

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Untersuchung der Selbstentzündung
selbstentzündlicher Stoffe, insbesondere
von Holz

13

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

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

AGF

Forschungsbericht Nr.13

"Untersuchung der Selbstentzündung selbstentzündlicher
Stoffe, insbesondere von Holz"

von

Dipl.-Ing. R.John

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

August 1969

FA.Nr.32 (4/67)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. BEDINGUNGEN, BEI DENEN EINE SELBSTENT- ZÜNDUNG EINTRITT	1
3. EINFLUSS DER KÖRPERABMESSUNGEN AUF DIE KRITISCHE UMGEBUNGSTEMPERATUR	2
3.1. Versuch einer Berechnung	2
3.2. Ergebnis dieser Berechnung	5
4. UNTERSUCHUNG DER SELBSTERHITZUNGSVORGÄNGE IN ROHRLEITUNGSISOLIERUNGEN	6
4.1. Wärmefluß in der Isolierung	6
4.2. Versuchsaufbau	9
4.2.1. Versuchsanordnung I	10
4.2.2. Versuchsanordnung II	10
4.3. Versuchsdurchführung	11
4.4. Meßergebnisse	11
4.5. Erzeugter Wärmestrom in der Probe	12
5. EINFLUSS DER UMGEBUNGSBEDINGUNGEN	14
6. ZUSAMMENFASSUNG	16
7. LITERATURVERZEICHNIS	17
8. BILDER	18

1. EINLEITUNG

Im Holz und auch in anderen organischen Stoffen laufen ständig Reaktionen ab, bei denen je nach den Umgebungsbedingungen unterschiedliche Wärmemengen freigesetzt werden. Vom Einbauzustand und den Abmessungen des jeweils reagierenden Körpers hängt es ab, ob diese freiwerdende Wärmemenge ohne nennenswerte Temperaturerhöhung an die Umgebung abgeführt werden kann oder ob sie infolge guter Isolation zu einem Temperaturanstieg führt. Eine konstante, über der Umgebungstemperatur liegende Körpertemperatur stellt sich immer dann ein, wenn die erzeugte Wärmemenge gleich der abgeführten Wärmemenge ist. Die Temperatursteigerung bis zur Selbstentzündung tritt ein, wenn die erzeugte Wärmemenge zu jeder Zeit größer ist als die an die Umgebung abgeführte Wärmemenge.

Die freiwerdende Wärmemenge kann z.Z. noch nicht quantitativ berechnet werden, da die exothermen Reaktionen, insbesondere im Holz, nicht ausreichend bekannt sind. Die Wärmemengen, die bei diesen Vorgängen freigesetzt werden, können also nur experimentell bestimmt werden.

2. BEDINGUNGEN, BEI DENEN EINE SELBSTENTZÜNDUNG EINTRIT

Von mehreren Verfassern wurden Umgebungstemperaturen ermittelt, die bei ihren speziellen Versuchsbedingungen zu einer Selbsterhitzung bis zur Zündtemperatur führten [1]. Wegen der verschiedenen Versuchsanordnungen können diese ermittelten kritischen Umgebungstemperaturen jedoch nicht miteinander verglichen werden. In [2] wird die Höhe der Umgebungstemperatur untersucht, die bei einer gegebenen Wärmeerzeugungskurve in Abhängigkeit von der Isolation des erwärmten Körpers zu einer Selbstentzündung führt.

In Bild 1 ist eine angenommene temperaturabhängige Wärmeproduktionskurve und zwei Wärmeableitungsgeraden für eine Isolation mit kleiner (Gerade 1) und großer (Gerade 2) Wärmedurchgangszahl k dargestellt. Werden diese Geraden parallel bis an die

Wärmeerzeugungskurve verschoben (gestrichelte Lage), so geben ihre Schnittpunkte mit der Abszisse die kritischen Umgebungstemperaturen an.

Daraus ist zu ersehen, daß je nach der Isolation des sich selbst erhitzenden Stoffes verschiedene kritische Umgebungstemperaturen existieren und daß es beim Überschreiten dieser Temperaturen zur Selbstentzündung kommt. Die kritischen Umgebungstemperaturen sind also die Temperaturen, bei denen sich gerade noch ein Gleichgewicht zwischen entstehender und abgeführter Wärme einstellt.

Aus dieser Darstellung zeigt sich ganz deutlich, daß für die Angaben von Grenztemperaturen, bei denen eine Selbstentzündung sicher ausgeschlossen werden kann, nicht nur der selbstentzündliche Stoff (Holz) und die Menge ausschlaggebend sind, sondern daß die gesamte Anordnung und die Einbauverhältnisse berücksichtigt werden müssen.

Die oben angestellten Betrachtungen zwischen der Wärmeerzeugungskurve und der Wärmeableitungsgeraden gelten nur im Idealfall, wenn der wärmeabgebende Körper so gestaltet ist, daß in ihm keine nennenswerten Temperaturdifferenzen auftreten. In größeren Körpern, wozu auch Schüttgut und Füllmaterial, wie z.B. Holzsägespäne, gerechnet werden können, die zur Selbstentzündung neigen, treten je nach Abmessung und Wärmeleitfähigkeit hohe Temperaturdifferenzen auf. Schon die Außenschicht dieser Stoffe wirkt hier als Isolation.

3. EINFLUSS DER KÖRPERABMESSUNGEN AUF DIE KRITISCHE UMGEBUNGSTEMPERATUR

3.1. Versuch einer Berechnung

GROSS und ROBERTSON haben in einer Arbeit [3] versucht, rechnerisch Werte von kritischen Umgebungstemperaturen kleiner Versuchsproben auf größere Körper zu übertragen.

Sie betrachteten dabei die untersuchten Stoffe als homogene Materialien und gingen davon aus, daß die entstehende Wärme an der

Oberfläche wieder abgeführt wird. Es wurde angenommen, daß die Wärme nach einer Reaktion 1. Ordnung frei wird, d.h.:

$$r = k \cdot c .$$

Hierin ist r der auf die Zeit und die Volumeinheit bezogene chemische Umsatz und c die Konzentration. Die Reaktionskonstante k ist nach der Arrheniusgleichung von der Temperatur abhängig.

$$k = z \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$$

mit

z	=	Häufigkeitszahl
E	=	Aktivierungsenergie
R	=	allgemeine Gaskonstante
T	=	absolute Temperatur der betrachteten Substanz.

Ist nach der gestellten Voraussetzung die Konzentration c konstant und q die Wärmetönung der Reaktion, so ergibt sich der pro Volumeinheit erzeugte Wärmestrom \dot{Q} zu:

$$\dot{Q} = r \cdot q = q \cdot z \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot c .$$

Mit $z \cdot q \cdot c = A$

wird $\dot{Q} = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} .$ (1)

Da, wie schon oben erwähnt, der Reaktionsablauf nicht genau bekannt ist, wurde in [3] und [4] angenommen, daß der Wärmestrom bei konstanter Temperatur von der Erwärmungszeit unabhängig ist. Diese grobe Vereinfachung entspricht nicht den wirklichen Vorgängen bei der Selbsterhitzung. Dies muß deshalb bei allen mit ihr gewonnenen Ergebnissen berücksichtigt werden. Unter der Annahme

dieser Voraussetzungen kann das Temperaturfeld im sich selbst erhitzenden Körper durch die Differentialgleichung

$$\lambda \left[\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{m}{x} \frac{dT}{dx} \right] + A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} = 0 \quad (2)$$

beschrieben werden.

Hierin ist

λ	die Wärmeleitfähigkeit des Körpers
A	der Wärmeerzeugungskoeffizient
R	die allgemeine Gaskonstante
E	die Aktivierungsenergie
T	die Temperatur des Körpers
m	ist eine Rechengröße, die die Geometrie des Körpers berücksichtigt.

Nimmt man an, daß die freiwerdende Wärme innerhalb des Materials bei einer mittleren Temperatur an der Oberfläche gemäß dem Newton'schen Abkühlungsgesetz abgeführt wird, so kann folgende Beziehung zur Berechnung der kritischen Umgebungstemperatur für kugelförmige Körper herangezogen werden:

$$(T_o - T_u) \cdot \alpha = \frac{R_K}{3} \cdot A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (3)$$

Hierin ist

T_u	die gesuchte kritische Umgebungstemperatur
T_o	die am Körper auftretende kritische Oberflächentemperatur
$T_m = \frac{T_i - T_o}{2}$, die mittlere Temperatur
T_i	die kritische Temperatur im Inneren
R_K	der kritische Radius der Kugel
α	die Wärmeübergangszahl.

Bei Körperformen, die von der Kugel abweichen, kann nach [3] die kritische Körpergröße über einen Formfaktor aus dem kritischen Durchmesser der Kugel ermittelt werden.

Für eine bestimmte Umgebungstemperatur T_u ergibt sich nach [3] der kritische Radius eines halbunendlichen Zylinders als das 0,782 fache des kritischen Radius der Kugel und für eine halbunendliche Platte erhält man als kritische Dicke das 0,52 fache des kritischen Kugelradius.

3.2. Ergebnisse dieser Berechnung

Mit den experimentell von GROSS und ROBERTSON ermittelten Werten für A und E wurden von diesen nach Gl. (2) und (3) die kritischen Radien verschiedener Stoffe bei vier Umgebungstemperaturen berechnet. In Bild 2 sind die Ergebnisse für die einzelnen Stoffe aufgetragen. Nach diesen Angaben tritt für Kiefernholz eine Selbstentzündung bei einer Oberflächentemperatur von 100°C ein, wenn die Holzkugel einen Durchmesser von ca. 1,3 m hat. Die in Bild 2 angegebenen Werte können jedoch nicht kritiklos hingenommen werden, da die für Holz in [3] angegebenen und gemessenen physikalischen Werte nur für einen Temperaturbereich von 140 bis 310°C gelten. In Bild 2 wurden jedoch kritische Oberflächentemperaturen bis herunter zu 20°C angegeben. In diesem niedrigen Temperaturbereich sind die angenommenen Voraussetzungen für die rechnerische Ermittlung der Selbstentzündungsbedingungen sicher nicht voll zutreffend. Auch die infolge der Unkenntnis über die ablaufende exotherme Reaktion und die Konzentration der Reaktionspartner getroffene Annahme, daß sich der Wärmestrom mit der Versuchsdauer nicht ändert, trifft bei extrem langen Zeiten, die bis zum Eintritt der Selbstentzündung erforderlich sind, wie z.B. für eine Kugel mit dem kritischen Radius bei 20°C Umgebungstemperatur, nicht zu. Es ist sicher, daß der Wärmeerzeugungskoeffizient A von der Lagerzeit und der Umgebungsatmosphäre abhängig ist.

4. UNTERSUCHUNG DER SELBSTERHITZUNGSVORGÄNGE IN ROHRLEITUNGSISOLIERUNGEN

Aus der Literatur sind eine Reihe von Fällen bekannt, bei denen Heizungsrohre Bodenfüllungen und Isolierungen aus Holzsägemehl in Brand setzten, obwohl die Rohrtemperaturen sehr niedrig lagen. In [5] wird u.a. berichtet, daß von einer Wasserleitung mit einer Temperatur zwischen 80 und 100°C ein Brand der Bodenfüllung, durch die das Rohr führte, ausgelöst wurde.

Daß es in diesem Fall zu einer Selbstentzündung im Gegensatz zu vielen ähnlich isolierten Rohren, bei denen keine nennenswerten Temperatursteigerungen in der Isolation auftraten, gekommen ist, liegt einerseits an der Wärmeabfuhr, wie eingangs schon erwähnt wurde, und andererseits an der unterschiedlichen Luftzufuhr in das Innere der Holzsägemehlfüllung, wie Versuche an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik zeigten.

4.1. Wärmefluß in der Isolation

Der Wärmefluß in der Isolation eines Rohres wird daher im folgenden näher untersucht. Für diese Betrachtungen wird zunächst angenommen, daß das isolierte Rohr so lang ist bzw. die Temperaturen an den Enden so hoch sind, daß der Wärmeverlust an den Stirnseiten vernachlässigt werden kann. Bild 3 enthält alle Werte und Größen, die in der folgenden Betrachtung verwendet werden:

Die Heizflüssigkeit 1 strömt mit konstanter Temperatur durch das Heizrohr 2. Dieses Heizrohr hat den Innendurchmesser d_i und den äußeren Durchmesser d_a . λ_{Rm} ist die mittlere Wärmeleitfähigkeit dieses mehrschichtigen Rohres. Die Isolierung 3 um das Heizrohr besteht aus einem Material, z.B. Sägemehl, in dem exotherme Reaktionen ablaufen und hat den Innendurchmesser d_a und den Außendurchmesser D_i . Die erforderlichen Größen zur Berechnung der freiwerdenden Wärmemenge sind die Aktivierungsenergie E , die Wärmeerzeugungszahl $A = q \cdot z \cdot c$ und die Wärmeleitfähigkeit λ_i . Das äußere Mehrschichtenrohr 4 hat die Durchmesser D_i und D_a . Seine mittlere Wärmeleitfähigkeit ist λ_{Rm} .

Die Temperatur der Heizflüssigkeit liegt für die folgenden Rech-

nungen immer wesentlich über der Umgebungstemperatur t_{umg} .
 Es wird also Wärme vom Heizrohr durch die Isolation an die Umgebung abgeführt. Für den Fall nun, daß in der Isolation 3 keine Wärme produziert wird, also $\dot{d}Q = 0$ ist, kann der Temperaturverlauf in dieser Isolation nach dem Wärmeleitungsgesetz berechnet werden. Dieser ist nur abhängig von den Temperaturen t_2 und t_3 und den Durchmessern d_a und D_i .

An einer beliebigen Stelle D_x gilt:

$$t_x = (t_2 - t_3) \cdot \frac{\ln(D_i/D_x)}{\ln(D_i/d_a)} + t_3 \quad (4)$$

Von dem Heizrohr wird dabei der Wärmestrom \dot{Q} an die Umgebung abgeführt.

$$\dot{Q} = \frac{\pi (t_1 - t_4)}{\frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{2\lambda_j} \ln \frac{D_i}{d_a} + \frac{1}{2\lambda_{Rm}} \ln \frac{D_a}{D_i}} \quad (5)$$

Ist die Wärmeleitzahl λ_j des Isolationsmaterials unbekannt, so kann diese über die Temperaturdifferenz $t_3 - t_4$ am Mantelrohr oder aus $t_1 - t_2$ am Heizrohr nach Gl. (6) berechnet werden.

$$\dot{Q} = \frac{\pi (t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{d_a}{d_i}} = \frac{\pi (t_2 - t_3)}{2\lambda_j \ln} = \frac{\pi (t_3 - t_4)}{\frac{1}{2\lambda_{Rm}} \ln \frac{D_a}{D_i}} \quad (6)$$

Besteht die Isolierung 3 in Bild 3 aus einem Material, das zur Selbsterhitzung neigt, dann kann mit Gleichung (6) auch hier die

Wärmeleitfähigkeit λ , berechnet werden. Es muß jedoch darauf geachtet werden, daß die mittlere Temperatur der Isolierung niedrig ist, damit im Vergleich zum Wärmefluß infolge der Temperaturdifferenz $t_2 - t_3$ die Wärmeerzeugung pro Zeiteinheit in der Isolierung infolge Selbsterhitzung klein ist. Die so ermittelte Wärmeleitfähigkeit λ , gilt jedoch nur für die mittlere Temperatur genau, bei der sie berechnet wurde.

Findet in dem Isolationsmaterial eine exotherme Reaktion statt, so muß diese zusätzliche Wärme im Gleichgewichtszustand ebenfalls abgeführt werden.

Da noch keine genaueren Kenntnisse vorliegen, nach welchen Gesetzmäßigkeiten die Wärme frei wird, wird die Gl. (1) für die Berechnung herangezogen.

Ist das Temperaturfeld rotationssymmetrisch, so kann der im Kreisring erzeugte Wärmestrom berechnet werden. In einem Ring mit der Höhe 1 cm, der Dicke dx und dem Radius x wird somit der Wärmestrom

$$d\dot{Q}_x = 2\pi x \cdot dx \cdot 1 \cdot A \cdot e^{-\frac{E}{RTx}} \quad (7)$$

frei.

T_x ist hierbei die absolute Temperatur an dem Ort der Isolierung mit dem Radius x . Sie ist abhängig von der Ableitung des erzeugten Wärmestromes aus dem Isolationsmaterial und zusätzlich von A und E . Betrachtet man das Ringelement im stationären Zustand, so ergibt sich, wie auch Bild 3 zeigt, folgendes Gleichgewicht für die Wärmeströme:

Von dem Ringelement $x-1$ wird der Wärmestrom \dot{Q}_{x-1} an das Ringelement x abgegeben. In diesem Element wird der Wärmestrom $d\dot{Q}_x$ erzeugt und zusammen mit dem Wärmestrom \dot{Q}_{x-1} an das Ringelement $x+1$ abgeführt.

Die Differentialgleichung

$$\lambda \left[\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{dT}{dx} \right] + A \cdot e^{-\frac{E}{RT} x} = 0 \quad (8)$$

beschreibt dieses Temperaturfeld.

Die Randbedingungen für $x = \frac{d}{2}$ und $x = \frac{D}{2}$ sind die Temperaturen t_2 und t_3 . Diese Gleichung läßt sich jedoch nicht in geschlossener Form lösen. Aus diesem Grund wurden Versuche durchgeführt, die über die Temperaturverteilung in der Isolation nähere Auskunft geben.

4.2. Versuchsaufbau

Bei dem Versuchsaufbau wurde von der Annahme ausgegangen, daß ein Heißdampfrohr mit Sägespänen isoliert ist und daß keine Wärmeübertragung an der Stirnfläche erfolgt. Bild 4 zeigt schematisch den Versuchsstand.

Die eigentliche Versuchseinrichtung 1, die später noch genauer beschrieben wird, stand in dem Wärmeofen 2. Dieser Ofen hat eine Luftumwälzung durch ein Gebläse. Die Temperaturregelung erfolgt über ein Quecksilber-Kontaktthermometer. Die Heizleistung des Ofens ist in drei Stufen unterteilt, eine Stufe zum schnellen Aufheizen und zwei Stufen zum Konstanthalten der Ofentemperatur. Durch diese Maßnahme wird eine sehr gleichmäßige Temperatur im Ofen erreicht, d.h. an den Einbauteilen ergeben sich minimale Temperaturdifferenzen. Das innere Heizrohr 3 lag im Kreislauf des Umlaufthermostaten 4. Als Wärmeübertragungsflüssigkeit diente Marlotherm S. Das Heizrohr war mit Metallwellschläuchen von 6 mm Innendurchmesser an den Thermostaten angeschlossen.

Mit Thermoelementen wurden die Temperaturen an den eingelegten Ringen und an den Innen- und Außenwänden der Versuchseinrichtung gemessen und auf dem 12-Meßstellen-Kompensationsschreiber 6 registriert.

4.2.1. Versuchsanordnung I

Einen Schnitt durch die Versuchsanordnung I zeigt das Bild 5. Diese Versuchseinrichtung bestand im wesentlichen aus dem Mantelrohr und dem Heizrohr, die beide aus drei Schichten aufgebaut waren. 1, 3, 4 und 6 sind Kupferrohre, zwischen die als Isolierung eine Mischung von Schamottmehl mit Wasserglas gefüllt wurde (2 und 5). Sie diente dazu, jeweils zwischen der inneren und äußeren Wand eine Temperaturdifferenz zu erhalten, mit der die auftretenden Wärmeströme berechnet werden können. Durch das Rohr 4 strömte Heizflüssigkeit. Der Raum zwischen dem Heizrohr und dem Mantelrohr wurde mit Sägespänen von Kiefernholz gefüllt. Die mittlere Dichte der lufttrockenen Sägespäne betrug im gestampften Zustand $1,0 \text{ kg/dm}^3$. In diese Sägespäne wurden die Kupferringe 7 bis 14 mit den in Bild 5 angegebenen Durchmessern eingelegt. Die Thermolemente aus Kupfer-Konstantan-Draht von 0,2 mm Durchmesser wurden an folgenden Stellen angebracht:

Th_1 an der Innenseite des Heizrohres 4, Th_2 an der Außenseite des Rohres 6. Die Meßstellen Th_3 bis Th_{10} waren in der Mitte der Meßringe angelötet. Th_{11} und Th_{12} waren die Meßstellen an der Innenseite und an der Außenseite des Mantelrohres.

4.2.2. Versuchsanordnung II

Der Aufbau der Versuchsanordnung II ist aus Bild 6 zu ersehen. Das Heizrohr 1 bestand hierbei nur aus einem glatten Kupferrohr mit 1,5 mm Wandstärke. Das Mantelrohr war ähnlich wie bei der Versuchsanordnung I aufgebaut. Als Isolationsmaterial wurde hier allerdings Sand verwendet. Statt der 8 Meßringe waren hier nur 2 Meßrohre verwendet worden, die aber die gleiche Länge wie das Heizrohr und die Isolierung des Mantelrohres besaßen. Die Meßstellen Th_1 , Th_2 , Th_3 , Th_4 und Th_5 waren jeweils in halber Höhe der Rohre angebracht. Zwischen den Ringen wurde Sägemehl von Kiefernholz auf eine Dichte von $1,0 \text{ kg/dm}^3$ eingestampft.

4.3. Versuchsdurchführung

Mit den zwei Versuchsanordnungen wurde das Verhalten von luft-trockenen Sägespänen aus Kiefernholz bei höheren Temperaturen hinsichtlich seiner Wärmeproduktion untersucht. Das Sägemehl wurde in beiden Fällen so verdichtet, daß sich in dem Versuchsbehälter eine mittlere Dichte von 1 kg/dm^3 einstellte. Bei konstanter Ofentemperatur und Heizflüssigkeitstemperatur wurde jeweils der Beharrungszustand der Sägemehltemperaturen abgewartet. Die Temperaturen im Ofen und im Heizrohr wurden so eingestellt, daß durch ein Temperaturgefälle zwischen Heizrohr und Ofen ein Wärmefluß von der Mitte nach außen auftrat. Bei verschiedenen Temperaturen Th_1 des Heizrohres und Th_{12} des Mantelrohres (Bild 7) wurde der tatsächliche Temperaturverlauf infolge Wärmeleitung und Selbsterhitzung gemessen und mit dem theoretischen, nur durch Wärmeleitung hervorgerufenen Temperaturverlauf verglichen, der nur von der Geometrie und den Temperaturen Th_2 und Th_{11} abhängig ist. Nach dem Erreichen des Beharrungszustandes wurden die Temperaturen Th_1 und Th_{12} erhöht. Je nach der Temperatursteigerung stellte sich der neue Gleichgewichtszustand nach 30 bis 60 Stunden ein. Die in den Bildern 7 und 8 angegebenen Zeiten beziehen sich auf die gesamte Versuchsdauer der Probe. Um mit kleineren Probenabmessungen die gleichen Ergebnisse wie bei einer starken Isolierung zu erhalten, wurde das Niveau der Umgebungstemperatur, d.h. die Ofentemperatur, höher eingestellt, als dies der normalen Umgebungstemperatur entspricht. Um die gleiche Wärmeabfuhr bei 20°C Umgebungstemperatur wie bei den Versuchen bei 130°C Ofentemperatur zu erhalten, müßte der Außendurchmesser unter Abschätzung der zusätzlichen Wärmeproduktion bei etwa 800 mm liegen. Eine solch starke Isolierung kann erreicht werden, wenn Rohre durch Decken mit einer Isolierung von Sägespänen führen, die ihrerseits noch mit Dämmplatten abgeschlossen sind.

4.4. Meßergebnisse

Die Temperaturen in der Sägemehlfüllung sind in den Bildern 7 und 8 in Abhängigkeit vom Radius aufgetragen. In Bild 7 ist der

Temperaturverlauf bei verschiedenen Temperaturen des Heizrohres und des Mantelrohres aufgetragen, der jeweils mit der Versuchsanordnung I nach Bild 5 ermittelt wurde. Die gestrichelt gezeichnete Kurve gibt den Temperaturverlauf an, wenn in der Isolierung keine Wärme entstehen würde. Die Temperaturdifferenz zwischen der gestrichelten Kurve und der gemessenen Temperaturkurve an einem beliebigen Radius ist ein Maß für den Zusammenhang zwischen der erzeugten Wärme und dem Wärmeleitvermögen der Holzspäne an dieser Stelle. Bei Messungen mit der Versuchsanordnung II ergaben sich Temperaturkurven entsprechend Bild 8. An den Stirnflächen dieser Versuchsanordnung II (Bild 6) wurde über die eingelegten Hülsen ein Wärmestrom von ca. 0,5 cal/sec an die Umgebung abgeführt. Dieser Wärmestrom schwankt entsprechend der Differenz zwischen den Temperaturen der Sägespäne und der Temperatur des Ofens. Trotz gleicher Versuchsbedingungen stiegen die maximalen Temperaturen im Sägemehl bei dieser Anordnung nicht auf die Werte an, wie sie bei der Versuchsanordnung I erreicht wurden. Nach dem Abschluß der einzelnen Versuche wurden die Probenbehälter geöffnet und die Verfärbung der Sägespäne in verschiedenen Schichten fotografiert.

Dabei zeigte sich, daß bei der Versuchsanordnung I eine Selbstentzündung der Sägespäne eingetreten war. Durch das rasche Abkühlen der Probe am Ende der Versuche wurde jedoch eine weitere Verbrennung unterbunden. Die Brandnester befanden sich in einem gewissen Abstand von den Meßringen, wodurch die entsprechend hohen Temperaturen nicht registriert wurden.

Bei der Versuchsanordnung II wurden keine Brandnester beobachtet. Dieser Versuch führte also zu keiner Selbstentzündung der Sägespäne. Eine starke Verkohlung der Sägespäne wurde jedoch in geringem Abstand um das Heizrohr festgestellt (Bild 9).

4.5. Erzeugter Wärmestrom in der Probe

Über den experimentell ermittelten Temperaturverlauf im Gleichgewichtszustand kann die gesamte Wärmeproduktion in der Ebene der Temperaturmeßstellen bei der Versuchsanordnung I berechnet

werden. Dazu muß nur der Wärmedurchgang durch das isolierte Heizrohr und durch das isolierte Mantelrohr bekannt sein. Durch Versuche wurden die Wärmeleit Zahlen für diese Rohre ermittelt. Es ergab sich für das isolierte Heizrohr

$$\lambda_{r_m} = 0,232 \text{ [W/m grad]} \hat{=} 0,199 \text{ [kcal/m h grad]}$$

und für das isolierte Mantelrohr

$$\lambda_{R_m} = 0,186 \text{ [W/m grad]} \hat{=} 0,139 \text{ [kcal/m h grad]} .$$

Mit den gemessenen Temperaturen an der jeweiligen Oberfläche des isolierten Heiz- bzw. Mantelrohres ergibt sich die erzeugte Wärme des Probekörpers bezogen auf 1 m Rohrlänge zu:

$$\dot{Q}_{\text{erz}} = \frac{2\pi\lambda_{r_m}}{\ln(d_a/d_i)} (t'_2 - t_1) + \frac{2\pi\lambda_{R_m}}{\ln(D_a/D_i)} (t'_3 - t_4) \text{ [kcal/m h]} \quad (9)$$

bzw.

$$\dot{Q}_{\text{erz}} = 2\pi \left[\lambda_{r_m} \frac{(t'_2 - t_1)}{\ln(d_a/d_i)} + \lambda_{R_m} \frac{(t'_3 - t_4)}{\ln(D_a/D_i)} \right] \text{ [kcal/m h]} \quad (10)$$

In dieser Gleichung sind:

d_a	der äußere Durchmesser des Heizrohres
d_i	der innere Durchmesser des Heizrohres
D_a	der äußere Durchmesser des Mantelrohres
D_i	der innere Durchmesser des Mantelrohres
t_1	die Temperatur an der Innenseite des Heizrohres
t'_2	die Temperatur an der Außenseite des Heizrohres
t'_3	die Temperatur an der Innenseite des Mantelrohres
t_4	die Temperatur an der Außenseite des Mantelrohres.

Für \dot{Q}_{erz} erhält man, bezogen auf ein Rohr von 1 m Länge, bei einer Temperatur t_4 von $139,5^\circ\text{C}$ und einer Temperatur t_1 , entsprechend der oberen Kurve auf Bild 7, von 176°C folgenden Wert:

$$\dot{Q}_{\text{erz}} = 12,0 \text{ [cal/m s]} \hat{=} 43,2 \text{ [kcal/m h]}$$

oder, auf die Masse der Sägespäne in der Isolierung bezogen,

$$\dot{Q}_{\text{erz}} = 0,134 \text{ [cal/kg s]} \hat{=} 0,483 \text{ [kcal/kg h]}$$

Liegt die Heizrohrtemperatur höher als die Temperatur der Probe, so wird zusätzliche Wärme an das Holz abgegeben. Dieser Wärmestrom fließt mit der erzeugten Wärme durch den Außenmantel wieder ab. Werden die Temperaturdifferenzen vorzeichenrichtig ermittelt, so ergibt sich auch hier der im Probekörper erzeugte Wärmestrom nach Gleichung (10).

Für	$t_4 = 133^\circ\text{C}$	$t'_3 = 134^\circ\text{C}$
	$t_1 = 166^\circ\text{C}$	$t'_2 = 165^\circ\text{C}$,

entsprechend der unteren Kurve auf Bild 7, wird für ein 1 m langes Rohr

$$\dot{Q}_{\text{erz}} = 6,46 \text{ [cal/m s]} \hat{=} 23,3 \text{ [kcal/m h]} .$$

Auf die Masse der Sägespäne in der Isolierung bezogen, ergibt sich

$$\dot{Q}_{\text{erz}} = 0,072 \text{ [cal/kg s]} \hat{=} 0,259 \text{ [kcal/kg h]} .$$

5. EINFLUSS DER UMGEBUNGSBEDINGUNGEN

Erste Versuche haben gezeigt, daß die Größe der Luftzufuhr an die Probe den erzeugten Wärmestrom wesentlich beeinflusst. Bei diesen Untersuchungen wurde Kiefernholz, kompakt und als Sägemehl, in verschlossenen Blechbehältern in dem bereits beschriebenen Ofen erhitzt. Die Behälter hatten einen Durchmesser von ca. 70 mm und eine Höhe von 42 mm. Im Deckel und im Boden waren Röhren von 1,5 mm Innendurchmesser eingelötet, durch die Luft zu- und abgeführt wurde. Um sicher zu sein, daß keine zusätzliche Luft an die Probe gelangte, wurden die Behälter verlötet. Die den Behältern zugeführten Luftmengen wurden durch Abzählen der Blasen in einem Vorgelege mit Paraffinölfüllung ermittelt. Die größte Luftmenge ergab sich mit ca. $80 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Zur Messung der erzeugten Wärme in dem Behälter 1 wurde dieser entsprechend Bild 10, mit Steinwolle 2 isoliert, in einen größeren Behälter 3 gepackt. 4 und 5 sind die Leitungen für die Zu- und Abluft. Aus der Temperaturdifferenz zwischen den Meßstellen Th_1 und Th_2 der Thermolemente an dem inneren und äußeren Behälter konnte nach erfolgter Eichung die Wärmeproduktion der Probe im Beharrungszustand ermittelt werden. Zum Eichern wurde ein Behälter mit den gleichen Abmessungen wie bei den Versuchen verwendet. Der Behälter war jedoch mit einer elektrischen Heizung versehen und mit Sand gefüllt worden. Bei verschieden starker Heizung des Behälters stellten sich bei konstanter Ofentemperatur im Gleichgewichtszustand unterschiedliche Temperaturdifferenzen ein. Aus der gemessenen Heizleistung und der erhaltenen Temperaturdifferenz ergab sich die Eichkurve. Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Eichkurve ist jedoch, daß die Stopfdichte der Steinwolle bei allen Versuchen die gleiche wie beim Eichern ist.

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, daß mit steigendem Luftstrom auch die Wärmeproduktion des kompakten Holzes und der Sägespäne zunimmt.

Bei einer weiteren Steigerung des Luftdurchsatzes, ab etwa $11 \text{ cm}^3/\text{min}$, fällt die Temperatur der Probe wieder ab. Dieser Verlauf der Probertemperatur kommt wahrscheinlich dadurch zu-

stande, daß die Geschwindigkeit des exothermen Prozesses in der ersten Phase, also bei geringer Luftzufuhr, von der Sauerstoffkonzentration um die Probe bestimmt wird. Diese Wärmeproduktion bleibt ab einer gewissen Sauerstoffkonzentration konstant. Steigt die Luftzufuhr weiter an, so wird mit dieser Luft mehr Wärme abgeführt und die Probentemperatur sinkt.

Diese Versuche zeigen deutlich, daß für die genaue Angabe von kritischen Umgebungstemperaturen noch der Einfluß der Luftzufuhr in das Innere der Probe untersucht werden muß.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Kritische Umgebungstemperaturen für Stoffe, die sich selbst erhitzen, haben nur Gültigkeit in Verbindung mit den jeweiligen Einbauverhältnissen. Zu einer Selbstentzündung kann es nur dann kommen, wenn die erzeugte Wärme im Körper größer ist als die Wärme, die an die Umgebung abgeführt werden kann. Daraus ergibt sich der starke Einfluß der Isolierung eines Körpers, in dem exotherme Vorgänge ablaufen, auf seine kritische Umgebungstemperatur. In Versuchen wurde der Temperaturverlauf in der Sägemehlisolierung eines Heizrohres untersucht. Bei verschiedenen Temperaturen des Ofens und der Heizflüssigkeit wurde der produzierte Wärmestrom in den Sägespänen aus Kiefernholz ermittelt. Zwei verschiedene Versuchsaufbauten wurden verwendet. Bei einem Versuch trat bei einer Temperatur von 176°C des Heizrohres eine Selbstentzündung ein. Anschließende Versuche mit Kiefernholz, kompakt und als Sägespäne, ergaben erste Anhaltspunkte, daß mit zunehmendem Luftstrom an die Probe auch die exothermen Vorgänge schneller ablaufen. Ab einer bestimmten Luftmenge allerdings fällt bei weiter steigender Luftzufuhr die Temperatur des Probekörpers wieder ab. Aus diesen Versuchen ist zu ersehen, daß die in den Hauptversuchen erhaltenen Ergebnisse z.Z. noch keine endgültigen Aussagen über die kritischen Umgebungstemperaturen zulassen, da neben den Isolationsverhältnissen auch die Menge der an den sich selbst erhitzenden Stoff und in sein Inneres zugeführten Luft einen maßgebenden Einfluß auf die Größe des im Holz erzeugten Wärmestroms ausübt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Magnus, G. und Werthenbach, H.G.:
Kritische Beurteilung der Verfahren zur Untersuchung
der Selbstentzündungsneigung einschließlich der Unter-
suchung über die trockene Destillation von Holz.
AGF-Bericht Nr. 8, 1966.
- [2] Seeger, P.G. und Werthenbach, H.G.:
Über die Selbstentzündung von Holz.
VFDB-Zeitschrift, 16 (1967), Nr.4, S. 131-139.
- [3] Gross, D. und Robertson, A.F.:
Self-ignition temperatures of materials from
kinetic-reaction datas.
Journal of Research of the National Bureau
of Standards, 61 (1958), Nr.5, S. 413-417.
- [4] Kinbara, T. und Kanasaki, A.:
Spontaneous ignition of wooden materials heated
for a long time at a low temperature.
Bulletin of The Fire Prevention Society of Japan,
16 (1967), Nr.2, S. 9-15.
- [5] Virtala, V.:
Entzündung durch Wärmestrahlung und langwährende
Erhitzung auf niedrige Temperaturen.
VFDB-Zeitschrift, 2 (1953), Nr.1, S. 1-7.

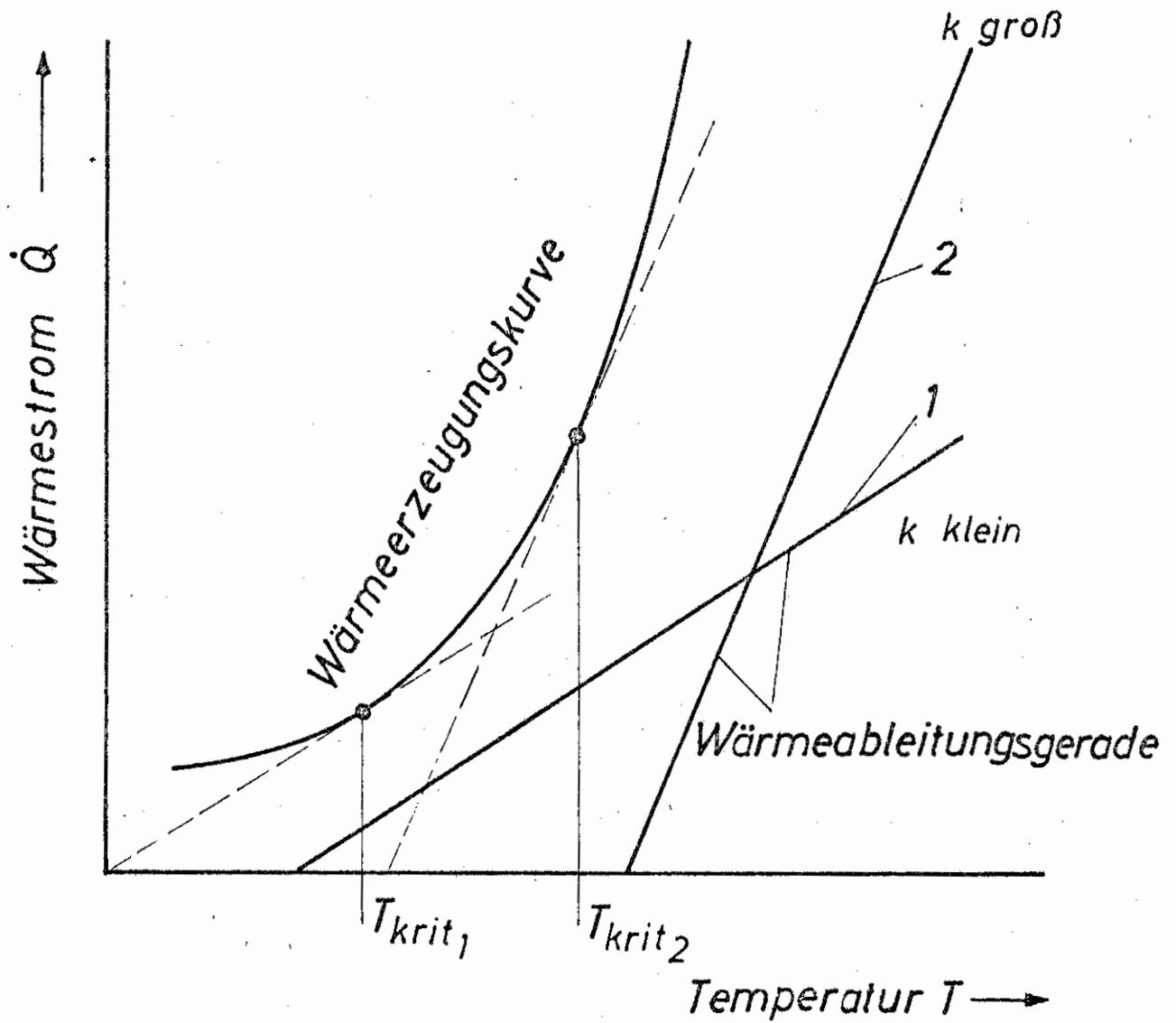


Bild 1. Kritische Umgebungstemperaturen bei verschiedener Isolation

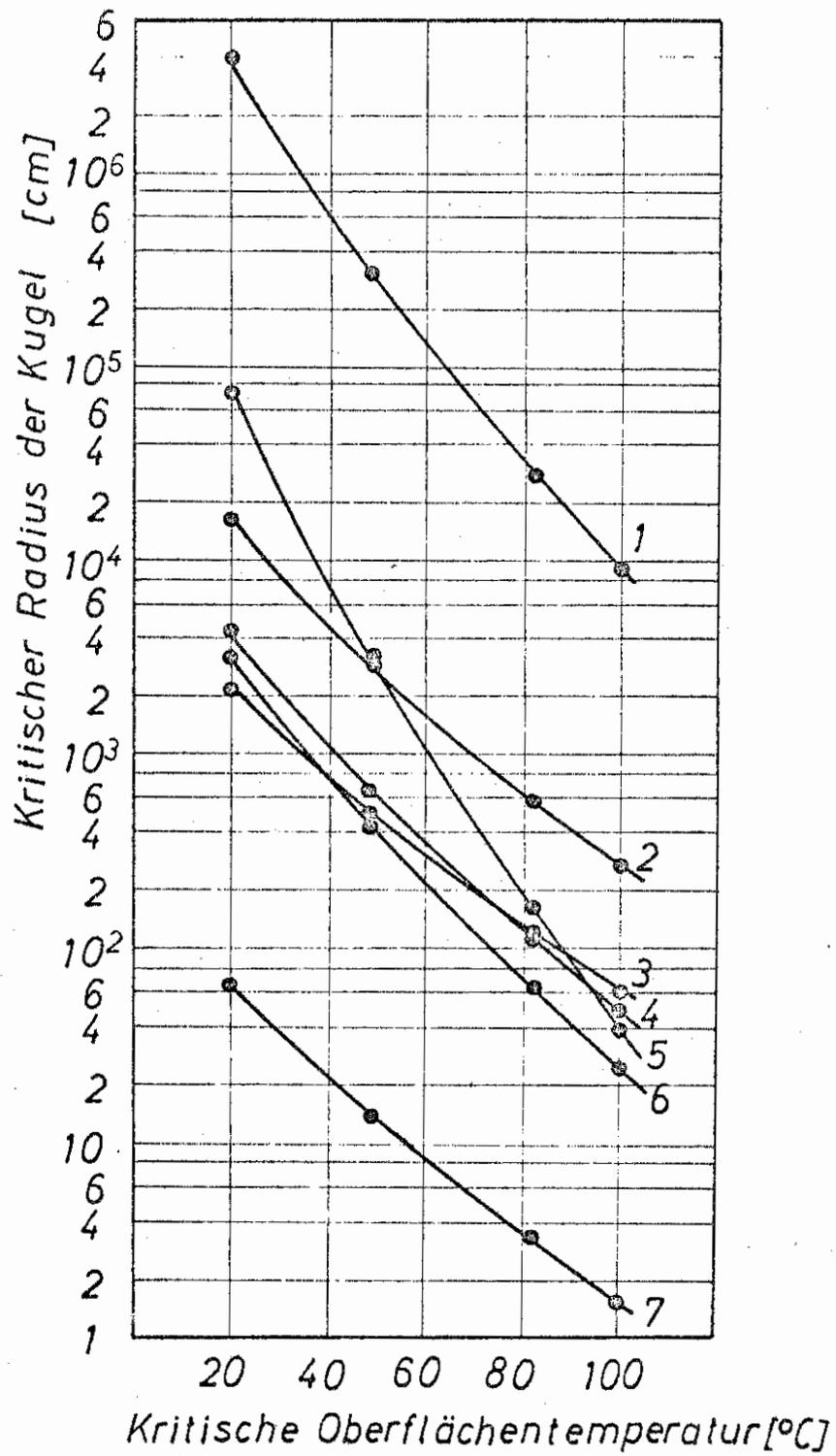


Bild 2. Kritische Oberflächentemperatur kugelförmiger Proben verschiedener Größe nach [3]

- | | |
|-------------------|-----------------------------|
| 1 Rohbaumwolle | 5 Nitrozellulose |
| 2 Gummi | 6 Schaumgummi |
| 3 Sugar-Pine | 7 Leinölgetränkte Baumwolle |
| 4 Holzfaserplatte | |

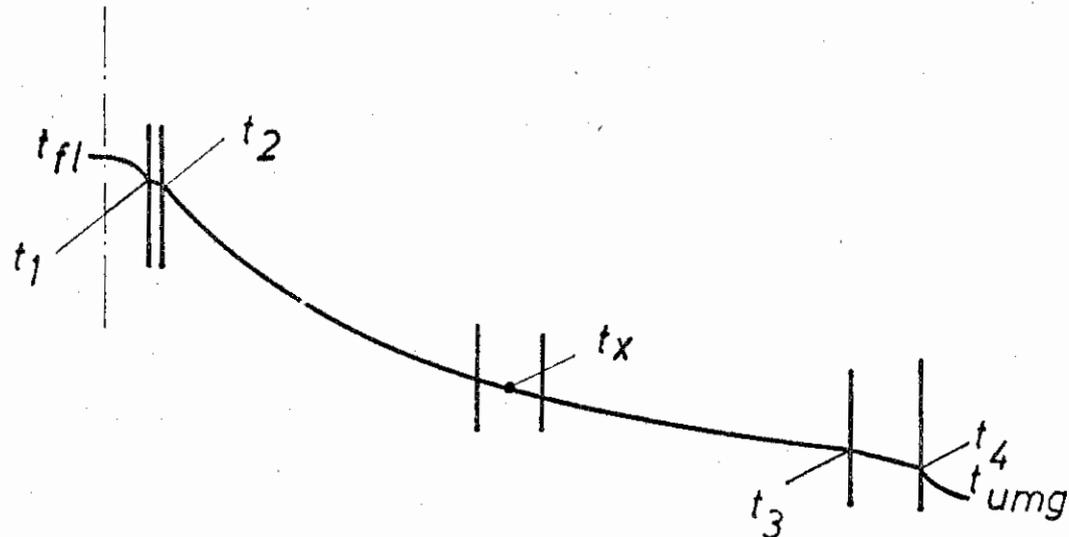
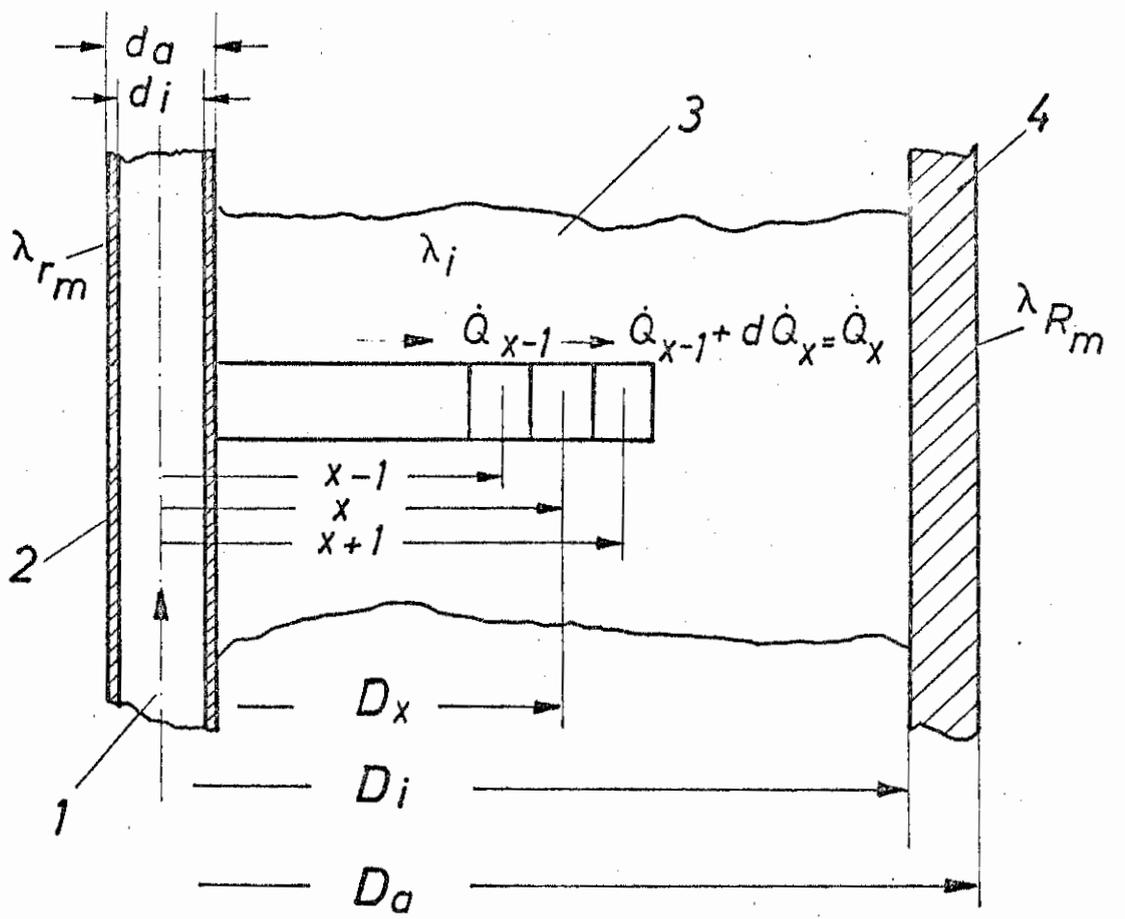


Bild 3. Wärmefluß in der Isolation

- | | | | |
|---|-----------------|---|------------|
| 1 | Heizflüssigkeit | 3 | Isolation |
| 2 | Heizrohr | 4 | Mantelrohr |

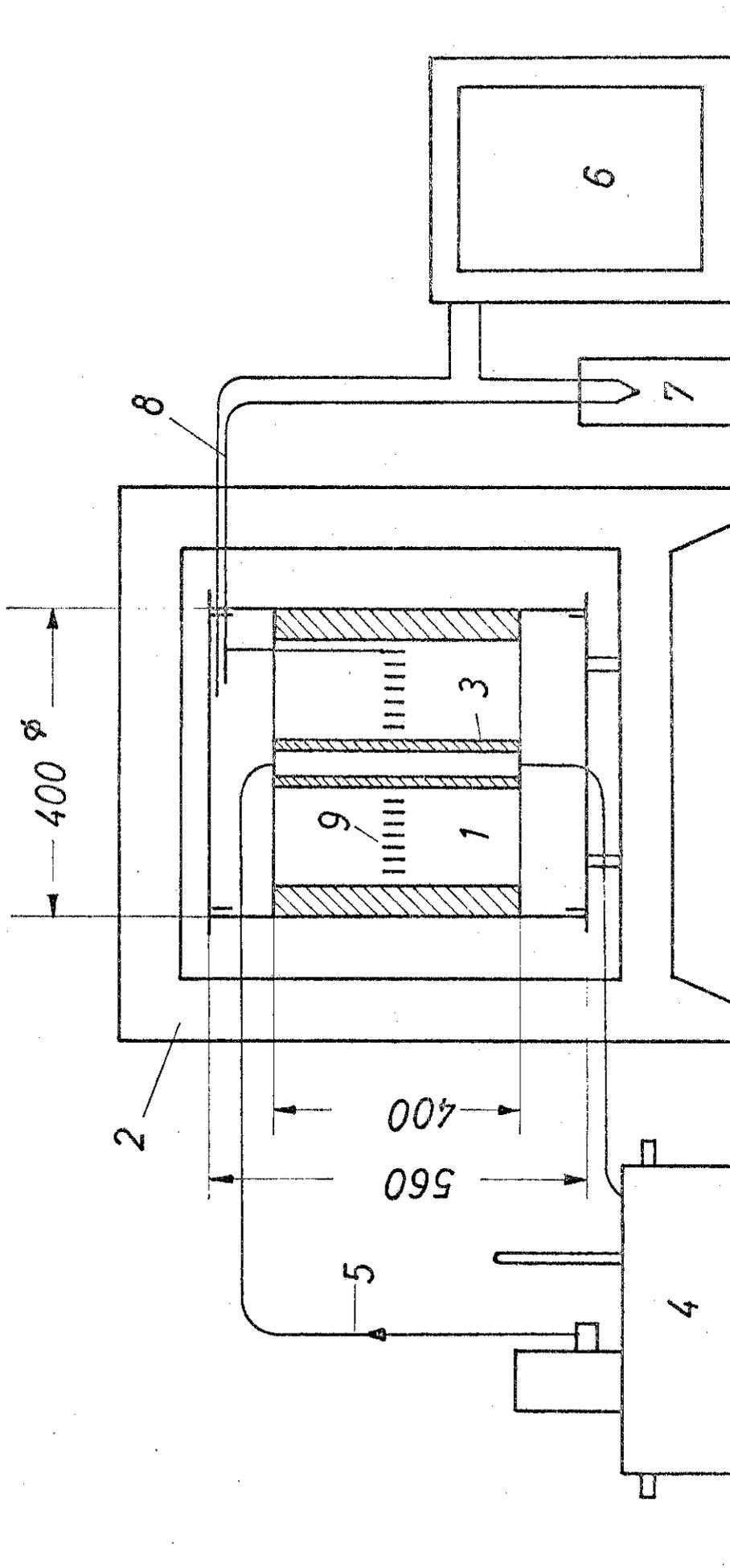
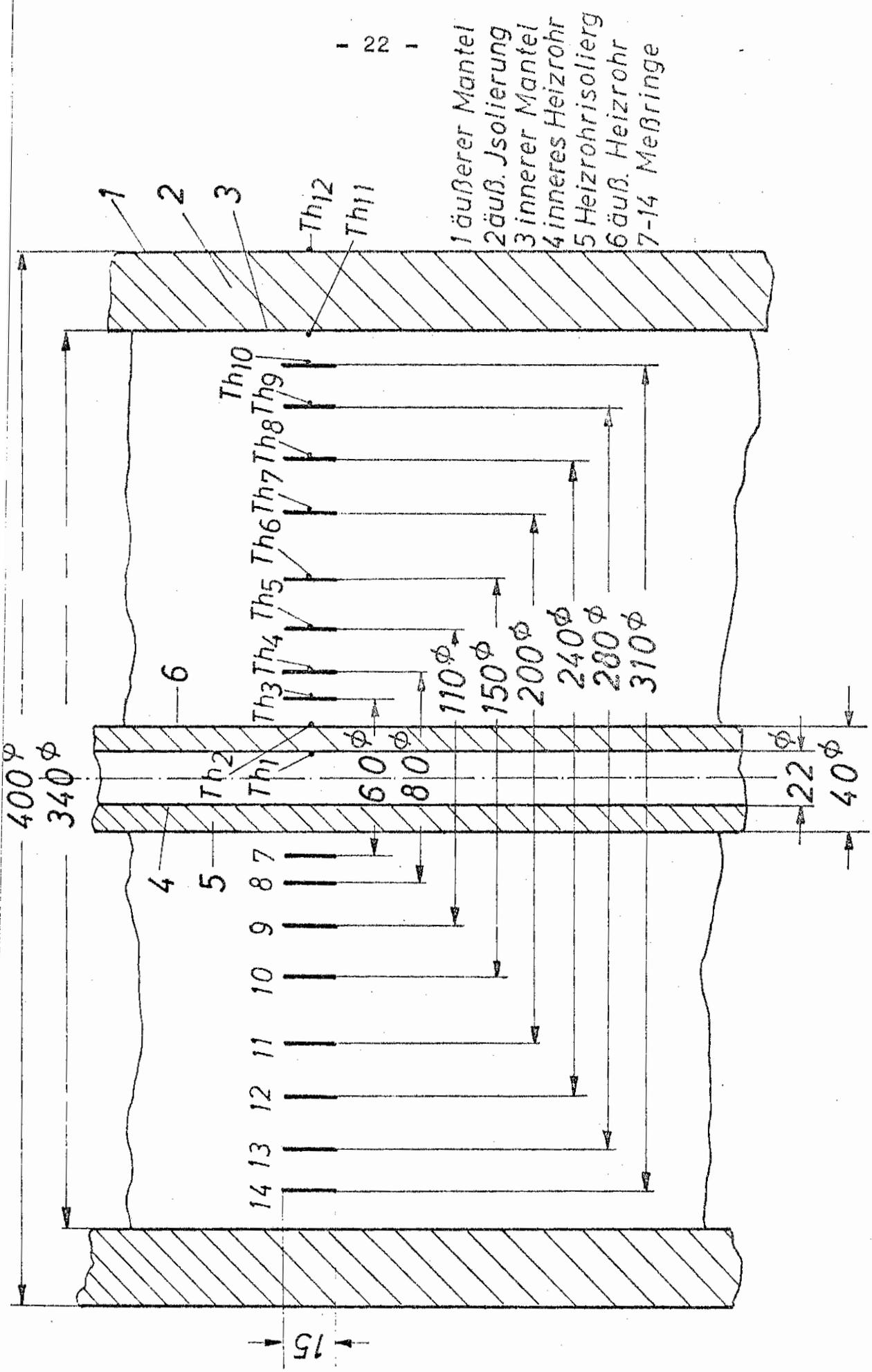


Bild 4. Versuchsaufbau

- | | | |
|-------------|--------------------|-------------------|
| 1 Holzprobe | 4 Umlaufthermostat | 7 Nullstelle |
| 2 Ofen | 5 Zuleitung | 8 Thermoleitungen |
| 3 Heizrohr | 6 12-Pkt.-Drucker | 9 Meßrinne |



- 1 äußerer Mantel
- 2 äuß. Isolierung
- 3 innerer Mantel
- 4 inneres Heizrohr
- 5 Heizrohrisoliert
- 6 äuß. Heizrohr
- 7-14 Meßringe

Bild 5. Lage der Meßstellen bei der Versuchsanordnung I

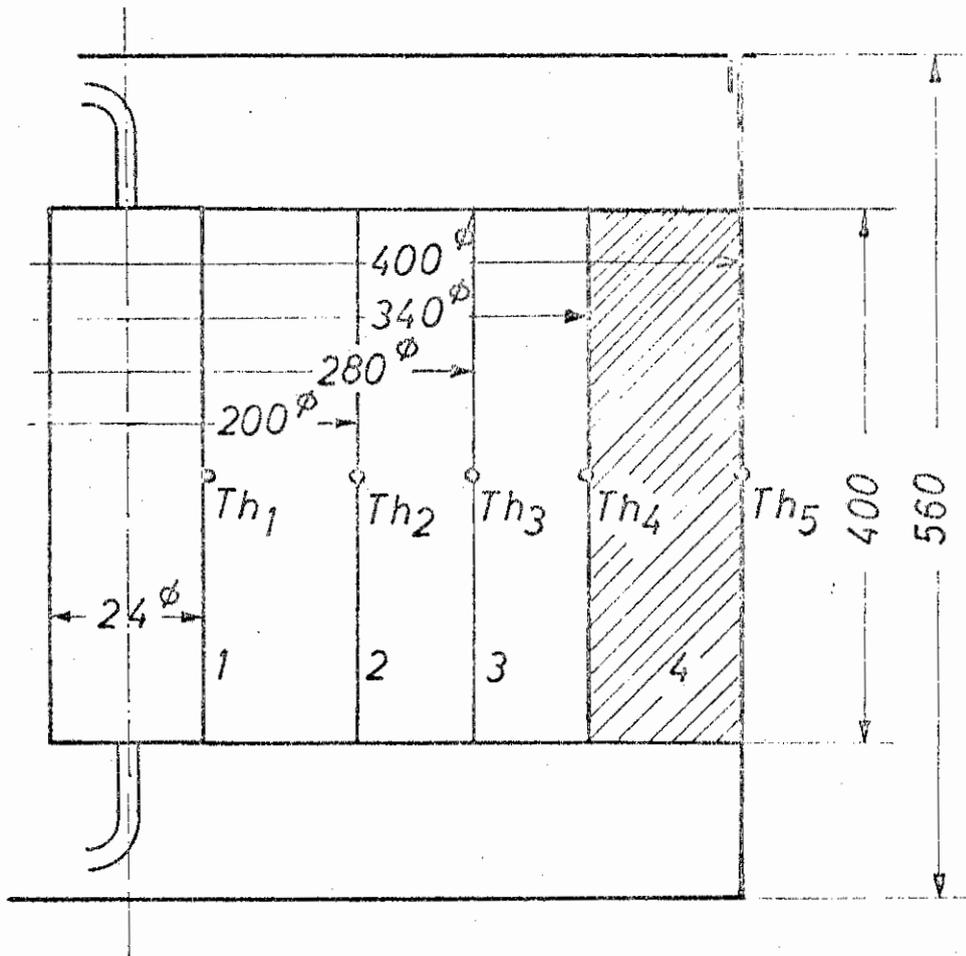


Bild 6. Schnitt durch die Versuchsanordnung II

- | | |
|--------------|--------------|
| 1 Heizrohr | 3 2. Meßrohr |
| 2 1. Meßrohr | 4 Mantelrohr |

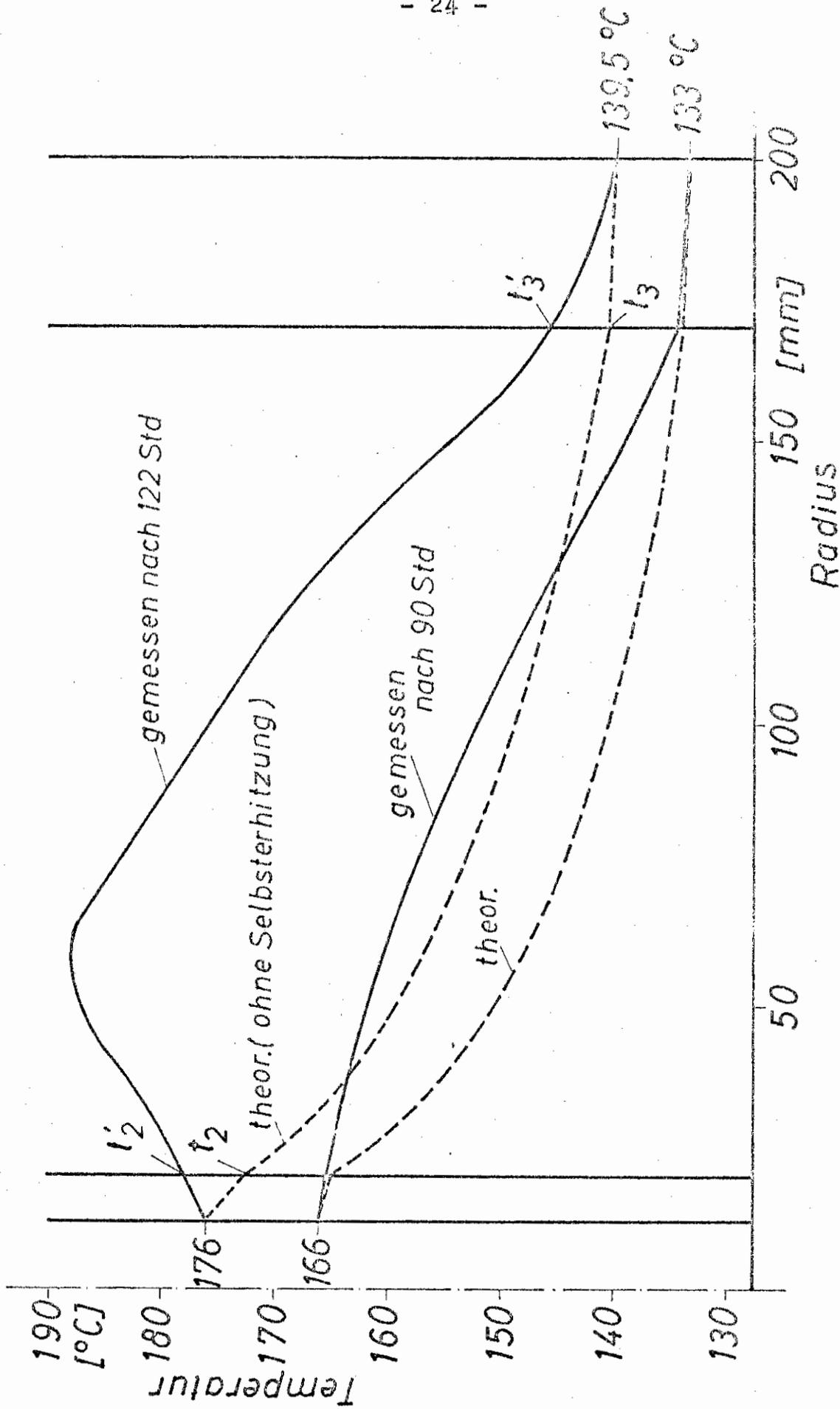


Bild 7. Radialer Temperaturverlauf bei zwei verschiedenen Umgebungstemperaturen (Versuchsanordnung I)

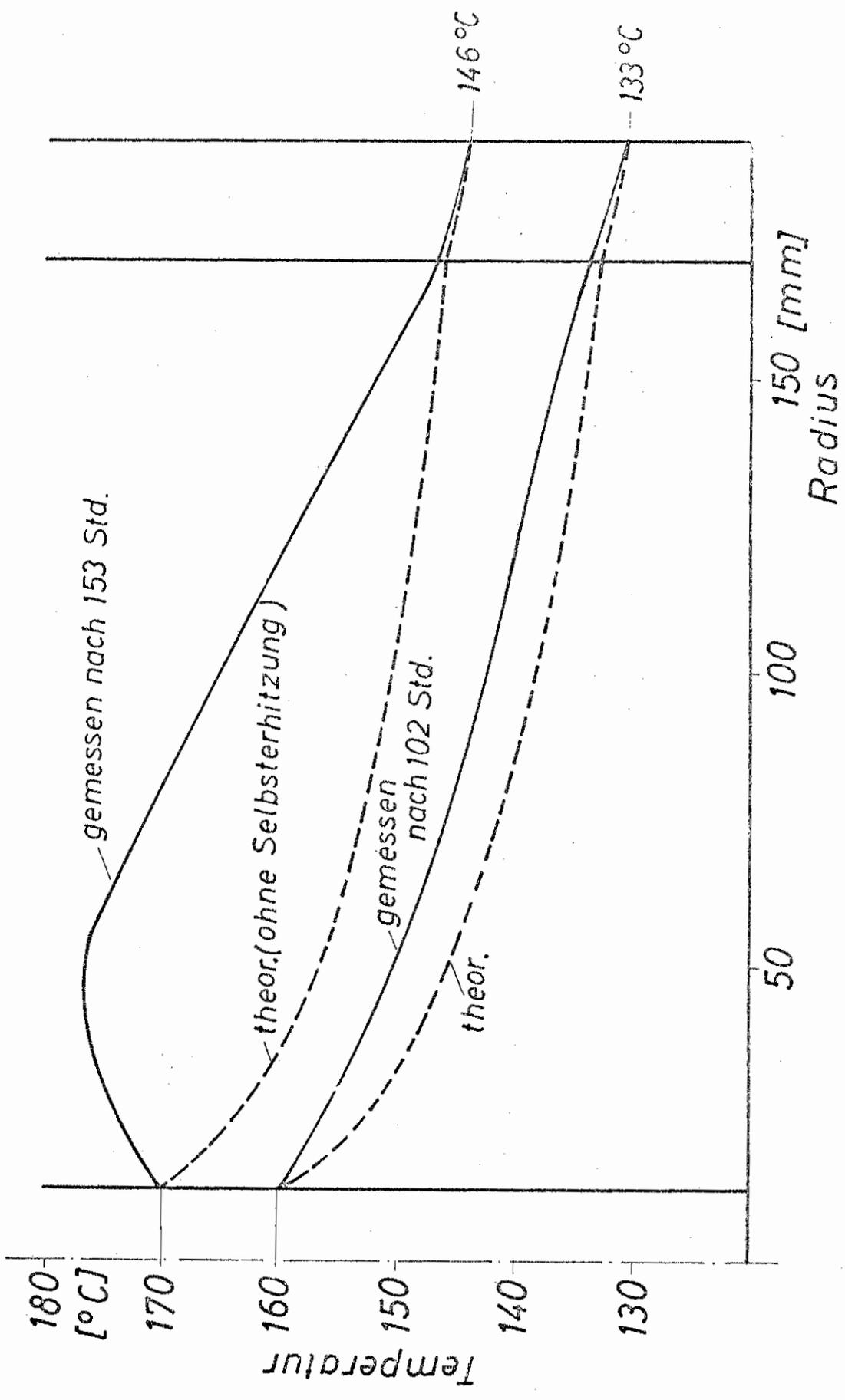


Bild 8. Radialer Temperaturverlauf bei zwei verschiedenen Umgebungstemperaturen (Versuchsordnung II)

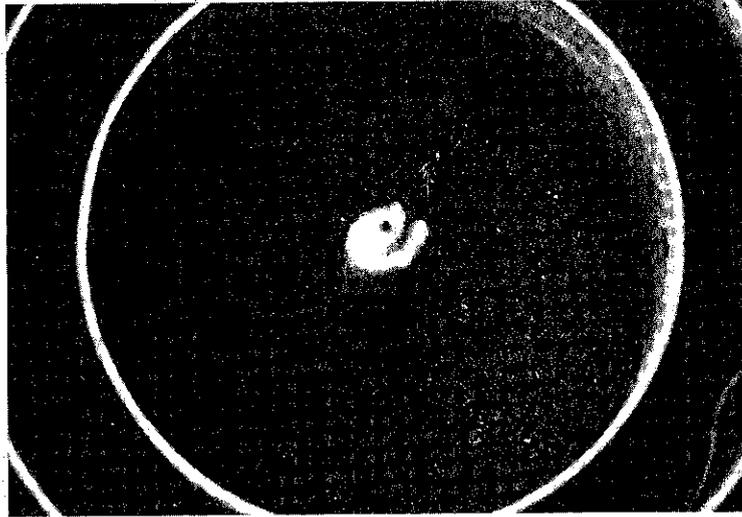


Bild 9. Ansicht der Probenoberfläche nach dem Versuch in
Höhe der Temperaturmeßebeine (Obere Schichten abgetragen)

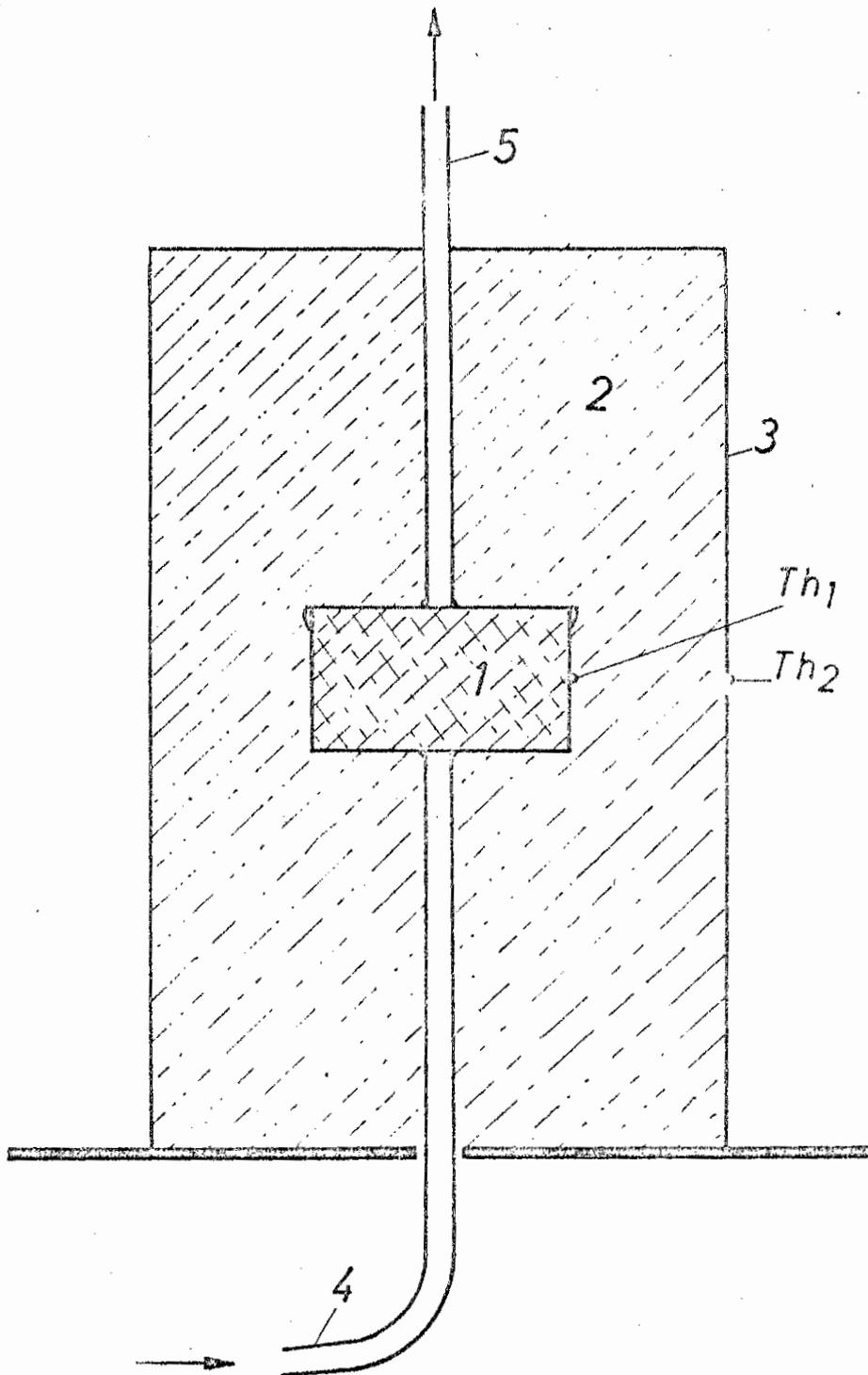


Bild 10. Versuchseinrichtung zur Bestimmung des Einflusses der Luftzufuhr auf die Wärmeentwicklung

- | | |
|--------------------------|-----------------|
| 1 Behälter mit Holzprobe | 4 Luftzuleitung |
| 2 Steinwollisolierung | 5 Luftableitung |
| 3 äußerer Behälter | |