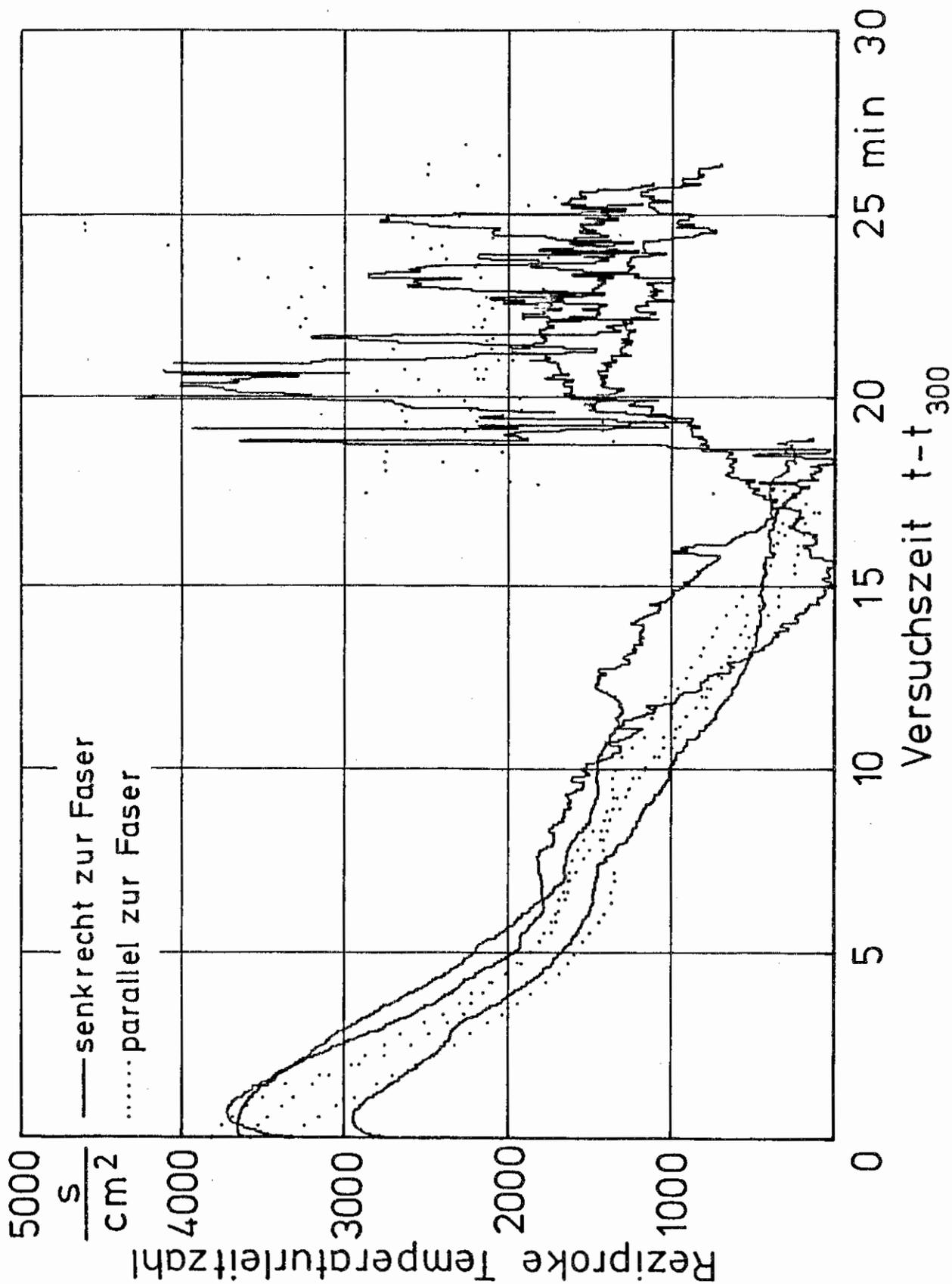


Bild 7. Verlauf der reziproken Temperaturleitzahl $1/a$, aufgetragen über der Versuchszeit $t-t_{300}$ für eine Schichtdicke von 2 mm, parallel und senkrecht zur Faser gemessen

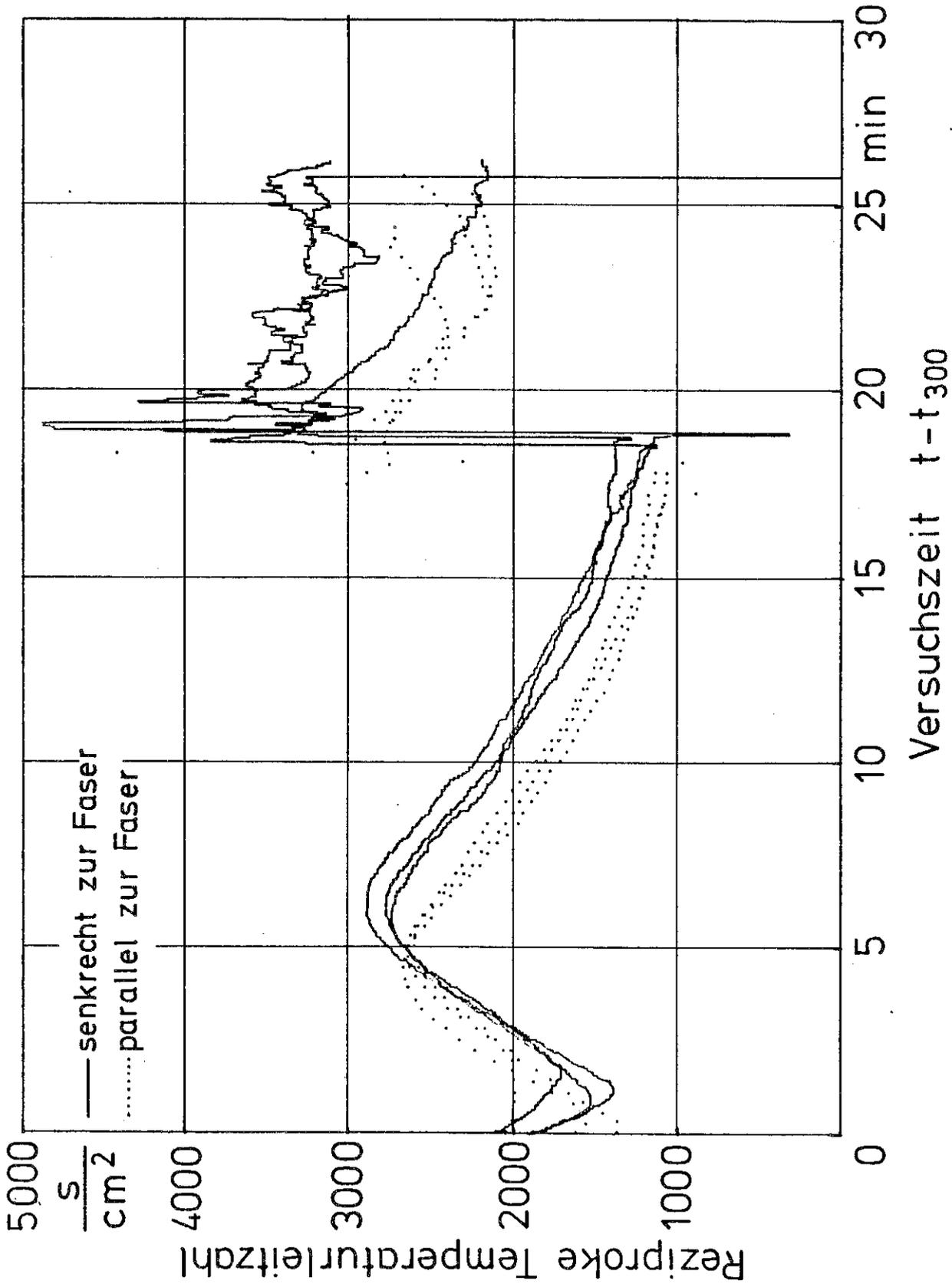


Bild 8. Verlauf der reziproken temperaturleitzahl 1/a, aufgetragen über der Versuchszeit $t-t_{300}$ für eine Schichtdicke von 4 mm, parallel und senkrecht zur Faser gemessen

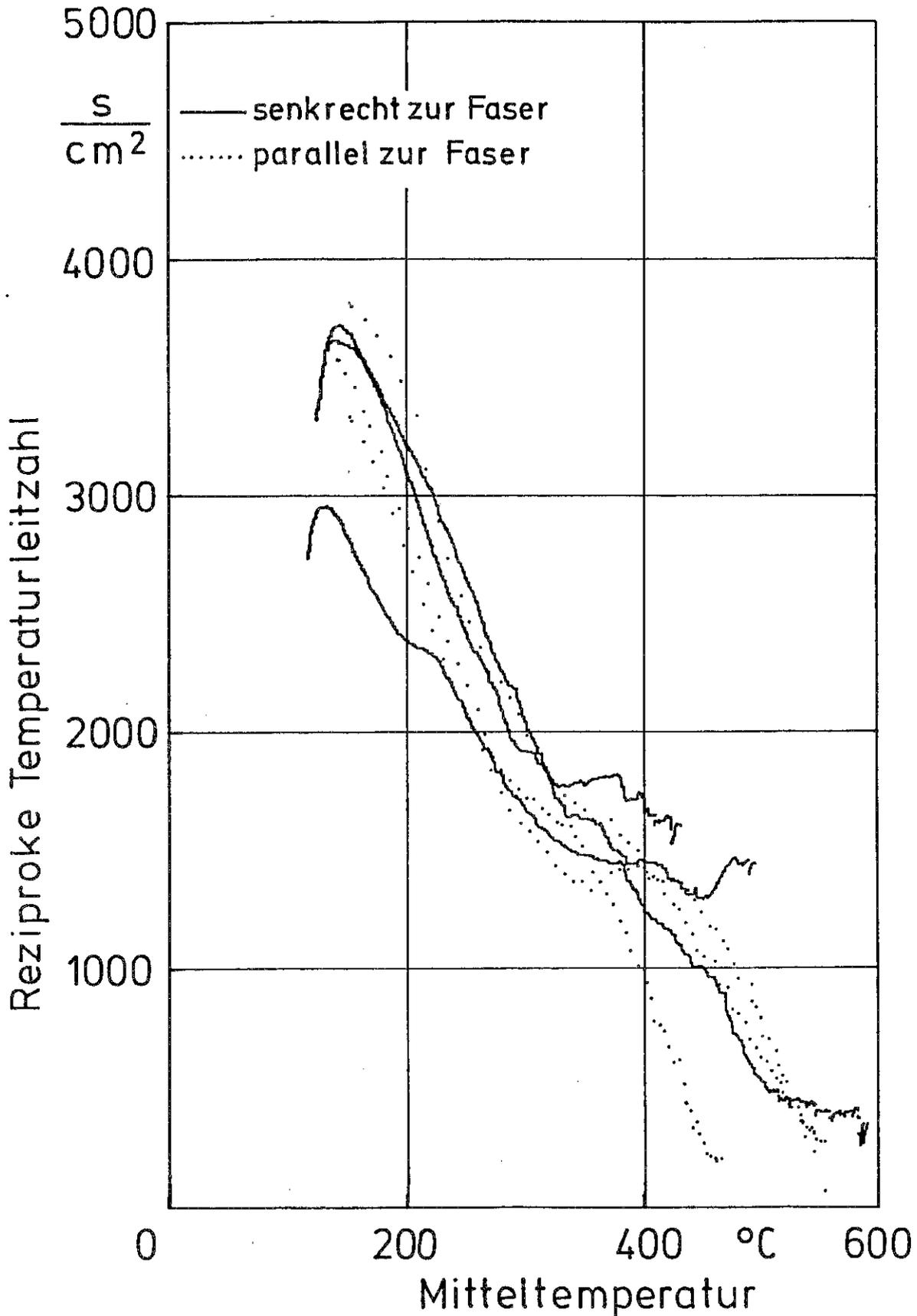


Bild 9. Verlauf der reziproken Temperaturleitzahl in Abhängigkeit von der arithmetischen Mitteltemperatur für eine Schichtdicke von 2 mm, parallel und senkrecht zur Faser gemessen

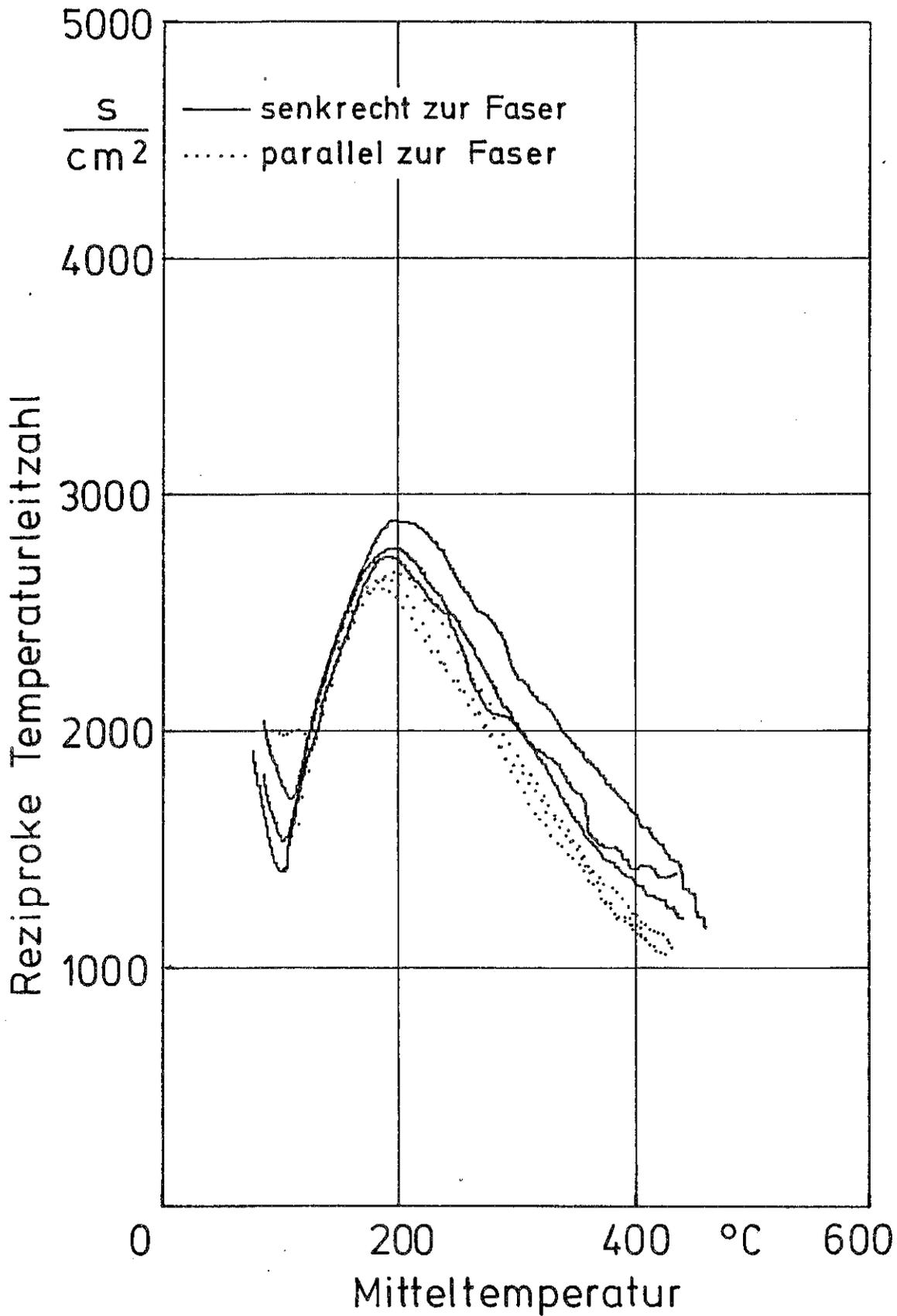


Bild 10. Verlauf der reziproken Temperaturleitzahl in Abhängigkeit von der arithmetischen Mitteltemperatur für eine Schichtdicke von 4 mm, parallel und senkrecht zur Faser gemessen

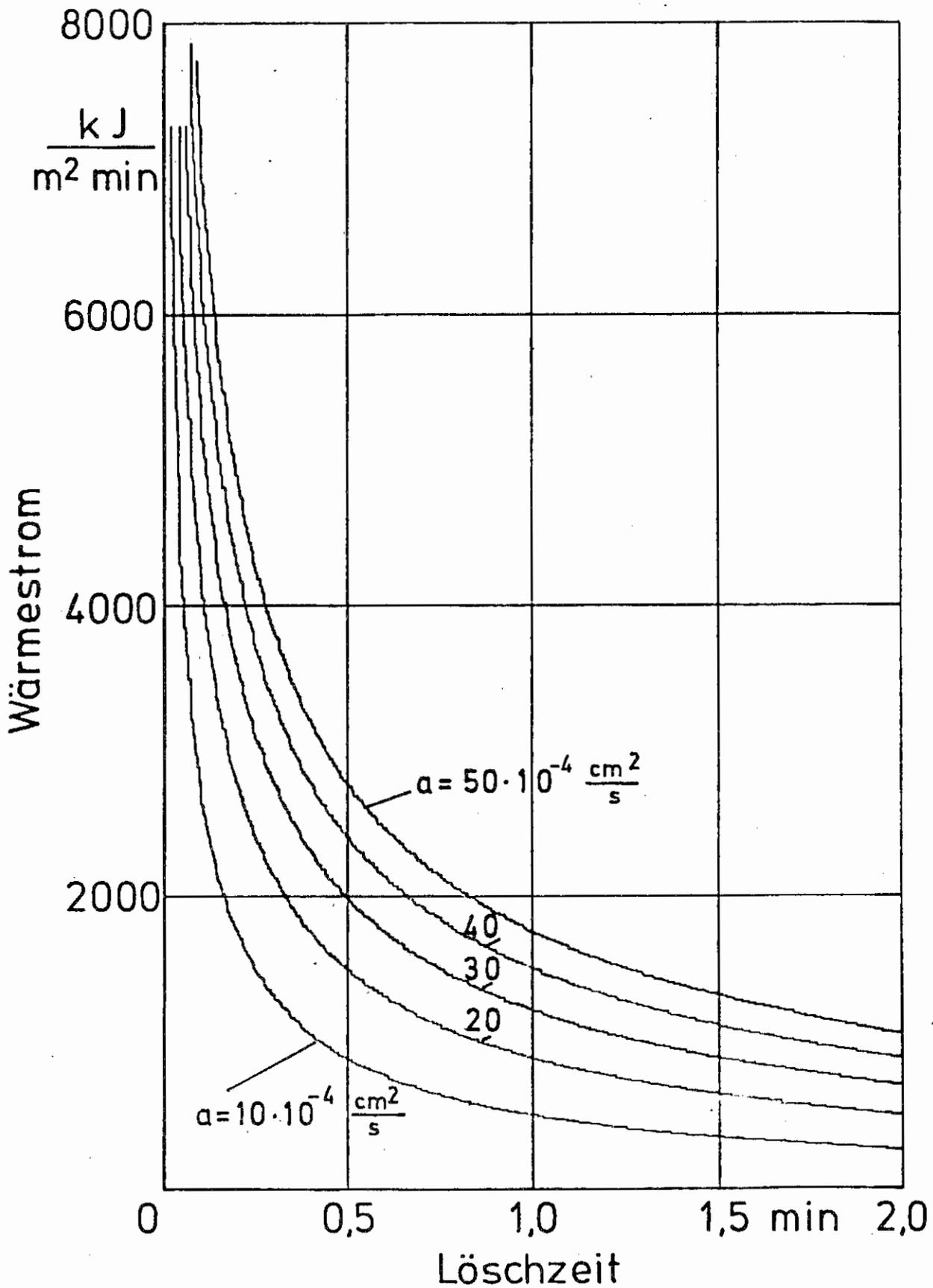


Bild 11. Zeitlicher Verlauf des zur Abkühlung eines Holz-
körpers notwendigen Wärmestromes für verschiedene
Temperaturleitahlen