

AGF

BERICHTE

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

Modellbrandversuche zur Bestimmung des Brand-
ablaufs von Feststoffbränden

27

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER LANDESDIENSTSTELLEN
FÜR FEUERSCHUTZ IN DEN BUNDESLÄNDERN (AGF)

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

AGF

Forschungsbericht Nr. 27

Modellbrandversuche zur Bestimmung des Brand-
ablaufs von Feststoffbränden

von

Dipl.-Ing. Dieter Brein

und

Dipl.-Ing. Hermann Schatz.

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
März 1975

FA.Nr. 61 (4/72)

Modellbrandversuche zur Bestimmung des Brandablaufs
von Feststoffbränden

Dipl.-Ing. Dieter Brein und

Dipl.-Ing. Hermann Schatz

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe

An neun Anordnungen von aus quadratischen Kiefernstäben unterschiedlicher Dicke und Länge aufgebauten Holzkrippen mit unterschiedlichen Porositäten wurden Messungen zur Bestimmung des Abbrandverlaufes dieser Krippen und Temperaturmessungen innerhalb und oberhalb der Krippen unter besonderer Berücksichtigung der Anfangsphase durchgeführt. Während die Geometrie der Krippen verändert und an zwei verschiedenen Zündorten gezündet wurde, blieb die Holzfeuchte durch Klimatisierung konstant. Die Außentemperatur und -feuchte konnte im Versuchsraum nicht beeinflusst werden. Um die Reproduzierbarkeit der Meßwerte überprüfen zu können wurde jeder Versuch wiederholt.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt, daß die Abbrandgeschwindigkeit von der Größe der Kanalquerschnitte und dem Ort der Zündquelle mehr beeinflusst wird als von der Stablänge. Die Größe der Kanalquerschnitte bestimmt die Menge der dem Brandherd zugeführten Verbrennungsluft und damit die Intensität des Frischgas-Abgas-Austausches. Daher wird eine maximale Abbrandgeschwindigkeit für Kanaldurchmesser erreicht, die ein- bis dreimal so groß sind wie die Stabdicke. Werden die Kanalquerschnitte noch größer, so fällt die Abbrandgeschwindigkeit wieder ab. In diesem Bereich hängt die Größe der Abbrandgeschwindigkeit davon ab, wie schnell die Flamme sich horizontal ausbreiten kann.

Die Temperaturmessungen führten zu Aussagen über die Geschwindigkeit der horizontalen Brandausbreitung quer durch die Krippen.

Aus der Bestimmung des zeitlichen Temperaturgradienten im Bereich der Temperaturen, bei denen die Pyrolysereaktionen ablaufen, erhält man eine Größe für die Geschwindigkeit der Entzündung eines Einzelkanals.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. LITERATUR	3
3. VERSUCHSPROGRAMM	3
4. VERSUCHSAUFBAU	6
4.1. Brandraum	6
4.2. Bestimmung des Abbrandes	6
4.3. Temperaturmessung	7
5. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	8
6. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION	10
6.1. Massenverlust und Abbrandgeschwindigkeit	10
6.1.1. Einfluß der Stablänge auf die Abbrandgeschwindigkeit	12
6.1.2. Einfluß des Ortes und der Größe der Zündquelle	13
6.1.3. Einfluß der Stabdichte auf die Abbrandgeschwindigkeit	14
6.1.4. Einfluß der Kanalgröße auf die Abbrandgeschwindigkeit	15
6.2. Temperaturverlauf	15
7. ZUSAMMENFASSUNG	17
8. FORMELZEICHEN	19
9. LITERATURVERZEICHNIS	20
10. ANHANG	21
10.1. Tabellen	21
10.2. Bilder	22

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Die Kenntnis des Ablaufmechanismus von Feststoffbränden wie z.B. von Bränden von Holz oder anderen Feststoffen ist für die Brandforschung und -bekämpfung von großem Interesse. Die interessierenden Schadenfeuer beschränken sich nicht allein auf Waldbrände oder Brände von einzelnen Gebäuden, sondern können sich auf ganze Gebäudekomplexe ausdehnen und große Verluste, nicht zuletzt an Menschen, herbeiführen.

Viele verschiedene Einflußgrößen wirken auf den Brandablauf ein. Eine der wichtigsten neben der Geometrie des Brandobjekts und seiner Ausdehnung in Bezug auf die nähere - brennbare oder nicht brennbare - Umgebung sind die Zufuhrmöglichkeiten von Verbrennungsluft sowie die Abführung des Abgases. Die vielen Variationsmöglichkeiten dieser Einflußgrößen in Bezug auf Gebäude zeigen schnell die Unmöglichkeit auf, etwa durch Versuche im Maßstab 1:1 die Wirkung der Einflußgrößen auf den Brandablauf zu untersuchen, nicht zuletzt aus finanziellen Erwägungen. Eine Klassifizierung aller aufgetretenen Brände in bezug auf allgemeine Rückschlüsse auf das Brandrisiko anderer Objekte ist zu unsicher.

Die mit der Problematik befaßten Stellen gingen im Bewußtsein der oben angedeuteten Schwierigkeiten dazu über, den Ablauf von Feststoffbränden im Modell zu untersuchen, einem Modell, das nicht allein eine Beobachtung des Brandablaufes gestattet sondern auch das Aufstellen einer Systematik ermöglicht. Es handelt sich hier um ein Modell, das sowohl eine Variation der Brandlast als auch der Umgebung dieser Brandlast gestattet. Dieses Modell zur Untersuchung von Feststoffbränden, die in Modellräume eingeschlossen sind, wurde bereits bei [1] und [2] eingehend beschrieben. Es handelt sich hierbei im wesentlichen um Holzkrippen, bei denen Höhe, Grundfläche und Porosität variiert wurden. Die umgebenden Modellräume waren mit brennbarem oder nicht brennbarem Material ausgekleidet. In einer Wand eines solchen Modellraumes war eine in Breite und Höhe variierbare Öffnung vorhanden, um den Luft-Abgas-Austausch zu simulieren.

Im Rahmen zweier internationaler Forschungsprogramme wurden die Arbeiten von insgesamt 8 bzw. 10 Instituten in aller Welt zu einem großen Versuchsprogramm koordiniert, das Mitte bis Ende der Sechziger Jahre durchgeführt wurde. Unter Mitwirkung an diesem Versuchsprogramm entstanden auch die vorhin erwähnten Arbeiten [1] und [2], bei denen vollentwickelte eingeschlossene [1] und im Anfangstadium befindliche eingeschlossene [2] Feststoffbrände untersucht wurden. Die Auswertung aller Versuche lag in Händen der Fire Research Station in Borehamwood in England. Eine zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der einzelnen Institute, die in Borehamwood [3] angefertigt wurde, zeigte, daß die Versuchsergebnisse gerade in der Anfangsphase des Brandes besonders stark streuten. Diese Unterschiede wurden darauf zurückgeführt, daß Kenntnisse über den Abbrand einer einzelnen als Brandlast verwendeten Holzkrippe besonders in der Anfangsphase weitgehend fehlen.

So fehlen unter anderem Messungen des Temperaturverlaufes im Inneren der Krippe, d.h. in ihren vertikalen Kanälen, besonders bei Zündbedingungen, die denen der eingeschlossenen Brände entsprechen. Eine genügende Anzahl von Versuchen, die hierzu Meßergebnisse liefern, kann dazu dienen mithilfe daraus entwickelter empirischer Formeln oder schließlich mittels Modellrechnung, sowohl Brandrisiken wie auch Abbrandverhalten von beliebigen Materialien und Materialanordnungen vorher zu bestimmen und damit das Brandrisiko bereits bei der Konstruktion zu verringern.

Ein weiterer Grund für die Untersuchung frei brennender Krippen ist die Tatsache, daß solche Krippen in zunehmendem Maße als Modellbrandobjekt zur Untersuchung geeigneter Löschmittel und -maßnahmen eingesetzt werden. Die Beurteilung der Löschwirkung ist aber nur dann auch exakt, wenn sie von der vergleichenden Beurteilung zu quantitativen, reproduzierbaren Ergebnissen gelangt.

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse von Temperatur-

und Abbrandgeschwindigkeitsmessungen von Holzkrippen mitgeteilt, deren Größe, Porosität und Stabdurchmesser variiert wurden.

2. LITERATUR

Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen des Abbrandverhaltens von Holzkrippen lag bisher auf der Beschreibung der Abbrandgeschwindigkeit solcher Krippen in Abhängigkeit von Geometrie und physikalischen Eigenschaften des Materials. Die Untersuchungen von Gross [4] hatten zum Ergebnis, daß im wesentlichen zwei Arten des Abbrandverhaltens unterschieden werden können. Die Unterscheidung ist in der Porosität der Krippe begründet. Gross fand, daß sich Krippen mit wachsenden Kanalgrößen ab einer bestimmten Kanalgröße im Abbrandverhalten nicht wesentlich unterscheiden. Diesen Bereich nannte er den der lockeren Packung im Gegensatz zur dichten Packung, wo bei geringer werdender Porosität die Abbrandgeschwindigkeit ebenfalls abnimmt.

Darauf basierend und aufgrund eigener Messungen entwickelte Block [5] für beide Fälle des Verhaltens mittels der Sätze von der Energie-Massen- und Impulserhaltung und weiterer Annahmen über die Strömung in den Kanälen einer Krippe Gleichungen, die das Abbrandverhalten von Krippen in Abhängigkeit von der Geometrie und den physikalischen Eigenschaften von Holz beschreiben. Diese Gleichungen gelten jedoch nur für den Bereich des Brandes, in dem bereits nahezu die Hälfte der Substanz verbrannt ist. Sie können somit nicht den gesamten Abbrandverlauf erfassen, vor allem nicht den Entstehungsbrand, dessen mathematische Erfassung weitere Voraussetzungen erfordert.

3. VERSUCHSPROGRAMM

Es wurden Holzkrippen untersucht, die aus verschiedengroßen Stäben zusammengesetzt wurden. Es wurden Kiefernstäbe mit den

Abmessungen 2 cm x 2 cm x 26 cm, 2 cm x 2 cm x 42 cm und 4 cm x 4 cm x 52 cm verwendet. Die Dichte der aus einer Lieferung stammenden, astreinen Kiefernstäbe betrug 0,5 bis 0,54 g/cm³. Daraus wurden 9 Krippenarten mit teilweise verschiedenen Porositäten angefertigt. Dabei wurden bei der Verbrennung an 11 bzw. 12 Stellen die Temperaturen in vertikalen Kanälen der Krippe gemessen sowie die Abnahme des Gewichts der verbrennenden Krippe festgestellt.

Die Versuche wurden in einer der Forschungsstelle für Brandschutztechnik zur Verfügung stehenden Versuchshalle durchgeführt. Lufttemperatur und Luftfeuchte der Umgebung des Versuchsstandes konnten nicht variiert werden. Sie waren von der Wetterlage abhängig. Damit konnte auch die Einwirkung dieser Größen auf das Abbrandverhalten nicht untersucht werden.

Die Kiefernstäbe wurden in einer Klimazelle bei 23 °C und 50 % Luftfeuchte (Normalklima nach DIN 50014) klimatisiert. Dabei stellt sich eine Holzfeuchte von 9 % ein, die während der Versuche beibehalten wurde.

Um die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse überprüfen zu können, wurde jede Versuchskombination zweimal gemessen.

Die Zündung der Krippe erfolgte auf einheitliche Weise, jedoch an verschiedenen Orten. Verwendet wurde eine aus Blech gefertigte Zündwanne mit den Maßen 5 cm x 5 cm x 1 cm, die mit 5 ml Brennspritus gefüllt wurde. Die Zündwanne wurde bei jeder Stabkombination der Holzkrippen bei zwei Versuchen im Schnittpunkt der Flächendiagonalen und bei zwei weiteren Versuchen an einer Ecke an der Unterseite postiert. Damit wurde eine Zündung eines Objektes vom Rand aus und von der Mitte aus ähnlich wie bei den beiden Forschungsprogrammen [1,2] simuliert. Andere Autoren [4,5] nahmen die Zündung in anderer Weise vor. Bei [4] wurden die Krippen mittels einer Zündwanne gezündet, die 1/4 der Grundfläche der Krippe einnahm und deren Diagonalschnittpunkt mit dem der Krippe zusammen fiel. Bei [5] wurde die Zündung in der Art vorgenommen,

daß die Zündwanne größer als die Grundfläche der Krippe war. Auf weitere Einzelheiten wird noch in Abschnitt 4 eingegangen werden.

Die Größe der Kanäle wurde so gewählt, daß ein Vergleich mit den Krippenversuchen aus der Literatur möglich wurde. In der Tabelle 3-1 findet man die Zusammenstellung der Krippenkombinationen, wobei die Flächen A_s , A_v , a_s und a_v gemäß der Gross'schen Definition berechnet wurden.

Die Flächen a_s und a_v sind die innere Oberfläche und die Querschnittsfläche eines einzelnen Kanals

$$a_s = 4 s h_c \quad (1)$$

$$a_v = s^2 \quad (2)$$

und die Flächen A_s und A_v sind die innere Oberfläche und die Querschnittsfläche aller Kanäle einer Krippe

$$A_v = (n - 1)^2 a_v \quad (3)$$

$$A_s = 2 n b (N (2 L + b) - b n (N - 1)) - nbL \quad (4)$$

Die Bedeutung der Formelzeichen kann im Abschnitt 8 entnommen werden.

Wie bereits bei 1 und 2 werden die Krippen einheitlich nach folgendem Schema klassifiziert: $(b/s/L)$. Dabei bedeutet z.B.

$$\begin{aligned} (2/\frac{1}{3}/21): & \text{ Krippe mit } b = 2 \text{ cm} \\ & s = \frac{1}{3} b = 0,67 \text{ cm} \\ & L = 21 b = 42 \text{ cm} . \end{aligned}$$

Die Höhe der Krippe betrug einheitlich $8 b$, d.h. 16 cm bzw. 32 cm. Die Stäbe der Krippe wurden abweichend von früheren

Versuchen an den Kreuzungspunkten nicht geleimt, sondern an den peripheren Kreuzungspunkten mit Buchenrundhölzern von 6 mm \varnothing gedübelt, um etwaige Einflüsse der Leimsubstanz auf die Durchzündung der Krippe zu unterbinden. Überdies sind die Krippensorten mit Angabe der Zündquelle auf den Bildern 3-1 bis 3-7 dargestellt. In diesen Bildern sind auch die Positionen der einzelnen Thermoelemente eingetragen.

4. VERSUCHSAUFBAU

Die Versuche wurden in einer geschlossenen Halle durchgeführt, um den Einfluß von Luftbewegungen auszuschließen.

4.1. Brandraum

Der Brandraum befand sich im Erdgeschoß der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik. Der Versuchsstand war direkt unter einer der in der Decke zum 1. Obergeschoß vorhandenen Öffnungen mit einem Durchmesser von 2,9 m aufgebaut, damit die Rauchgase ungehindert in einen größeren Raum abziehen konnten. Die Zufuhr von Verbrennungsluft war nicht gehindert, da der Versuchsstand nicht vom übrigen Erdgeschoß abgetrennt war.

4.2. Bestimmung des Abbrandes

Zur Messung der Abbrandgeschwindigkeit befand sich die jeweils zu untersuchende Holzkrippe auf einer waagrechten Platte, die auf ein aus 3 Doppel-T-Trägern bestehendes gleichschenkliges Dreieck aufgelegt war. Die Ecken des Dreiecks stützten sich gegen drei Biegekraftaufnehmer ab. Im Bild 4-1 ist diese elektromechanische Waage skizziert. Die Dehnungsmeßstreifen der Aufnehmer sind mit einem Abgleichwiderstand in eine Wheatstone'sche Vollbrücke geschaltet um das Taragewicht zu

kompensieren. Vor jeder Messung wird die Brückenspannung durch Veränderung von Speisespannung und Abgleichwiderstand so eingestellt, daß der Abfall der Spannung vom zuerst eingestellten Wert auf Null einer bestimmten Masse, z.B. 500 g oder 2 kg entspricht. Der Wert der Brückenspannung wird dabei praktischerweise so gewählt, daß Vollausschlag am Schreiber = 100 Skalenteile dieser Masse. Die während des Versuches auftretende kontinuierliche Spannungsänderung wird nach einer Verstärkung im Gleichspannungsverstärker und Glättung des Signals mit einem RC-Tiefpass auf einem Linienschreiber registriert. Die Spannungsänderung ist der Gewichtsänderung direkt proportional.

Sobald während einer Messung die Anzeige des Linienschreibers auf den Wert 0 abgefallen ist, wird durch Nachlegen eines entsprechenden Gewichtssteines auf die die Krippe tragende Platte (vgl. Bild 4-1) die Anzeige wieder auf 100 Skalenteile gebracht. Dies wiederholt sich so oft, bis die Krippe abgebrannt ist bzw. der Versuch beendet wird. Man erreicht durch dieses Verfahren eine höhere optische Auflösung des Meßsignals für die Auswertung.

Da die Wägeeinrichtung sehr empfindlich auf geringfügige Störungen, z.B. auch auf die Bodenvibrationen aufgrund nahe an der Versuchshalle vorbeifahrender Züge anspricht, ist eine Glättung dieser Vibrationen mit Hilfe eines RC-Tiefpasses unumgänglich. Aus der Messung der zeitlichen Gewichtsabnahme lassen sich die gewünschten Abbrandkennwerte berechnen.

4.3. Temperaturmessung

An zwölf Stellen in und oberhalb der Krippe wurden Cromel-Alumel-Mantel-Thermoelemente mit 0,5 mm Außendurchmesser zur Messung der Kanalinnen- und Rauchgastemperaturen angeordnet. Die Position der Thermoelemente geht aus den Bildern 3-1 bis 3-7 hervor.

11 dieser Thermoelemente wurden an einen 12-Punktendrucker angeschlossen, der alle 2 Sekunden das Signal eines Thermoelements registriert. Das bedeutet, daß jedes Thermoelement nach 24 Sekunden wieder abgefragt wird. Da die einzelnen Thermospannungen nicht über die ganze Zeit integriert werden, erhält man keine Mittelwerte. Da das Registriergerät jedoch auch nicht beliebig rasch auf starke Temperaturgradienten anspricht, erhält man auch keine Momentanwerte im Falle steilen Temperaturanstiegs, da die Trägheit von Thermoelement und Registriergerät immer etwas kleinere Werte liefert. Um ein Maß für die tatsächlich mögliche Schwankungsbreite zu bekommen, wurde das 12. Thermoelement an einen schnellschreibenden Linienschreiber angeschlossen.

Die Thermoelemente sind wie folgt durchnummeriert:

T1 bis T4 im Kanal über dem Diagonalschnittpunkt der Grundfläche, T1 oben zur Rauchgastemperaturmessung, danach T2, T3 und T4 nach unten in den jeweils in den Bildern 3-1 bis 3-7 angegebenen Positionen. Entsprechendes gilt für die Thermoelemente T5 - T8 im Kanal zwischen Mitte und Ecke und T9 - T11 an der Ecke. T12 befand sich stets in gleicher Höhe wie T1, nur über dem Kanal der Thermoelemente T5 bis T8. T12 ist in den Bildern 3-1 bis 3-7 durch ein unringtes Kreuz gekennzeichnet.

5. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

In der Tabelle 3-1 sind die Krippenanordnung, die Raumtemperatur und die Raumfeuchte sowie der Ort der Zündung für die einzelnen Versuche aufgeführt.

Die Versuche liefen im wesentlichen planmäßig ab. Erforderliche Änderungen vom Versuchsplan werden im folgenden nur kurz für die einzelnen Krippenanordnungen beschrieben.

2/1/13:

Bei dieser Krippenanordnung ist mit der geringen Spiritus-

menge von 5 ml eine Zündung generell schwierig, da die Zufuhr von Verbrennungsluft stark eingeschränkt ist. Dies gilt sowohl für die Zündung an der Ecke wie in der Mitte. Die Verbrennungsfront wandert bei Eckenzündung sehr langsam in den jeweils nächsten Kanal hinein, da Frischluft nur von der Brandseite her hinzutritt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß das Rauchgas dem Brand etwa 2 Kanäle vorausschreitet und damit den Zutritt von Verbrennungsluft von der Seite unterbindet, in die sich der Brand entwickelt. Eine Zündung in der Mitte wäre generell nicht möglich gewesen, wenn nicht bis zu einer sicheren Entzündung der Krippe ein Distanzstück von 2 cm Stärke an einer Seite zwischen Krippe und Asbestplatte gelegt worden wäre, wodurch der Luftzutritt ermöglicht wurde.

2/1/13:

Bei der Zündung an der Ecke traten keine Unregelmäßigkeiten auf. Bei der Zündung in der Mitte konnte ein periodisches Auf- und Abwandern der Zündflamme im Kanal und nach Erlöschen der Zündflamme dasgleiche an der Flamme beobachtet werden, bis sie deutlich über die Krippenhöhe hinaus brannte und der Brand sich auf andere Kanäle ringförmig ausbreitete.

2/3/13:

Bei der Zündung an der Ecke verlosch die Flamme bei einer Krippe, so daß sie neu an der anderen Ecke angezündet werden mußte.

2/¹/₃/21:

Hier treffen die gleichen Bemerkungen wie für die Krippenanordnung 2/¹/₃/13 zu.

2/1/21:

Keine Unregelmäßigkeiten.

2/2/21:

Eine Krippe mußte an einer anderen Ecke entzündet werden, da das Feuer erloschte.

2/3/21:

Schwierigkeiten mit der Zündung an der Ecke ähnlich wie bei den Krippenanordnungen 2/3/12 und 2/2/21.

Bei der Mittenzündung traten keine Unregelmäßigkeiten auf.

4/1/12 und 4/1/13:

Keine Unregelmäßigkeiten.

6. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION

6.1. Massenverlust und Abbrandgeschwindigkeit

Mit dem in Abschnitt 4 beschriebenen Versuchsaufbau wurde die Gewichtsverlustkurve jeder Krippe bestimmt. Aus der Gewichtsverlustkurve ergibt sich die Restmasse in % der Anfangsmasse M_0 nach Gleichung 5 zu:

$$R \text{ in } \% = \left[1 - \frac{\text{Masse des abgebrannten Holzes } M_x}{\text{Masse der ungezündeten Krippe } M_0} \right] \cdot 100 \quad (5)$$

Der Verlauf der Restmasse über der Zeit wurde jeweils für gleiche Stabanordnungen in den Bildern 6-1 bis 6-9 dargestellt. Sie zeigen alle den aus früheren Arbeiten für den Abbrand einer Krippe [1,2] bekannten S-förmigen Verlauf.

Die erste Ableitung der Restmasse nach der Zeit ergibt die Geschwindigkeit

$$R' = \frac{dR}{dt} \quad (6)$$

mit der die auf den Anfangswert M_0 bezogene Restmasse ab-brennt. Durch Multiplikation von R' mit M_0 und Division mit A_s nach Gleichung 7 erhält man in Übereinstimmung mit

der Bezeichnung aus der Literatur eine Größe

$$\dot{m}'' = R' \cdot \frac{M_o}{A_s} \quad \text{Dimension} \quad \frac{M}{L^2 T} \quad (7)$$

die angibt, mit welcher Geschwindigkeit welche Masse des Holzes pro gesamter Kanaloberfläche einer Krippe pyrolysiert und damit mit Umgebungsluft verbrennt. \dot{m}'' ist damit eine Massenstromdichte für Holz.

Im folgenden wird der Einfluß von Krippenporosität, Stablänge, Stabdichte und Lage der Zündquelle auf die Abbrandgeschwindigkeit untersucht. Die Tabelle 6-1 gibt eine Zusammenfassung der Abbrandkennwerte für die untersuchten Krippen und zwar sowohl für $R = 80 \%$, d.h. im Anfangsstadium des Brandes und für $R = 50 \%$, d.h. für den Bereich konstanter Abbrandgeschwindigkeit. Die Daten wurden aus den Bildern 6-1 bis 6-9 ermittelt.

In den Bildern 6-10 und 6-11 wurden die Meßwerte aus der Tabelle 6-1 im Vergleich mit anderen Autoren [6] aufgetragen. In diesen Bildern ist auf der Ordinatenachse die Massenstromdichte des Holzes \dot{m}'' aufgetragen, die auf die Massenstromdichte der Verbrennungsluft in den Kanälen bezogen ist. Die Variable auf der Abszissenachse ist das Verhältnis der dem Brand zugewandten Brennstoffoberfläche a_s eines einzelnen Kanals zum Querschnitt a_v eines einzelnen Kanals. Es bleibt bei dieser Definition die Querschnittsabnahme eines einzelnen Stabes infolge Pyrolyse unberücksichtigt. a_s/a_v ergibt sich aus den geometrischen Daten nach Gleichung (1) und Gleichung (2) zu $4 h_c/s$ und ist für die einzelnen Krippenanordnungen in der Tabelle 3-1 aufgeführt.

Die Abweichungen der eigenen Meßwerte von denen anderer Autoren sind auf verschiedene, im folgenden noch näher zu diskutierende Einflüsse zurückzuführen.

6.1.1. Einfluß der Stablänge auf die Abbrandgeschwindigkeit

Wie bereits im Abschnitt 3 beschrieben, wurden drei verschiedene Stablängen verwendet, 26 und 42 cm bei $b = 2$ cm und 52 cm bei $b = 4$ cm. In Tabelle 6-2 werden die Massendichten \dot{m}_{50}'' vergleichend für verschiedene Krippengeometrien angegeben. Die Abweichungen von \dot{m}_{50}'' von dem jeweils kleinsten Wert wurden nach Gleichung 8 in % berechnet

$$\frac{\text{Größter Wert von } \dot{m}''/\rho_0 \sqrt{gh_c} - \text{kleinster Wert von } \dot{m}''/\rho_0 \sqrt{gh_c}}{\text{Kleinsten Wert von } \dot{m}''/\rho_0 \sqrt{gh_c}} \quad (8)$$

und zeigen daß der Abbrand in nicht einheitlicher Weise von der Stablänge beeinflusst wird. So sind bei den Krippen mit dichter Packung, also $s = \frac{1}{3} b$ und $s = b$ die Abbrandgeschwindigkeiten einheitlich bei 21 b Stablänge geringer als bei 13 b. Die Abweichungen zeigen zu großen Porositäten jedoch keine eindeutige Tendenz. Da bei den Krippen 2/2/21 Vergleichswerte für kürzere Stäbe bei den gleichen Kanalquerschnitten fehlen, können für den Vergleich bei Krippen größerer Porosität nur die Meßwerte von den Krippen 2/3/13 und 2/3/21 verwendet werden. Während bei Zündung an der Ecke die Krippe mit den kürzeren Stäben schneller abbrennt, ist bei Zündung in der Mitte genau das umgekehrte der Fall.

Block hat die Frage nach dem Einfluß der Stablänge bzw. Größe der Grundfläche untersucht und kam zu dem Ergebnis, daß der Einfluß nur gering ist, aber eine deutliche Tendenz aufweist. Die Beziehung zwischen Abbrandgeschwindigkeit und Stablänge läßt sich in der hier verwendeten Schreibweise etwa mit $\dot{m}'' \sim l^{-y}$ darstellen, wobei y eine von der verwendeten Holzart und der Geometrie abhängige Größe ist und Werte um 0,2 annimmt. Ein Vergleich der Werte in der Tabelle 6-2 bestätigt die Messungen von Block für $s = \frac{1}{3} b$ und $s = b$, bei der Kanalabmessung $s = 3 b$ scheinen andere Einflüsse dafür verantwortlich, daß sich die bei kleineren Stabsabständen gezeigte Tendenz nicht fortsetzt.

6.1.2. Einfluß des Ortes und der Größe der Zündquelle

Die bei diesen Versuchen verwendete Zündquelle war eine Stahlblechwanne mit den Abmessungen 5 cm x 5 cm x 1 cm, die mit 5 ml Brennspritus gefüllt wurde und deren oberer Rand ohne Zwischenraum zur Krippe mit deren unterster Lage bündig abschloß. Die hier vorliegende Versuchsanordnung brachte also hauptsächlich Ergebnisse für eine seitliche, im wesentlichen horizontale Brandausbreitung, während die Versuche von Block und anderen Autoren infolge größerer Zündwanne und auch von unten gewährtem Luftzutritt mehr die vertikale Brandausbreitung beschreiben. In diesem Zusammenhang sind auch die Bilder 6 - 10 und 6 - 11 zu verstehen.

Die vertikale, nach oben gerichtete Brandausbreitung ist bekanntlich durch den Auftrieb der heißen Flammengase gegenüber der horizontalen Brandausbreitung begünstigt. Sofern die Kanalquerschnitte noch relativ gering sind, d.h. bei a_s/a_v größer als 20, wird die Abbrandgeschwindigkeit von der Größe der Zündquelle nur wenig beeinflusst, wie ein Vergleich der Kurven im Bild 6 - 10 zeigt. Der Grund ist darin zu suchen, daß Kanäle mit kleinen Querschnitten schneller gezündet werden als solche mit großen Querschnitten, bei denen eine an der einen Kanalseite anliegende Flamme erst über die Oberfläche der Querstäbe auf die andere Seite eines Kanals gelangt und erst dann der Kanal von der Flamme ausgefüllt ist. Diese Durchzündung einer Krippe mit großen Kanalquerschnitten, die über die Querstäbe vor sich geht, wenn die Grundfläche der Zündquelle sehr viel kleiner als die Grundfläche der Krippe ist, bedingt damit eine kleinere Abbrandgeschwindigkeit als bei den Krippen, deren gesamte Grundfläche gezündet wird. Dieser Vorgang erklärt den geringeren Anstieg der Kurve ab ca. $a_s/a_v = 20$ gegenüber den Werten anderer Autoren, die eine größere Zündquelle verwendeten und damit die Krippe über die gesamte Grundfläche von unten nach oben durchzündeten.

Die Unterschiede zwischen den Kurven für die Zündung an der Ecke und für die Zündung in der Mitte der Krippe können darauf zurückgeführt werden, daß sich bei Eckenzündung der Brand in einem Viertelkreis, bei Zündung in der Mitte aber in einem Vollkreis ausbreiten kann. Bei der Mittenzündung resultieren daraus geringere Strahlungsverluste nach außen sowie eine schnellere Erfassung der gesamten Holzsubstanz. In den Bildern 6 - 12 bis 6 - 15 wurden die einzelnen Zeitabschnitte bis zum Erreichen von $R = 80 \%$ bzw. von $R = 50 \%$ über a_s/a_v aufgetragen, um diese Unterschiede zwischen der Zündung an der Ecke und der Zündung in der Mitte zu verdeutlichen.

6.1.3. Einfluß der Stabdicke auf die Abbrandgeschwindigkeit

Ein Vergleich der Versuchswerte zwischen den Krippen aus Stäben der Dicke 2 cm bei 13 b Länge und denen aus Stäben der Dicke 4 cm bei 13 b Länge führt zu dem Ergebnis, daß die Krippe aus Stäben der Dicke 4 cm, d.h. damit auch den absolut größeren Kanalquerschnitten eine höhere Abbrandgeschwindigkeit aufweist. Denn bei einem Stababstand $s = 1/3 b$ ist für die dünneren Stäbe $s = 0,67$ cm und für die dickeren $s = 1,33$ cm. Durch die größeren Kanäle wird aber die Luftzufuhr begünstigt. Ob die Steigerung der Abbrandgeschwindigkeit allein auf die aus der größeren Stabdicke resultierenden größeren Kanalquerschnitte und nicht auch auf die doppelt so große Höhe der Krippen aus Stäben der Dicke 4 cm zurückgeführt werden kann, geht aus den Ergebnissen nicht hervor. Bei Stababständen $s = b$ ist keine sichere Aussage über den Einfluß einer größeren Stabdicke möglich, da bei Zündung der Krippen an der Ecke die Krippe mit $b = 4$ cm die größere Abbrandgeschwindigkeit aufweist, bei Zündung in der Mitte ist jedoch das Umgekehrte der Fall. Man vermutet, daß bei noch größeren Kanalquerschnitten aus dem kleineren Oberfläche- Volumenverhältnis des einzelnen Stabes bei größeren Stabdicken eine geringere Abbrandgeschwindigkeit resultiert.

6.1.4. Einfluß der Kanalgröße auf die Abbrandgeschwindigkeit

Die Größe des Kanalquerschnitts beeinflusst die Strömungswiderstände und damit den Austausch Abgas - Luft. Je kleiner der Kanalquerschnitt ist, desto höher sind die Strömungswiderstände wodurch die Ansaugung der Verbrennungsluft durch natürliche Zugwirkung des Kanals erschwert wird. Mit wachsender Größe des Kanalquerschnitts werden die Strömungswiderstände geringer, sodaß genügend Verbrennungsluft angesaugt werden kann. Damit erhöht sich nun auch die Abbrandgeschwindigkeit und weist bei $a_s/a_v = 10,67$ den Höchstwert der hier durchgeführten Versuche auf. Es ist zu erwarten, daß bei noch größer werdenden Kanalquerschnitten die Abbrandgeschwindigkeit nicht mehr wesentlich ansteigt, da jetzt die Flamme nicht mehr den ganzen Kanal ausfüllt und die Flammenausbreitung daher über die Staboberflächen sowohl horizontal als auch vertikal vor sich geht. Die Größe der Abbrandgeschwindigkeit wird sich dann dem Wert für den einzelnen horizontalen Stab nähern.

6.2. Temperaturverlauf

Der zeitliche Verlauf der an 11 Stellen in und oberhalb der Krippen im 24-sec-Zyklus gemessenen Werte der örtlichen Temperatur ist in den Bildern 6-17 bis 6-78 dargestellt.

Der zeitliche Verlauf der Extremwerte und des Medianwertes der Temperatur an der Meßstelle 12 ist in Bild 6-16 aufgetragen und zeigt, daß die Schwankungen um den Medianwert bis zu 200 °C betragen können. Diese Schwankungen können z.B. von Luftströmungen im Versuchsraum herrühren, die die Flamme dann oberhalb der Krippe um eine Mittellage schwanken lassen. Wie in den Bildern 6-17 bis 6-78 dargestellt wird, verlaufen aber auch die Temperaturkurven im Inneren der Krippen nicht stetig, da hier ebenfalls Störungen, bedingt durch Luftzuströmung und Inhomogenität der Holzsubstanz auftreten.

Dichteunterschiede im einzelnen Stab einer Krippe bis zu 25 %, die durch Harzeinschlüsse hervorgerufen werden, müssen als Ursache für die zeitlich wechselnde Verbrennungsintensität in der Umgebung eines Thermoelementes für den Zeitraum nach Entflammung der Staboberfläche angesehen werden.

Diese Entflammung der Staboberfläche findet bei etwa 400 °C statt. Die Vorgänge die dabei ablaufen, sind im einzelnen Pyrolyse des Holzes sowie Zündung und Verbrennung der Pyrolysegase. Block gibt als Temperatur 370 °C an, bei anderen Autoren finden sich Werte bis zu 500 °C, so daß hier mangels genauerer Kenntnisse als gemittelte Temperatur der Pyrolysereaktionen 400 °C angenommen wurde.

So wurde von dieser Temperatur ausgegangen, um die Geschwindigkeit der horizontalen Brandausbreitung quer durch jede einzelne Krippe zu bestimmen. Wie aus den Tabellen 6-3 bis 6-11 zu ersehen ist, sind diese Geschwindigkeiten für die Krippe 4/1/13 am größten und erreichen Werte von 5 cm/min und mehr, was durch einen schnellen Stoffumsatz bei den höchsten während der Versuche aufgetretenen Verbrennungstemperaturen von über 1200 °C bedingt ist. Die Mittelwerte der maximalen im mittleren Kanal in der Krippe entstandenen Verbrennungstemperaturen wurden in Tabelle 6-12 zusammengefaßt und bestätigen die Daten der Tabellen 6-3 bis 6-11.

Um eine Aussage über die Geschwindigkeit zu erhalten, mit der ein Kanal vom Brand erfaßt wird, wurden die zeitlichen Temperaturgradienten $\frac{dT}{dt}$ der Thermoelemente T 6 und T 7 im Temperaturbereich 400 °C bis 600 °C zahlenwertmäßig berechnet (in Tabelle 6-13) und im Bild 6-79 über a_s/a_v aufgetragen. Die Mehrzahl der Krippen hatte zu dieser Zeit einen Massenverlust von $R = 90\%$ bis 80% . Die an der Meßstelle T 6 am oberen Ende des Kanals und an der Meßstelle T 7 in mitten des Kanals gemessene Wert des Temperaturgradienten zeigen eine deutliche Abhängigkeit von dem

Oberflächenverhältnis a_s/a_v der Krippe. Sie sind ein Hinweis auf die Geschwindigkeit der Entflammung im Kanal.

Die Unterschiede zwischen T 6 und T 7 können darauf zurückgeführt werden, daß im Inneren der Krippe bei T 7 die Flamme aus dem Grunde einer geringeren Temperaturerhöhung unterworfen ist, weil Wärme zur Pyrolyse an die umgebenden Stäbe abgegeben wird. Diese Verlust-Wärmemenge ist bei T 6 geringer. Ob die größeren Temperaturgradienten bei T 6 auch auf eine starke Luftzufuhr an der Oberseite der Krippe zurückzuführen sind, werden noch Konzentrationsmessungen der bei der Verbrennung beteiligten Gase zeigen müssen. Ein Einfluß der unterschiedlichen Orte der Zündquelle konnte hier nicht festgestellt werden.

7. ZUSAMMENFASSUNG

An neun Anordnungen von aus quadratischen Kiefernstäben unterschiedlicher Dicke und Länge aufgebauten Holzkrippen mit unterschiedlichen Porositäten wurden Messungen zur Bestimmung des Abbrandverlaufes dieser Krippen und Temperaturmessungen innerhalb und oberhalb der Krippen unter besonderer Berücksichtigung der Anfangsphase durchgeführt. Während die Geometrie der Krippen verändert und an zwei verschiedenen Zündorten gezündet wurde, blieb die Holzfeuchte durch Klimatisierung konstant. Die Außentemperatur und -feuchte konnte im Versuchsraum nicht beeinflusst werden. Um die Reproduzierbarkeit der Meßwerte überprüfen zu können wurde jeder Versuch wiederholt.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt, daß die Abbrandgeschwindigkeit von der Größe der Kanalquerschnitte und dem Ort der Zündquelle mehr beeinflusst wird als von der Stablänge. Die Größe der Kanalquerschnitte bestimmt die Menge der dem Brandherd zugeführten Verbrennungsluft und damit die Intensität des Frischgas-Abgas-Austausches. Daher wird eine maximale Abbrandgeschwindigkeit für Kanaldurchmesser erreicht, die

ein- bis dreimal so groß sind wie die Stabdicke. Werden die Kanalquerschnitte noch größer, so fällt die Abbrandgeschwindigkeit wieder ab. In diesem Bereich hängt die Größe der Abbrandgeschwindigkeit davon ab, wie schnell die Flamme sich horizontal ausbreiten kann.

Die Temperaturmessungen führten zu Aussagen über die Geschwindigkeit der horizontalen Brandausbreitung quer durch die Krippen.

Aus der Bestimmung des zeitlichen Temperaturgradienten im Bereich der Temperaturen, bei denen die Pyrolysereaktionen ablaufen, erhält man eine Größe für die Geschwindigkeit der Entzündung eines Einzelkanals.

8. FORMELZEICHEN

a_v	Querschnittsfläche eines einzelnen Kanals ($= s^2$)
a_s	Oberfläche eines einzelnen Kanals ($= 4 s \cdot h_c$)
b	Stabdicke
g	Schwerebeschleunigung
h_c	Krippenhöhe
\dot{m}_{80}''	Stoffumsetzungsgeschwindigkeit für $R = 80 \%$
\dot{m}_{50}''	Stoffumsetzungsgeschwindigkeit für $R = 50 \%$
n	Anzahl der Stäbe pro Lage der Krippe
s	waagrechter Abstand zwischen den Stäben
t	Zeit
A_v	Querschnittsfläche aller Kanäle einer Krippe = $(n - 1)^2 a_v$
A_s	Gesamte Oberfläche des Brennstoffs
M	Masse der Krippe
L	Länge eines Stabes
N	Anzahl der Lagen pro Krippe (hier 8)
R	Massenverlust/Restgewicht der abbrennenden Krippe $\%$
R'	Massenverlustgeschwindigkeit
V_{Fest}	Festkörpervolumen der Krippe
ϑ	Temperatur
ρ_0	Dichte der Umgebungsluft

9. LITERATUR

- 1 Seekamp, H. und Modelluntersuchungen.
 Becker, W.: Forschungsbericht Nr. 5 der Arbeits-
 gemeinschaft Feuerschutz (AGF),
 (1966).

- 2 Hoffmann, W, und Modellbrandversuche.
 John, R.: Forschungsbericht Nr. 12 der Arbeits-
 gemeinschaft Feuerschutz (AGF),
 (1969).

- 3 Thomas, P.H. Fully developed fires in single
 Heselden, A.J.M. compartments.
 Fire Research Note No. 923,
 Fire Research Station, Borehamwood,
 England, 1972.

- 4 Gross, D.: Experiments on the Burning of Cross
 Files of Wood
 Journal of Res.Nat. Bureau of
 Standards 66 C (2) 99 (1962).

- 5 Block, J.: Study of nonpropagating free
 burning fires
 Harvard Univ., Dr.phil. Thesis
 1970.

- 6 Thomas, P.H.: On the Rate of Burning of Cribs
 Fire Research Note No. 965
 Fire Research Station, Borehamwood,
 England, 1973.

10. ANHANG

10.1. Tabellen

Tabelle 3-1	Versuchsbedingungen und Krippengeometrie
Tabelle 6-1	Abbrandkennwerte t ($R = 80 \%$), t ($R = 50 \%$) R'_{80} , R'_{50} , \dot{m}''
Tabelle 6-2	Massenstromdichte der Holzpyrolyse und Krippengeometrie
Tabelle 6-3 bis 6-11	Geschwindigkeit der waagrechten Flammen- ausbreitung
Tabelle 6-12	Maximale Verbrennungstemperaturen im zwischen der Ecke und der Mitte einer Krippe gelegenen Kanal
Tabelle 6-13	Temperaturgradienten im Temperaturbereich 400 °C bis 600 °C für die Thermoelemente T 6 und T 7

10.2. Bilder

- Bild 3-1 Darstellung der Krippe $2/\frac{1}{3}/13$ (Maßstab 10 cm) und der Krippe $4/\frac{1}{3}/13$ (Maßstab 20 cm), Position der Thermoelemente und Orte der Zündquelle.
- Bild 3-2 Darstellung der Krippe $2/1/13$ (Maßstab 10 cm) und der Krippe $4/1/13$ (Maßstab 20 cm), Position der Thermoelemente und Orte der Zündquelle.
- Bild 3-3 Darstellung der Krippe $2/3/12$, Position der Thermoelemente und Orte der Zündquelle.
- Bild 3-4 Darstellung der Krippe $2/\frac{1}{3}/21$, Position der Thermoelemente und Orte der Zündquelle.
- Bild 3-5 Darstellung der Krippe $2/1/21$, Position der Thermoelemente und Orte der Zündquelle.
- Bild 3-6 Darstellung der Krippe $2/2/21$, Position der Thermoelemente und Orte der Zündquelle.
- Bild 3-7 Darstellung der Krippe $2/3/21$, Position der Thermoelemente und Orte der Zündquelle.
- Bild 4-1 Elektromechanische Wägeeinrichtung zur Messung der Abbrandgeschwindigkeit
- Bild 6-1 Verlauf der Restmasse über der Zeit für die Krippen $2/\frac{1}{3}/13$.
- Bild 6-2 Verlauf der Restmasse über der Zeit für die Krippen $2/1/13$.
- Bild 6-3 wie Bild 6-1, jedoch Krippen $2/3/13$
- Bild 6-4 wie Bild 6-1, jedoch Krippen $2/\frac{1}{3}/21$

- Bild 6-5 wie Bild 6-1, jedoch Krippen 2/1/21
- Bild 6-6 wie Bild 6-1, jedoch Krippen 2/2/21
- Bild 6-7 wie Bild 6-1, jedoch Krippen 2/3/21
- Bild 6-8 wie Bild 6-1, jedoch Krippen 4/ $\frac{1}{3}$ /13
- Bild 6-9 wie Bild 6-1, jedoch Krippen 4/1/13
- Bild 6-10 $\dot{m}''/\rho_0 \sqrt{gh_c}$ über a_s/a_v bei R = 50 % im Vergleich mit anderen Autoren - vollentwickelter Brand
- Bild 6-11 $\dot{m}''/\rho_0 \sqrt{gh_c}$ über a_s/a_v bei R = 80 %. Brand im Anfangsstadium
- Bild 6-12 Zeiten t_{80} und t_{50} über a_s/a_v - Ecke
- Bild 6-13 Zeiten t_{80} und t_{50} über a_s/a_v - Mitte
- Bild 6-14 Zeit t_{80} über a_s/a_v bei Ecken- und Mittenzündung
- Bild 6-15 Zeit t_{50} über a_s/a_v bei Ecken- und Mittenzündung
- Bild 6-16 Zeitlicher Verlauf der Temperaturschwankungen
- Bild 6-17 Zeitlicher Verlauf der Temperaturen in und bis 6-78 oberhalb der Krippen
- Bild 6-17 bis 6-23 Krippe 2/ $\frac{1}{3}$ /13
- Bild 6-24 bis 6-29 Krippe 2/1/13
- Bild 6-30 bis 6-35 Krippe 2/3/13
- Bild 6-36 bis 6-44 Krippe 2/ $\frac{1}{3}$ /21
- Bild 6-45 bis 6-50 Krippe 2/1/21

Bild 6-51 bis 5-56	Krippe 2/2/21
Bild 6-57 bis 6-61	Krippe 2/3/21
Bild 6-62 bis 6-72	Krippe 4/ ¹ / ₃ /13
Bild 6-73 bis 6-78	Krippe 4/1/13
Bild 6-79	Temperaturgradienten von T 6 und T 7 zwischen 400 °C und 600 °C über a_s/a_v

Tabelle 3-1 Versuchsbedingungen und Geometrie

Art der Krippe	Versuch Nr.	Ort der Zündung	Raumfeuchte in %	Raumtemperatur in °C	V _{Fest} in cm ³	$\frac{a_s}{a_v}$	A _s in cm ²	A _v in cm ²
2/1/13	1	Ecke	-	21,0	8320	96	11160	36
"	2	"	-	19,5	"	"	"	"
"	11	Mitte	46	23,8	"	"	"	"
"	36	"	-	-	"	"	"	"
2/1/13	5	Ecke	-	17,0	4992	32	8040	100
"	6	"	-	16,0	"	"	"	"
"	7	Mitte	48,5	20,2	"	"	"	"
"	8	"	"	"	"	"	"	"
2/3/13	3	Ecke	-	20,0	3328	16	5808	324
"	4	"	-	17,0	"	"	"	"
"	9	Mitte	48,5	20,2	"	"	"	"
"	10	"	"	"	"	"	"	"

Tabelle 3-1 Fortsetzung

Art der Krippe	Versuch Nr.	Ort der Zündung	Raumfeuchte in %	Raumtemperatur in °C	V _{Fest} in cm ³	$\frac{a_s}{a_y}$	A _s in cm ²	A _y in cm ²
2/1/21	24	Ecke	43	22,6	21504	96	28352	100
"	25	"	75	22,0	"	"	"	"
"	32	Mitte	63	13,1	"	"	"	"
"	34	"	66	12,3	"	"	"	"
<hr/>								
2/1/21	16	Ecke	52	19,0	13440	32	21080	324
"	17	"	44	19,8	"	"	"	"
"	18	Mitte	44	19,8	"	"	"	"
"	23	"	43	22,6	"	"	"	"
<hr/>								
2/2/21	19	Ecke	53	21,6	8064	16	13992	400
"	20	"	"	"	"	"	"	"
"	21	Mitte	"	"	"	"	"	"
"	22	"	"	"	"	"	"	"

Tabelle 3-1 Fortsetzung

Art der Krippe	Versuch Nr.	Ort der Zündung	Raumfeuchte in %	Raumtemperatur in °C	V _{Fest} in cm ³	$\frac{a_s}{a_v}$	A _s in cm ²	A _v in cm ²
2/3/21	14	Ecke	83,0	16,4	8064	10,67	13992	900
"	15	"	83,0	16,4	"	-	-	-
"	12	Mitte	51,6	22,0	"	"	"	"
"	13	"	83,0	16,4	"	"	"	"
4/3/13	30	Ecke	66	14,7	66560	96	44640	144
"	31	"	62	13,1	"	"	"	"
"	33	Mitte	85	12,6	"	"	"	"
"	35	"	66	12,3	"	"	"	"
4/1/13	28	Ecke	65,7	16,6	39936	32	32160	400
"	29	"	65,7	16,6	"	"	"	"
"	26	Mitte	76	23,0	"	"	"	"
"	27	"	76,5	21,6	"	"	"	"

Tabelle 6-1 Abbrandkennwerte

Art der Krippe	Ort der Zündung	Flächen- gewicht kg/m	t(R=80%) min	R' (80) %/min	$\frac{100\dot{m}''(80)}{\rho_0 \sqrt{gh}c}$	t(R=50%) min	R' (50) %/min	$\frac{100\dot{m}''(50)}{\rho_0 \sqrt{gh}c}$
2/3/13	Ecke	66,45	51,4	0,893	0,0397	74,8	1,61	0,0716
"	"	"	58	0,980	0,0436	81,6	1,52	0,0676
"	Mitte	"	33,6	2,564	0,1141	42,2	3,57	0,1588
"	"	"	-	-	-	-	-	-
2/1/13	Ecke	39,87	13	2,778	0,1029	19,1	7,14	0,2644
"	"	"	14,6	3,333	0,1235	21,2	5,56	0,2059
"	Mitte	"	10,3	7,143	0,2645	13,4	10,0	0,3702
"	"	"	10,3	7,143	0,2645	13,4	10,0	0,3702
2/3/13	Ecke	26,58	10,0	5,405	0,1847	13,8	9,52	0,3253
"	"	"	8,0	5,714	0,1962	11,6	11,72	0,4019
"	Mitte	"	7,0	11,765	0,4021	9,2	14,29	0,4884
"	"	"	7,3	14,286	0,4882	9,0	12,5	0,4272

Tabelle 6-1 Fortsetzung

Art der Krippe	Ort der Zündung	Flächen- gewicht kg/m ²	t(R=80%) min	R' (80) %/min	$\frac{100m''(80)}{\rho_0 \sqrt{gh}c}$	t(R=50%) min	R' (50) %/min	$\frac{100m''(50)}{\rho_0 \sqrt{gh}c}$
2/1/21	Ecke	65,83	57,2	0,730	0,0331	72,8	1,56	0,0705
"	"	"	64,0	0,685	0,0309	92,0	1,32	0,0597
"	Mitte	"	33,0	1,818	0,0822	45,2	2,56	0,1158
"	"	"	25,0	2,174	0,0983	34,4	3,33	0,1506
2/1/21	Ecke	41,14	19,6	2,667	0,1014	27,6	4,76	0,1810
"	"	"	17,8	2,637	0,1000	26,0	4,55	0,1730
"	Mitte	"	12,0	5,882	0,2237	16,0	7,41	0,2818
"	"	"	12,6	7,692	0,2925	16,6	7,69	0,2924
2/2/21	Ecke	24,68	10,5	4,651	0,1598	14,9	10,0	0,3437
"	"	"	10,0	4,762	0,1637	14,5	9,52	0,3272
"	Mitte	"	8,6	10,000	0,3439	11,2	11,11	0,3819
"	"	"	7,8	9,524	0,3273	10,4	11,76	0,3773

Tabelle 6-1 Fortsetzung

Art der Krippe	Ort der Zündung	Flächen- gewicht kg/m ²	t(R=80%) min	R'(80) %R/min	$\frac{100m''(80)}{90 \sqrt{gh_c}}$	t(R=50%) min	R'(50) %R/min	$\frac{100m''(50)}{90 \sqrt{gh_c}}$
2/3/21	Ecke	24,68	12,6	6,897	0,2370	15,9	9,09	0,3125
"	"	"	-	-	-	-	-	-
"	Mitte	"	9,8	11,1	0,3891	11,8	15,38	0,5287
"	"	"	10,2	12,5	0,4296	12,3	14,81	0,5091
4/3/13	Ecke	132,81	41	1,333	0,0838	59,2	2,0	0,1258
"	"	"	41	1,316	0,0828	62,0	1,67	0,1050
"	Mitte	"	31,2	1,867	0,1187	42,2	3,23	0,1969
"	"	"	34	1,857	0,1165	44,6	3,13	0,1969
4/1/13	Ecke	79,75	22,1	3,774	0,1977	28,4	5,26	0,2754
"	"	"	18,2	3,509	0,1837	24,6	5,41	0,2833
"	Mitte	"	13,1	4,762	0,2494	18,7	5,56	0,2912
"	"	"	14,1	4,878	0,2555	19,8	5,56	0,2912

Tabelle 6-2 Massenstromdichte der Holzpyrolyse und Krippengeometrie

Art der Krippe	Ort der Zündung	$\frac{100\dot{m}''(50)}{\rho_0 \sqrt{gh_c}}$	Abweichung vom jeweils kleinsten Wert in %
$\frac{a_s}{a_v} = 96 \quad s = \frac{1}{3} b$			
2/3/13	Ecke	0,0696	
2/3/21	"	0,0651	6,91
4/3/13	"	0,1154	77,27
2/3/13	Mitte	0,1588	
2/3/21	"	0,1332	19,22
4/3/13	"	0,2000	50,15
$\frac{a_s}{a_v} = 32 \quad s = 1 b$			
2/1/13	Ecke	0,2352	
2/1/21	"	0,1770	32,88
4/1/13	"	0,2794	57,85
2/1/13	Mitte	0,3702	
2/1/21	"	0,2871	28,94
4/1/13	"	0,2912	1,43
$\frac{a_s}{a_v} = 16 \quad s = 2 b$			
2/2/21	Ecke	0,3355	-
2/2/21	Mitte	0,3796	-
$\frac{a_s}{a_v} = 10,67 \quad s = 3 b$			
2/3/13	Ecke	0,3636	
2/3/21	"	0,3125	16,35
2/3/13	Mitte	0,4578	
2/3/21	"	0,5189	13,35

Tabelle 6-3 Geschwindigkeit der waagrechten Flammenausbreitung

Art der Krippe 2/¹/₃/13

Art der Zündung	Versuch Nr.	Ausbreitungsrichtung von nach		Abstand der Thermolemente cm	Geschwindigkeit cm/min
Ecke	1	T9	T6	8,4	0,34
		T10	T7	"	0,46
		T11	T8	"	0,52
		T6	T2	7,2	0,30
		T7	T3	"	0,26
		T8	T4	"	0,32
Ecke	2	T9	T6	8,4	0,18
		T10	T7	"	0,33
		T11	T8	"	0,38
		T6	T2	7,2	0,30
		T7	T3	"	0,26
		T8	T4	"	0,29
Mitte	11	T2	T6	7,2	0,55
		T3	T7	"	0,52
		T4	T8	"	0,31
		T6	T9	8,4	0,84
		T7	T10	"	0,69
		T8	T11	"	0,38

Tabelle 6-4 Geschwindigkeit der waagrechten Flammenausbreitung

Art der Krippe 2/1/13

Art der Zündung	Versuch Nr.	Ausbreitungsrichtung von nach		Abstand der Thermolemente cm	Geschwindigkeit cm/min
Ecke	5	T9	T6	11,2	1,65
		T10	T7	"	1,65
		T11	T8	"	1,03
		T6	T2	5,8	0,79
		T7	T3	"	1,21
		T8	T4	"	1,12
Ecke	6	T9	T6	11,2	1,44
		T10	T7	"	1,51
		T11	T8	"	1,12
		T6	T2	5,8	0,94
		T7	T3	"	0,97
		T8	T4	"	1,26
Mitte	7	T2	T6	5,8	1,12
		T3	T7	"	1,04
		T4	T8	"	0,63
		T6	T9	11,2	1,30
		T7	T10	"	1,27
		T8	T11	"	1,90
Mitte	8	T2	T6	5,8	1,09
		T3	T7	"	1,12
		T4	T8	"	0,64
		T6	T9	11,2	1,41
		T7	T10	"	1,19
		T8	T11	"	1,81

Tabelle 6-5 Geschwindigkeit der waagrechten Flammenausbreitung

Art der Krippe 2/3/13

Art der Zündung	Versuch Nr.	Ausbreitungsrichtung von	Ausbreitungsrichtung nach	Abstand der Thermolemente cm	Geschwindigkeit cm/min
Ecke	3	T9	T6	7,2	4
		T10	T7	"	2,76
		T11	T8	"	-18
		T6	T2	11,2	3,2
		T7	T3	"	2,43
		T8	T4	"	3,39
Ecke	4	T9	T6	7,2	6,54
		T10	T7	"	10,28
		T11	T8	"	2,05
		T6	T2	11,2	2,66
		T7	T3	"	2,07
		T8	T4	"	1,40
Mitte	9	T2	T6	11,2	2,73
		T3	T7	"	1,96
		T4	T8	"	1,89
		T6	T9	7,2	1,8
		T7	T10	"	1,75
		T8	T11	"	1,1
Mitte	10	T2	T6	11,2	5,09
		T3	T7	"	4,48
		T4	T8	"	3,02
		T6	T9	7,2	-
		T7	T10	"	1,56
		T8	T11	"	4,5

Tabelle 6-6 Geschwindigkeit der waagrechten Flammenausbreitung

Art der Krippe $2\frac{1}{3}/21$

Art der Zündung	Versuch Nr.	Ausbreitungsrichtung von nach		Abstand der Thermolemente cm	Geschwindigkeit cm/min
Ecke	24	T9	T6	16,4	0,38
		T10	T7	"	0,50
		T11	T8	"	0,44
		T6	T2	11,2	0,36
		T7	T3	"	0,29
		T8	T4	"	0,39
Ecke	25	T9	T6	16,4	0,36
		T10	T7	"	0,39
		T11	T8	"	0,42
		T6	T2	11,2	0,40
		T7	T3	"	0,34
		T8	T4	"	0,41
Mitte	32	T2	T6	11,2	0,8
		T3	T7	"	0,49
		T4	T8	"	-
		T6	T9	16,4	1,65
		T7	T10	"	1,49
		T8	T11	"	-
Mitte	34	T2	T6	11,2	1,24
		T3	T7	"	0,68
		T4	T8	"	0,48
		T6	T9	16,4	1,95
		T7	T10	"	1,0
		T8	T11	"	0,98

Tabelle 6-7 Geschwindigkeit der waagrechten Flammenausbreitung

Art der Krippe 2/1/21

Art der Zündung	Versuch Nr.	Ausbreitungsrichtung von nach		Abstand der Thermolemente cm	Geschwindigkeit cm/min
Ecke	16	T9	T6	17,2	2,21
		T10	T7	"	2,69
		T11	T8	"	-
		T6	T2	11,4	2,33
		T7	T3	"	1,33
		T8	T4	"	1,28
Ecke	17	T9	T6	17,2	1,79
		T10	T7	"	3,31
		T11	T8	"	-
		T6	T2	11,4	1,46
		T7	T3	"	1,36
		T8	T4	"	1,39
Mitte	18	T2	T6	11,4	1,46
		T3	T7	"	1,27
		T4	T8	"	1,13
		T6	T9	17,2	2,02
		T7	T10	"	2,18
		T8	T11	"	2,57
Mitte	23	T2	T6	11,4	1,25
		T3	T7	"	1,25
		T4	T8	"	1,58
		T6	T9	17,2	1,41
		T7	T10	"	1,35
		T8	T11	"	1,56

Tabelle 6-8 Geschwindigkeit der waagrecchten Flammenausbreitung

Art der Krippe 2/2/21

Art der Zündung	Versuch Nr.	Ausbreitungsrichtung von	Ausbreitungsrichtung nach	Abstand der Thermolemente cm	Geschwindigkeit cm/min
Ecke	19	T9	T6	-	-
		T10	T7	-	-
		T11	T8	-	-
		T6	T2	17,2	2,57
		T7	T3	"	2,23
		T8	T4	"	2,10
Ecke	20	T9	T6	-	-
		T10	T7	-	-
		T11	T8	-	-
		T6	T2	17,2	2,32
		T7	T3	"	2,46
		T8	T4	"	2,53
Mitte	21	T2	T6	17,2	2,57
		T3	T7	"	2,10
		T4	T8	"	2,87
		T6	T9	-	-
		T7	T10	-	-
		T8	T11	-	-
Mitte	22	T2	T6	17,2	4,0
		T3	T7	"	3,74
		T4	T8	"	2,32
		T6	T9	-	-
		T7	T10	-	-
		T8	T11	-	-

Tabelle 6-9 Geschwindigkeit der waagrechten Flammenausbreitung

Art der Krippe 2/3/21

Art der Zündung	Versuch Nr.	Ausbreitungsrichtung von nach		Abstand der Thermolemente cm	Geschwindigkeit cm/min
Ecke	14	T9	T6	15,6	2,17
		T10	T7	"	2,03
		T11	T8	"	1,59
		T6	T2	11,2	2,59
		T7	T3	"	3,11
		T8	T4	"	2,73
Mitte	12	T2	T6	11,2	3,2
		T2	T7	"	3,39
		T4	T8	"	3,5
		T6	T9	15,6	4,59
		T7	T10	"	3,06
		T8	T11	"	4,59
Mitte	13	T2	T6	11,2	2,87
		T3	T7	"	3,73
		T4	T8	"	3,29
		T6	T9	15,6	6,24
		T7	T10	"	4,11
		T8	T11	"	5,2

Tabelle 6-10 Geschwindigkeit der waagrechten Flammenausbreitung

Art der Krippe 4/¹/₃/13

Art der Zündung	Versuch Nr.	Ausbreitungsrichtung von nach		Abstand der Thermoelemente cm	Geschwindigkeit cm/min
Ecke	28	T9	T6	16,8	2,95
		T10	T7	"	3,11
		T11	T8	"	7,0
		T6	T2	14,4	1,49
		T7	T3	"	1,57
		T8	T4	"	1,21
Ecke	29	T9	T6	16,8	2,24
		T10	T7	"	2,55
		T11	T8	"	2,07
		T6	T2	14,4	1,29
		T7	T3	"	1,21
		T8	T4	"	0,89
Mitte	26	T2	T6	14,4	1,05
		T3	T7	"	1,45
		T4	T8	"	0,58
		T6	T9	16,8	2,49
		T7	T10	"	2,33
		T8	T11	"	2,15
Mitte	27	T2	T6	14,4	0,97
		T3	T7	"	0,98
		T4	T8	"	0,53
		T6	T9	16,8	2,04
		T7	T10	"	1,27
		T8	T11	"	3,11

Tabelle 6-11 Geschwindigkeit der waagrechten Flammenausbreitung

Art der Krippe 4/1/13

Art der Zündung	Versuch Nr.	Ausbreitungsrichtung von nach		Abstand der Thermoelemente cm	Geschwindigkeit cm/min
Ecke	28	T9	T6	22,4	5,89
		T10	T7	"	6,4
		T11	T8	"	10,18
		T6	T2	11,6	2,9
		T7	T3	"	3,14
		T8	T4	"	2,47
Ecke	29	T9	T6	22,4	4,48
		T10	T7	"	5,09
		T11	T8	"	4,15
		T6	T2	11,6	2,52
		T7	T3	"	2,32
		T8	T4	"	1,78
Mitte	26	T2	T6	11,6	2,15
		T3	T7	"	3,05
		T4	T8	"	7,25
		T6	T9	22,4	6,22
		T7	T10	"	4,67
		T8	T11	"	4,31
Mitte	27	T2	T6	11,6	1,97
		T3	T7	"	1,87
		T4	T8	"	4,83
		T6	T9	22,4	3,93
		T7	T10	"	2,6
		T8	T11	"	37,33

Tabelle 6-12 Maximale Verbrennungstemperaturen im
zwischen der Ecke und der Mitte der Krippe
gelegenen Kanal

$2/\frac{1}{3}/13$	T max	=	970 °C
$2/1/13$	"	=	1080 °C
$2/3/13$	"	=	1062 °C
<hr/>			
$2/\frac{1}{3}/21$	T max	=	1050 °C
$2/1/21$	"	=	1077 °C
$2/2/21$	"	=	1125 °C
$2/3/21$	"	=	1166 °C
<hr/>			
$4/\frac{1}{3}/13$	T max	=	1177 °C
$4/1/13$	"	=	1195 °C
<hr/>			

Die angegebenen Maximaltemperaturen sind Mittelwerte.

Tabelle 6-13 Temperaturgradienten (1)

Stapel	Versuch Nr.	Thermo- elemente	t(400°C) in min	t(600°C) in min	R _t (500°C) in %	$\frac{d\vartheta}{dt}$ in $\frac{K}{s}$
2/1/13	1	6	41,2	48,6	84	0,45
	1	7	33,8	41	93	0,46
	2	6	38,2	41	89	0,57
	2	7	33,4	37,2	84	0,87
	11	6	40,4	40,8	58	*8,32
	11	7	35,8	41,4	63	0,59
2/1/13	5	6	7,6	8,4	92	4,16
	5	7	8,8	10	90	2,77
	6	6	8,6	9	94	8,32
	6	7	8,2	12,4	94	0,79
	7	6	5,8	6,3	98	6,66
	7	7	6,3	6,5	97	16,65
	8	6	5,5	5,9	96	9,32
	8	7	5,8	0,4	94	0,92
2/3/13	3	6	5,9	6,7	93	4,16
	3	7	5,0	5,7	95	4,75
	4	6	2,9	3,4	97	6,66
	4	7	2,2	3,0	97	41,6
	9	6	7,4	8,1	70	4,75
	9	7	7,7	8,2	70	6,66
	10	6	5,6	5,8	94	*16,65
	10	7	6,5	6,9	85	8,32
2/1/21	24	6	51,2	55,1	85	0,25
	24	7	41,2	47,1	92	0,56
	25	6	56,6	61	83	0,75
	25	7	45,2	49,2	85	0,83
	32	6	39,4	42,9	63	0,95
	32	7	37,9	39,8	69	1,75
	34	6	36,1	40,1	48	0,83
	34	7	30	32,5	59	1,33

Tabelle 6-13 Temperaturgradienten (2)

Stapel	Versuch Nr.	Thermo- elemente	t(400°C) in min	t(600°C) in min	R _t (500°C) in %	$\frac{d\vartheta}{dt}$ in $\frac{K}{s}$
2/1/21	16	6	11,2	11,4	95	*16,65
	16	7	9,7	10,4	96	4,75
	17	6	10,3	10,9	94	5,55
	17	7	10,3	10,9	94	5,55
	18	6	8,7	9,5	93	4,16
	18	7	9,6	10,1	94	6,66
	23	6	9,6	10,0	90	8,32
	23	7	9,7	10,0	90	*11,10
2/2/21	19	6	3,6	4,2	97	5,55
	19	7	2,8	4,7	97	1,75
	20	6	2,6	3,1	97	6,66
	20	7	3,1	4,0	97	3,7
	21	6	9,4	9,8	83	8,32
	21	7	9,4	9,9	83	6,66
	22	6	5,5	5,8	95	11,10
	22	7	5,3	5,6	95	11,10
2/3/21	14	6	13,9	14,2	80	11,10
	14	7	13,2	13,6	80	8,32
	12	6	9,5	10,1	82	5,55
	12	7	9,3	9,7	82	8,32
	13	6	10	10,4	80	8,32
	13	7	9,5	10	80	6,66
	4/ ¹ / ₃ /13	30	6	37	49	77
30		7	34	41	84	0,48
31		6	34,4	50	80	0,21
31		7	35,3	41,1	86	0,57
33		6	35,8	47,5	58	0,28
33		7	34,5	40,6	77	0,55
35		6	38	51,2	55	0,25
35		7	12	41,2	80	0,11

Tabelle 6-13 Temperaturgradienten (3)

Stapel	Versuch Nr.	Thermo- elemente	t(400°C) in min	t(600°C) in min	R _t (500°C) in %	$\frac{d\vartheta}{dt}$ in $\frac{K}{s}$
4/1/13	28	6	12,3	12,8	98	6,67
	28	7	12,6	15,2	96	2,08
	29	6	9,5	10,0	98	6,67
	29	7	9,2	9,7	98	6,67
	26	6	6,4	6,8	97	8,33
	26	7	7,0	7,6	97	5,56
	27	6	6,5	6,9	97	8,33
	27	7	6,9	8,4	97	2,22

* Unberücksichtigt gebliebene Meßwerte

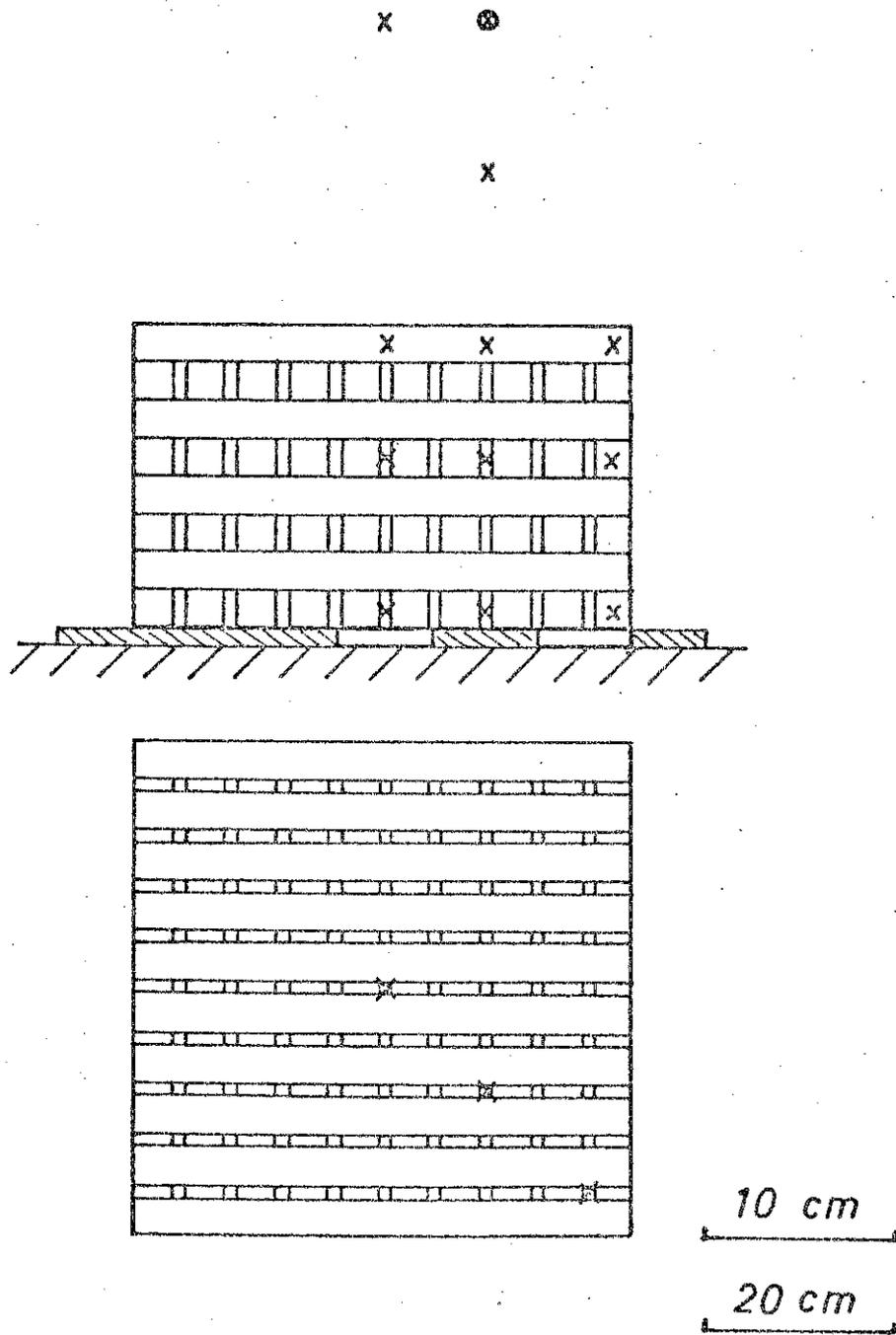


Bild 3-1

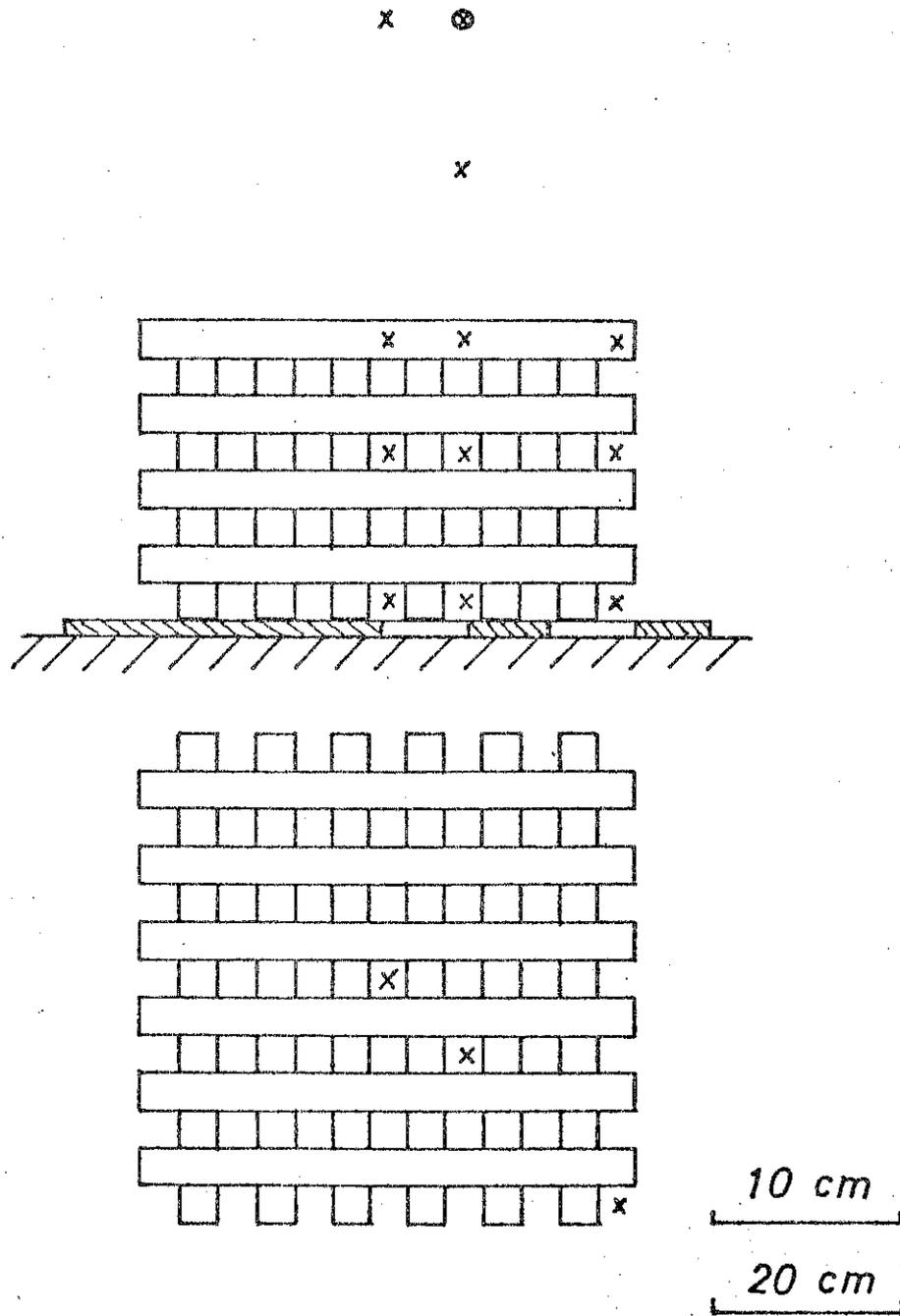


Bild 3-2

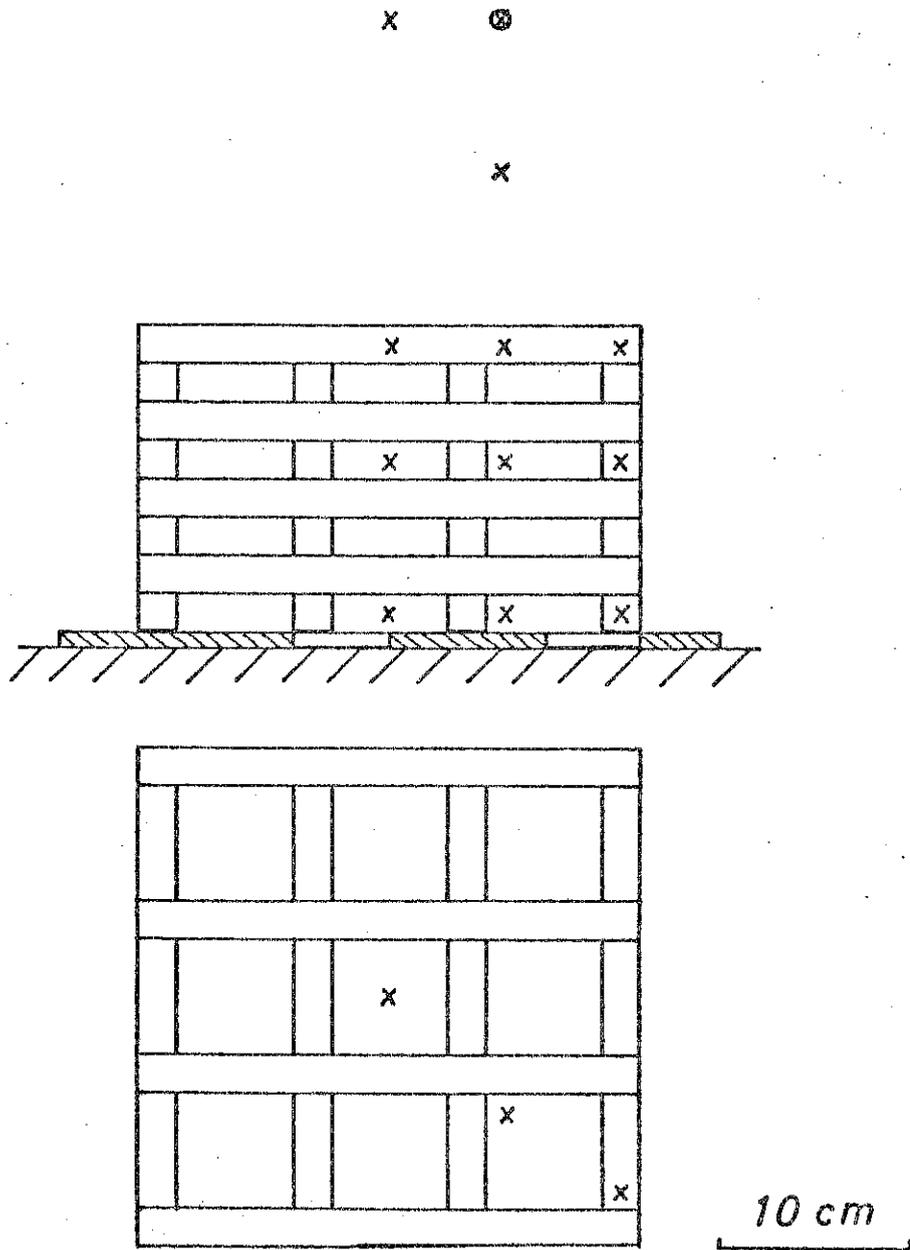


Bild 3-3

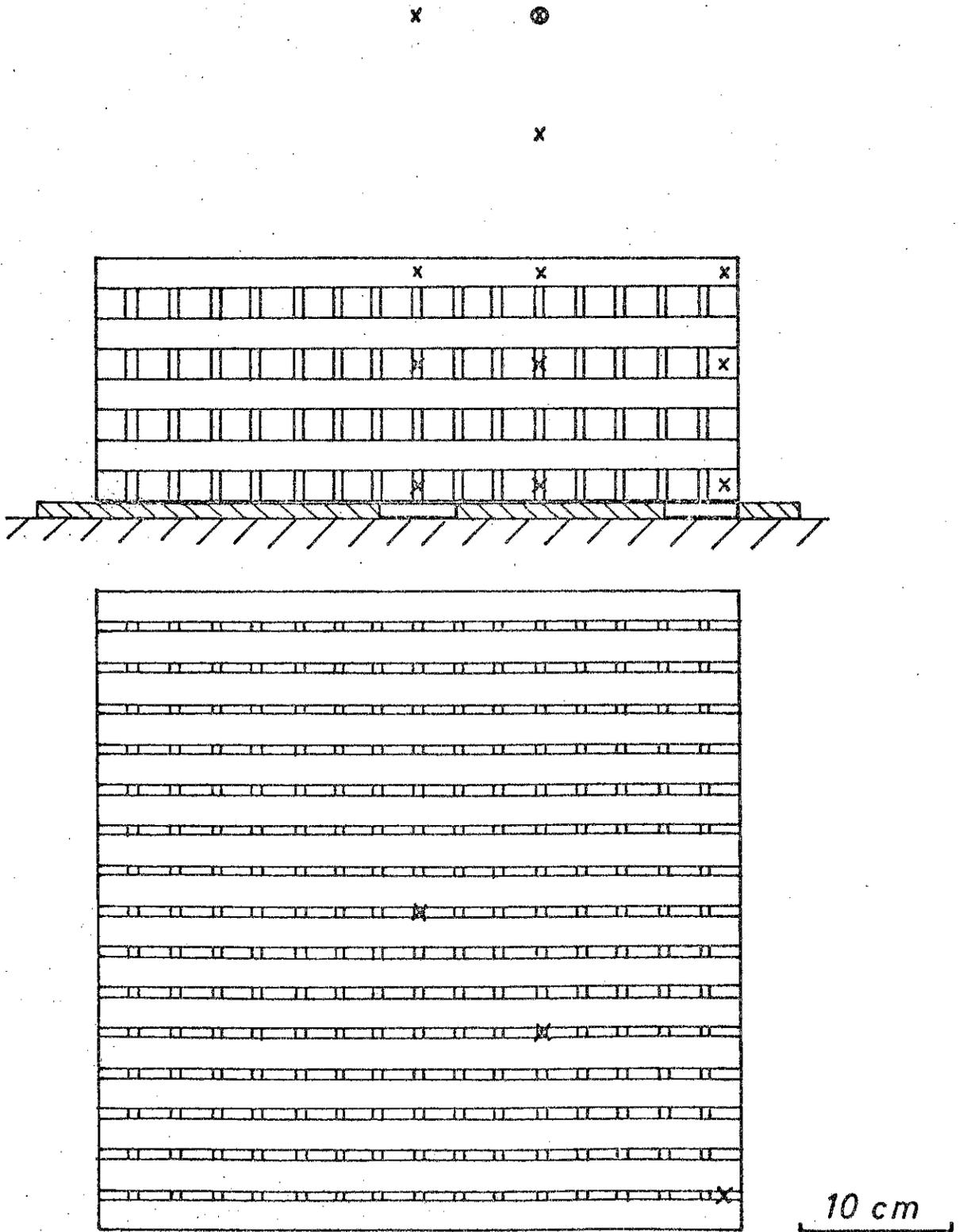
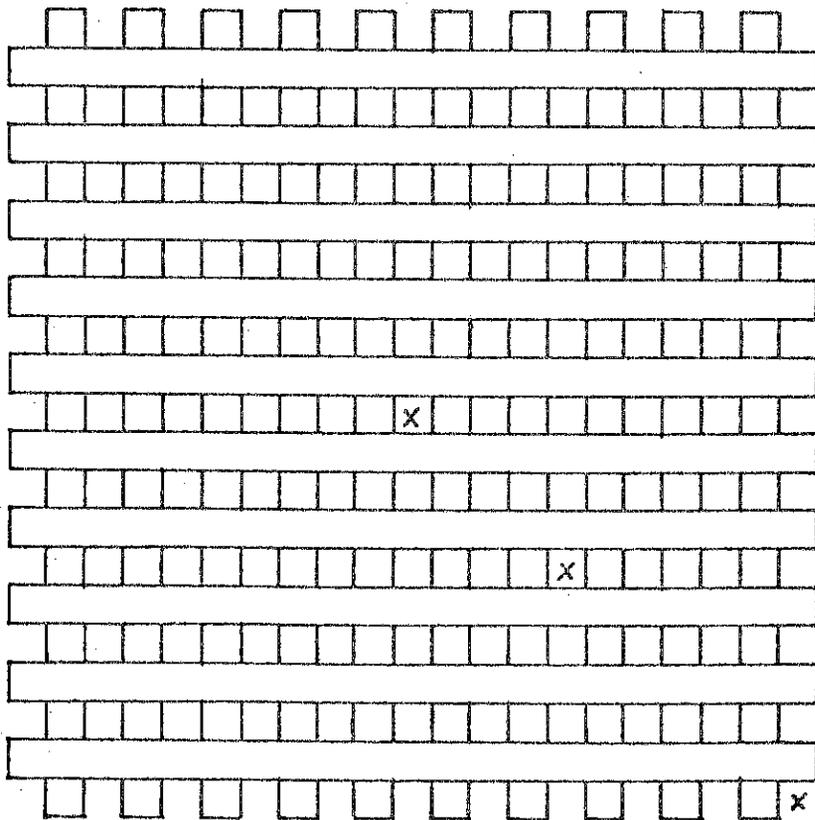
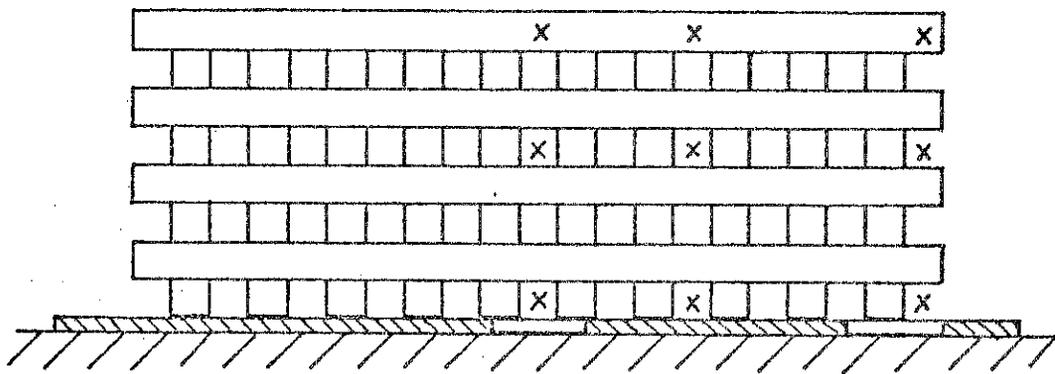


Bild 3-4

x ●

x



10 cm

Bild 3-5

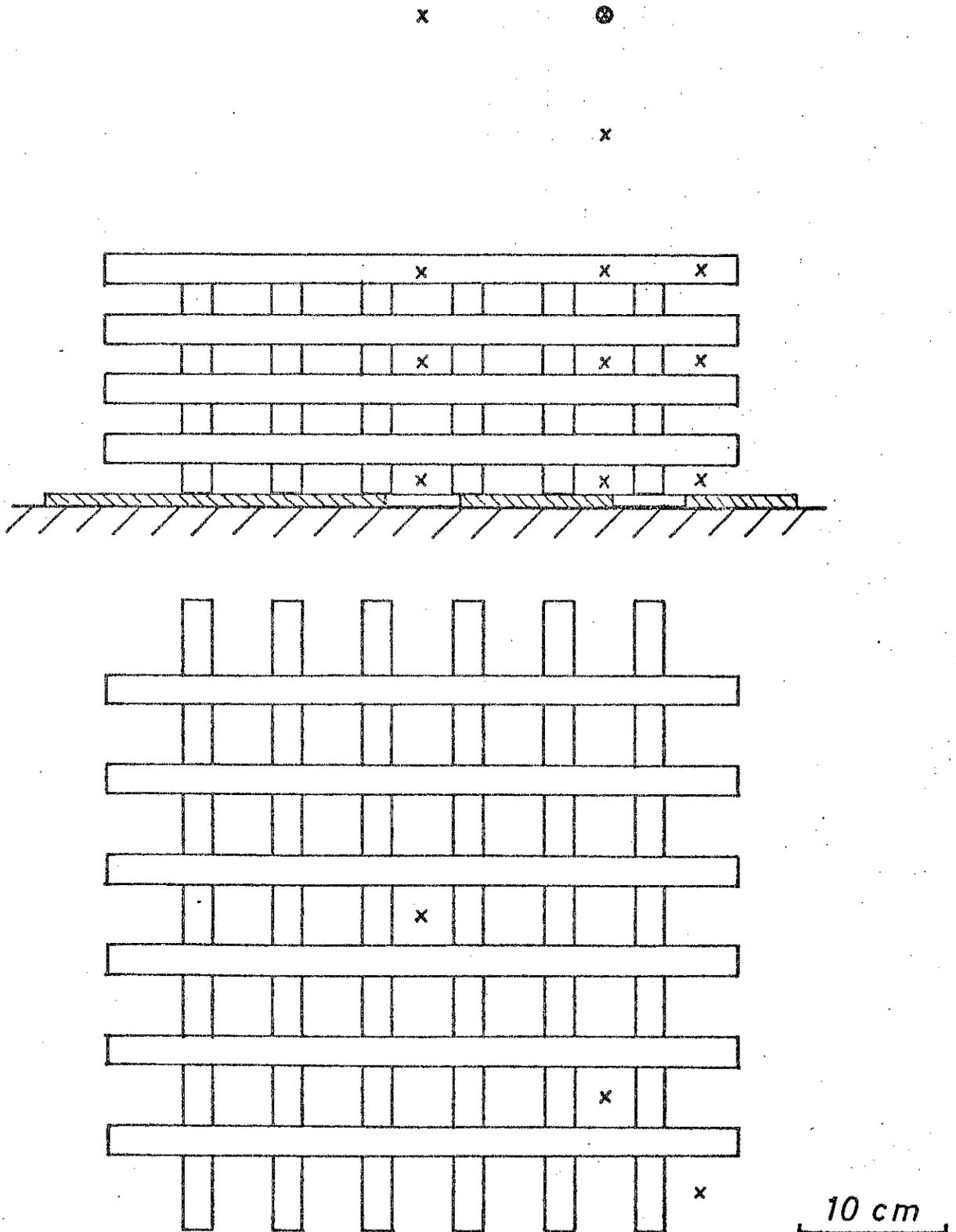


Bild 3-6

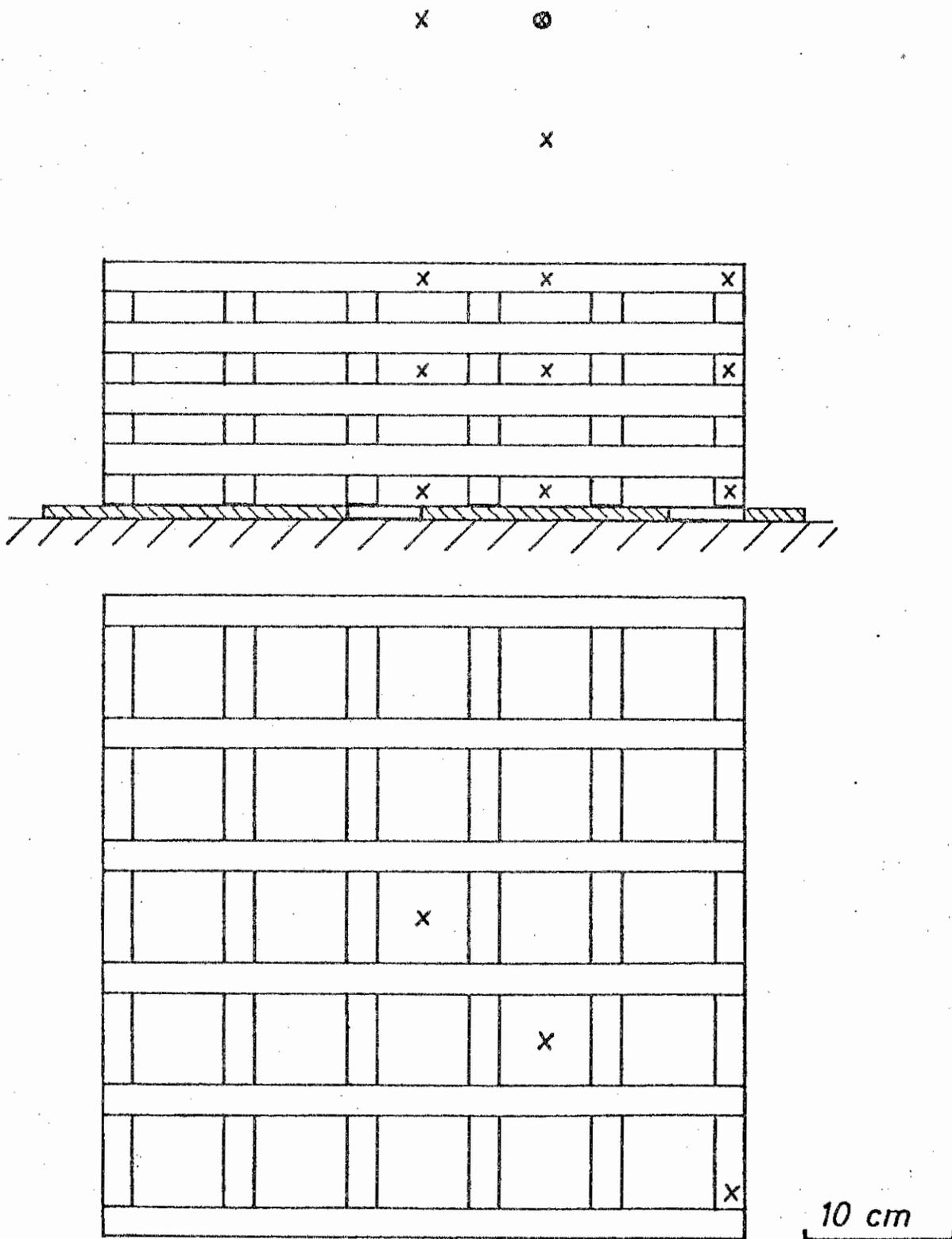


Bild 3-7

- 1 Krippe
- 2 Zündwanne
- 3 Asbestunterlage
- 4 Waage
- 5 Kraftaufnehmer

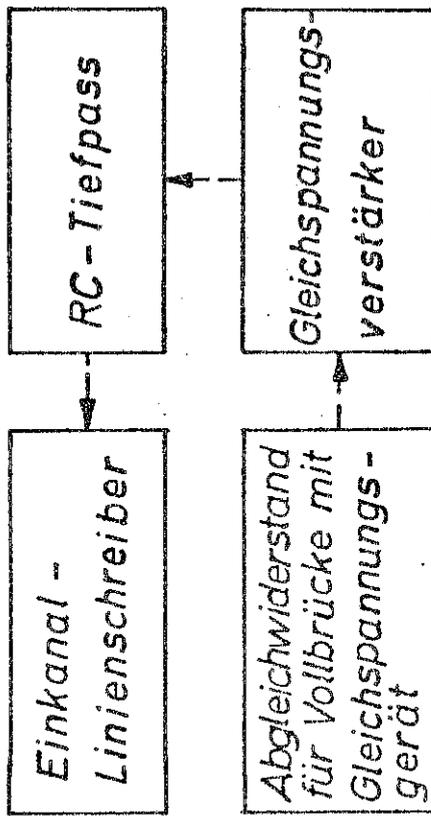
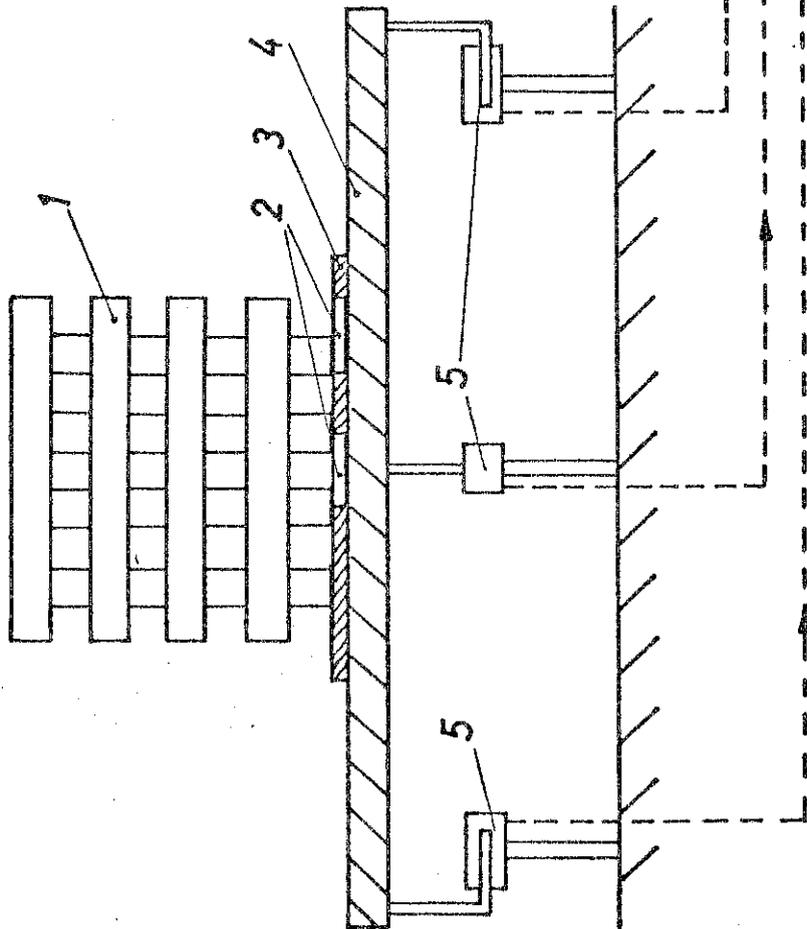


Bild 4-1

Versuch 1 x -----
" 2 o -.-.-
" 11 + -----

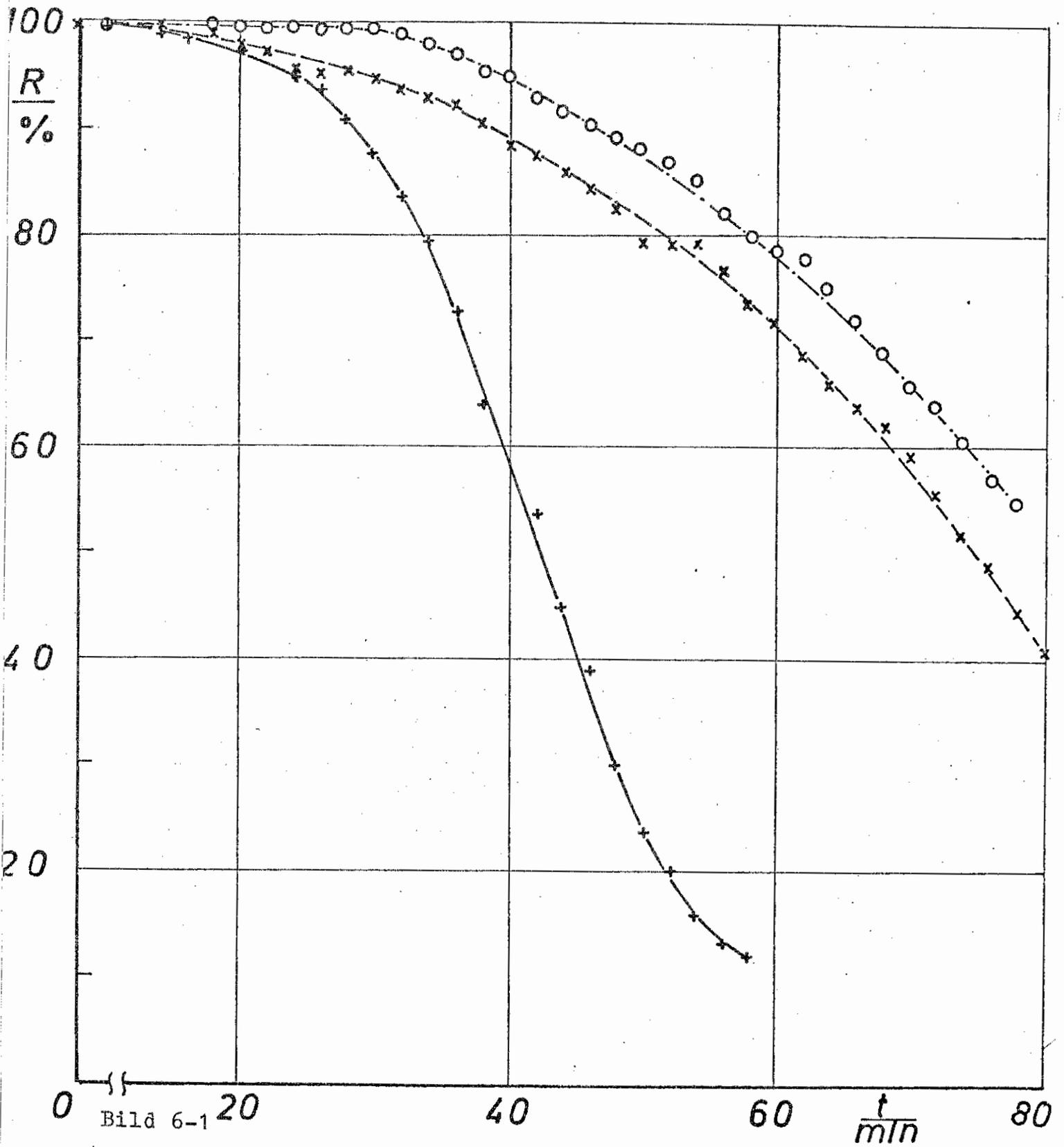


Bild 6-1

Versuch 5 x -----
" 6 o -.-.-
" 7 + -----
" 8 □ -----

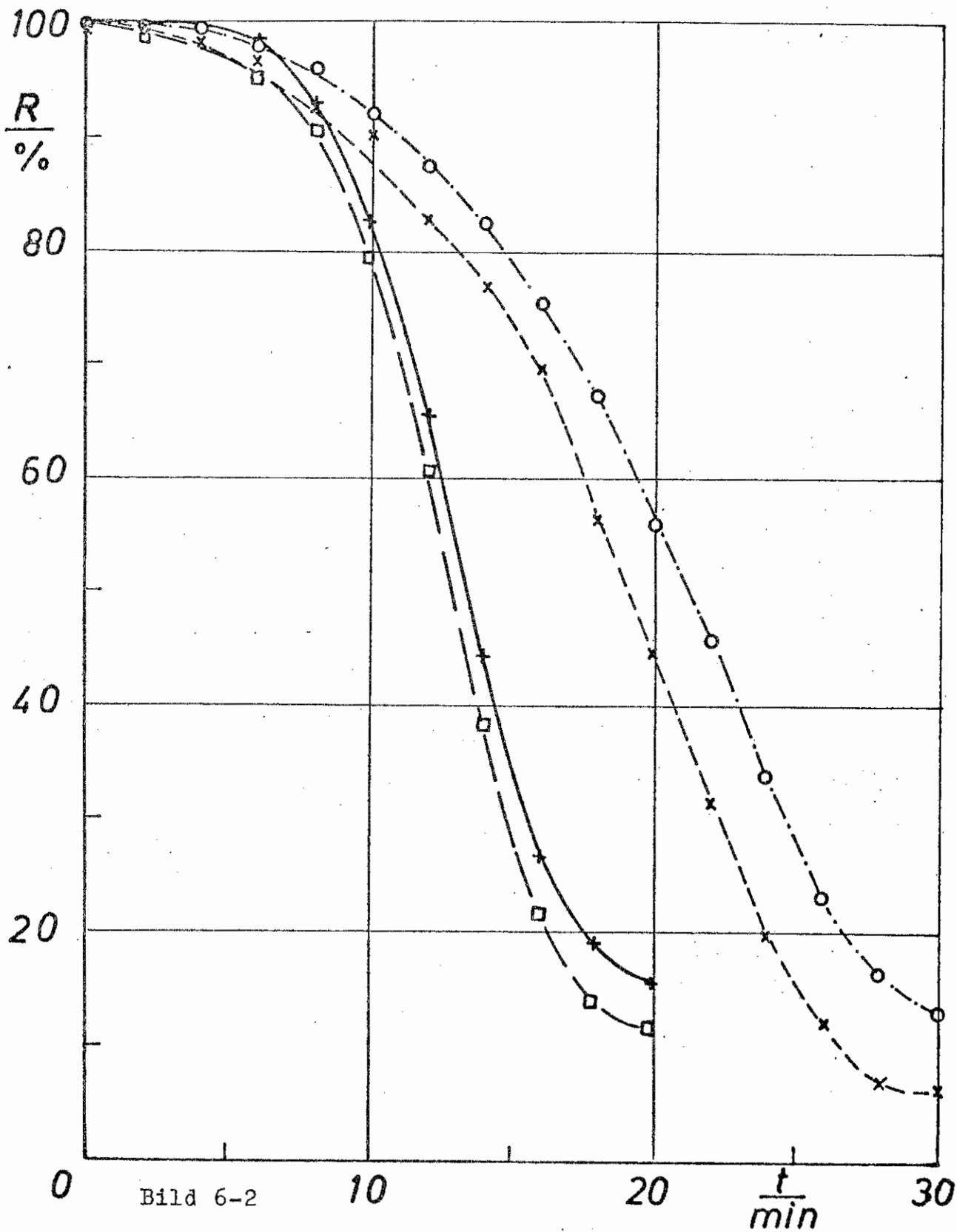


Bild 6-2

Versuch 3 x ----- 9 + -----
" 4 o ----- 10 □ -----

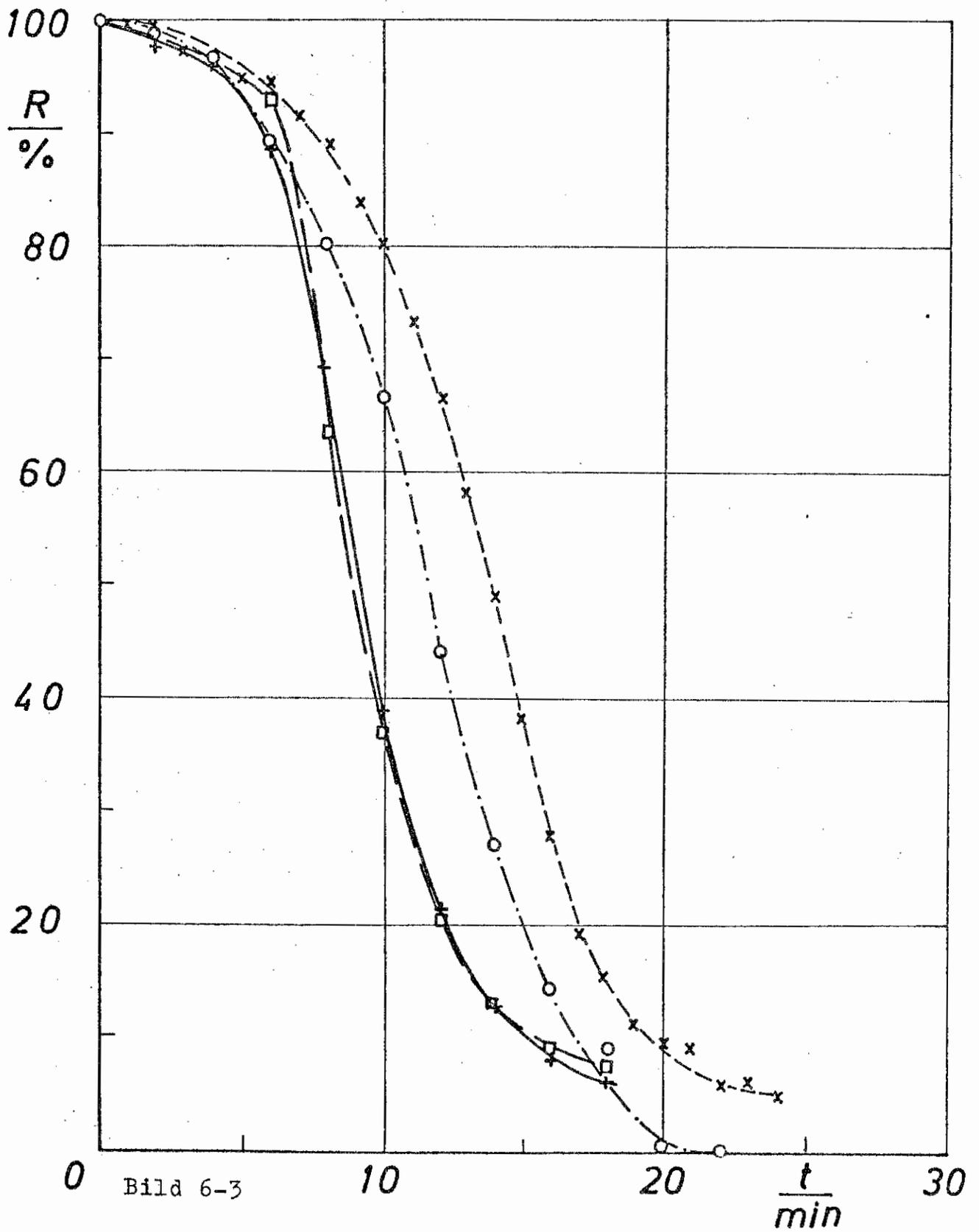


Bild 6-3

Versuch 24 x ---
25 o ---
32 + ---
34 □ ---

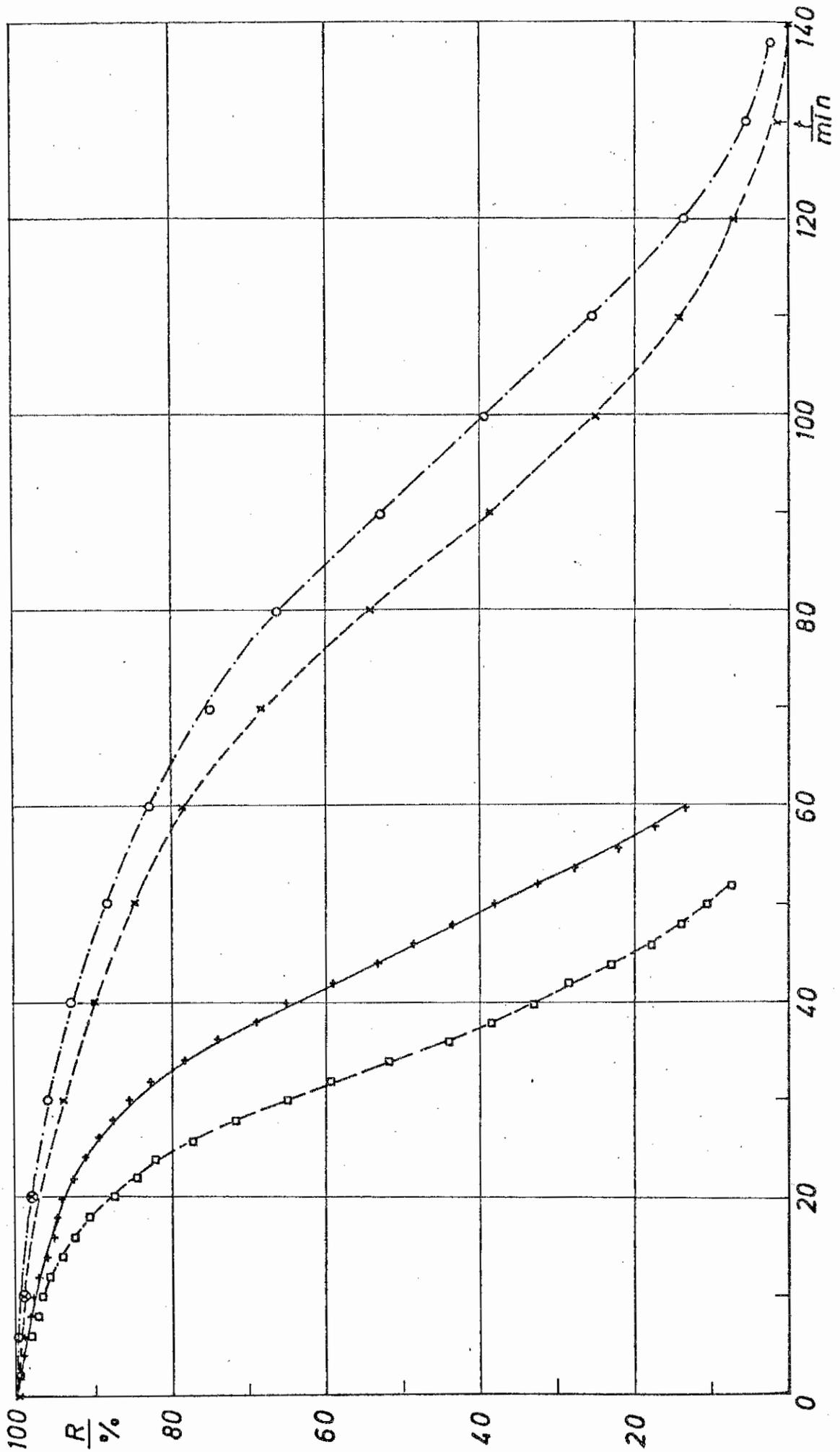


Bild 6-4

Versuch 16 x ----- 18+ ———
" 17 o ----- 23□ ———

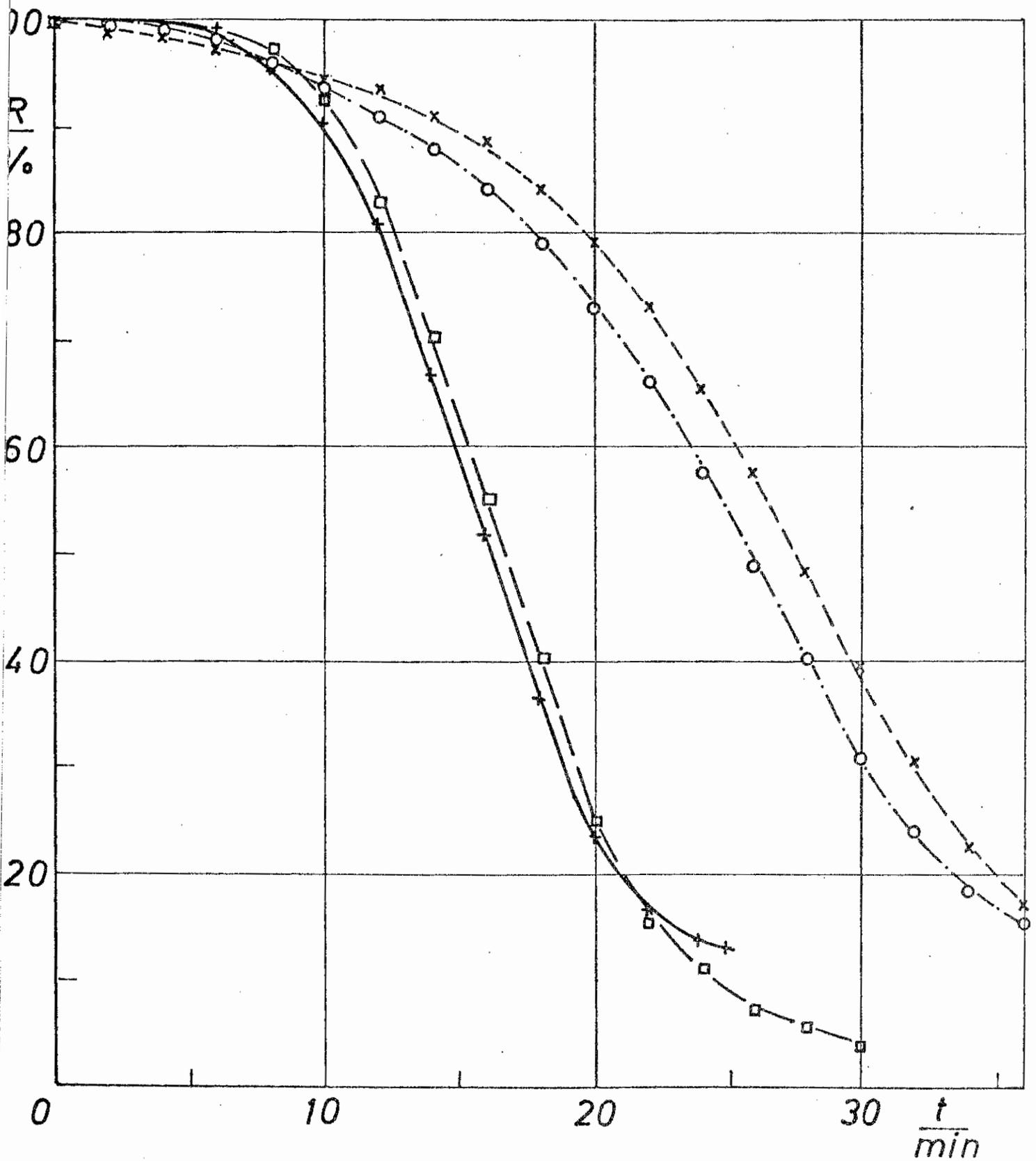


Bild 6-5

Versuch 19 x - - - -
" 20 o - . - . -
" 21 + - - - -
" 22 □ - - - -

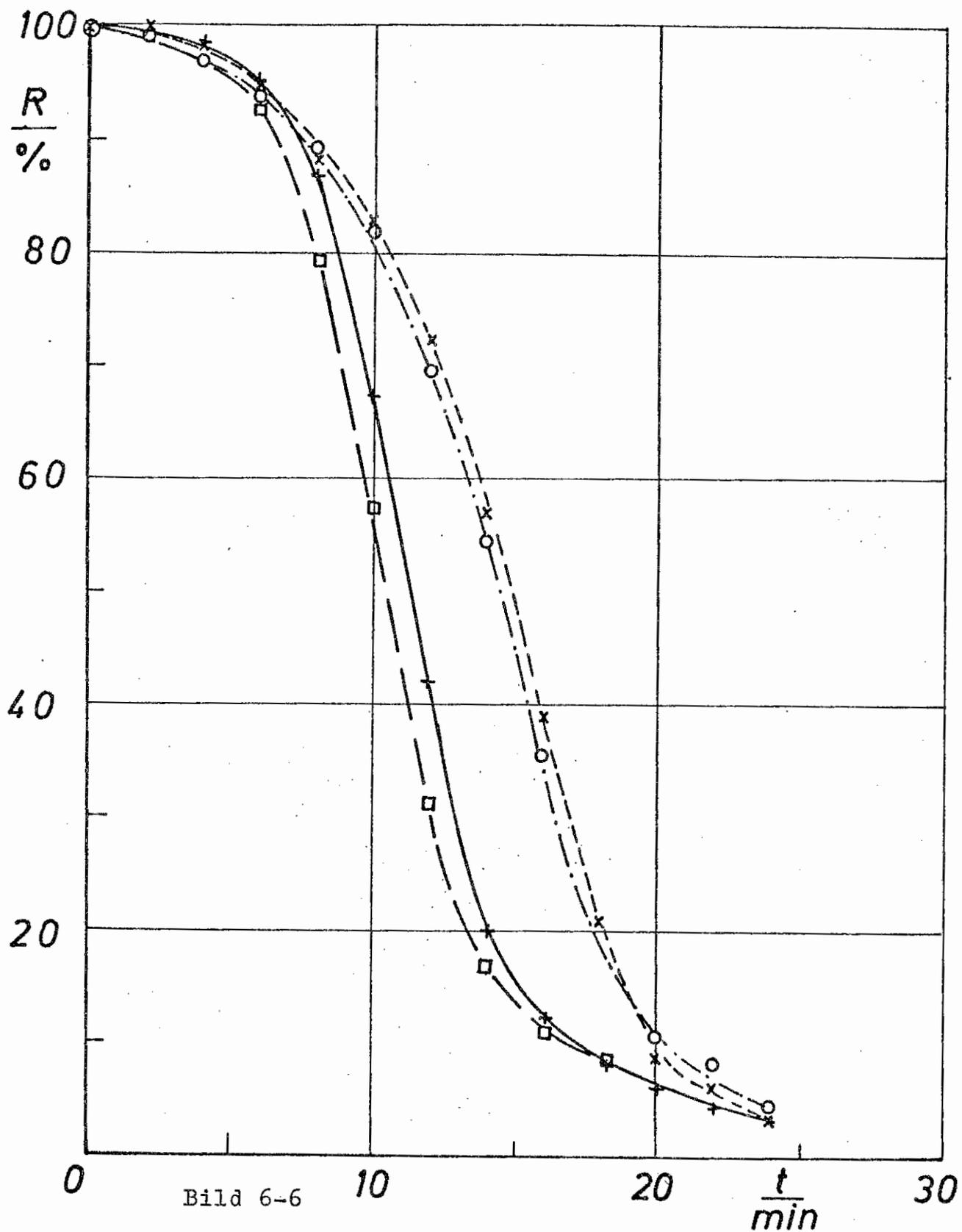


Bild 6-6

Versuch 14 * - - - -

" 12 + - - - -

" 13 □ - - - -

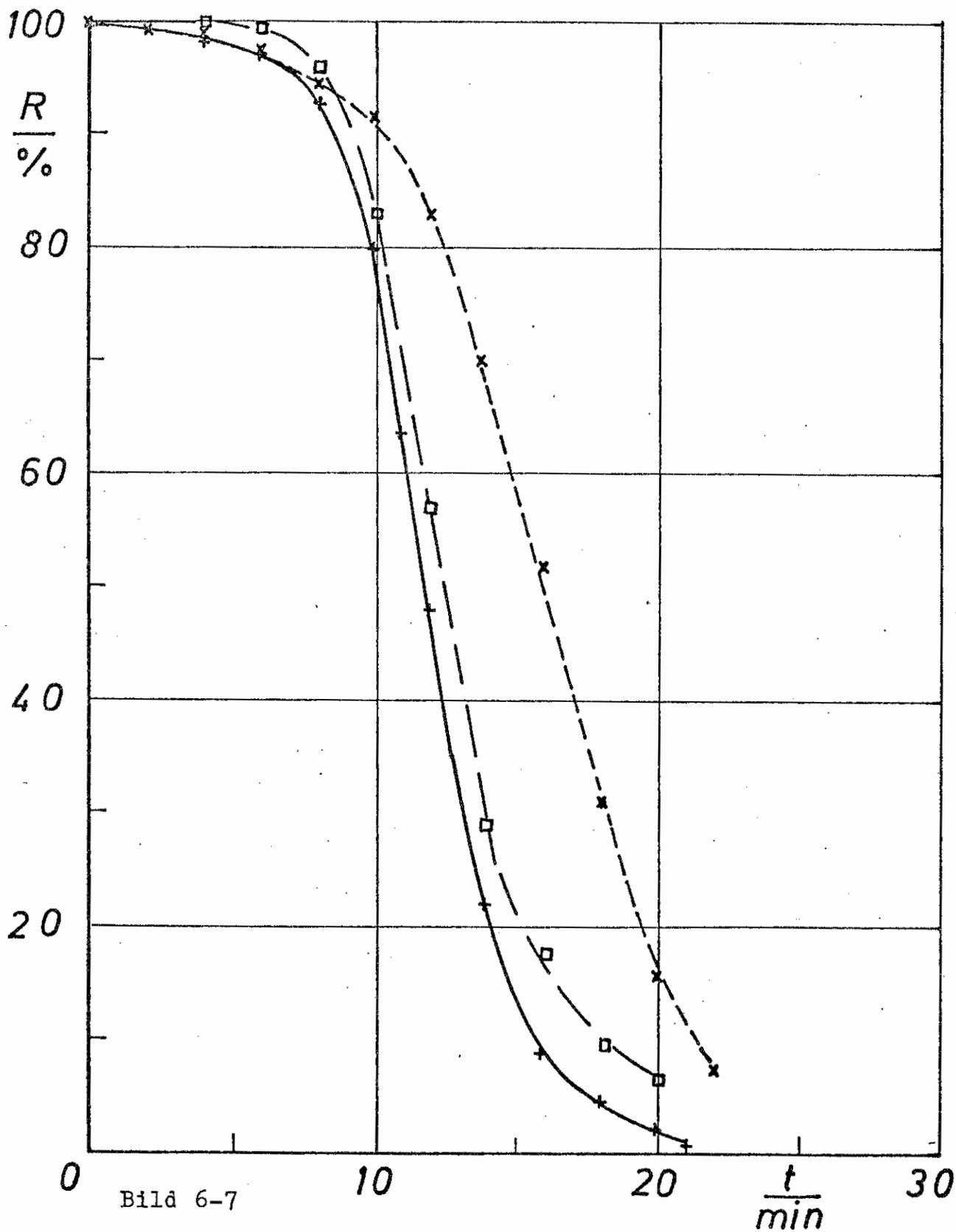


Bild 6-7

Versuch	30	x	-----
"	31	o	-.-.-
"	33	+	————
"	35	□	-----

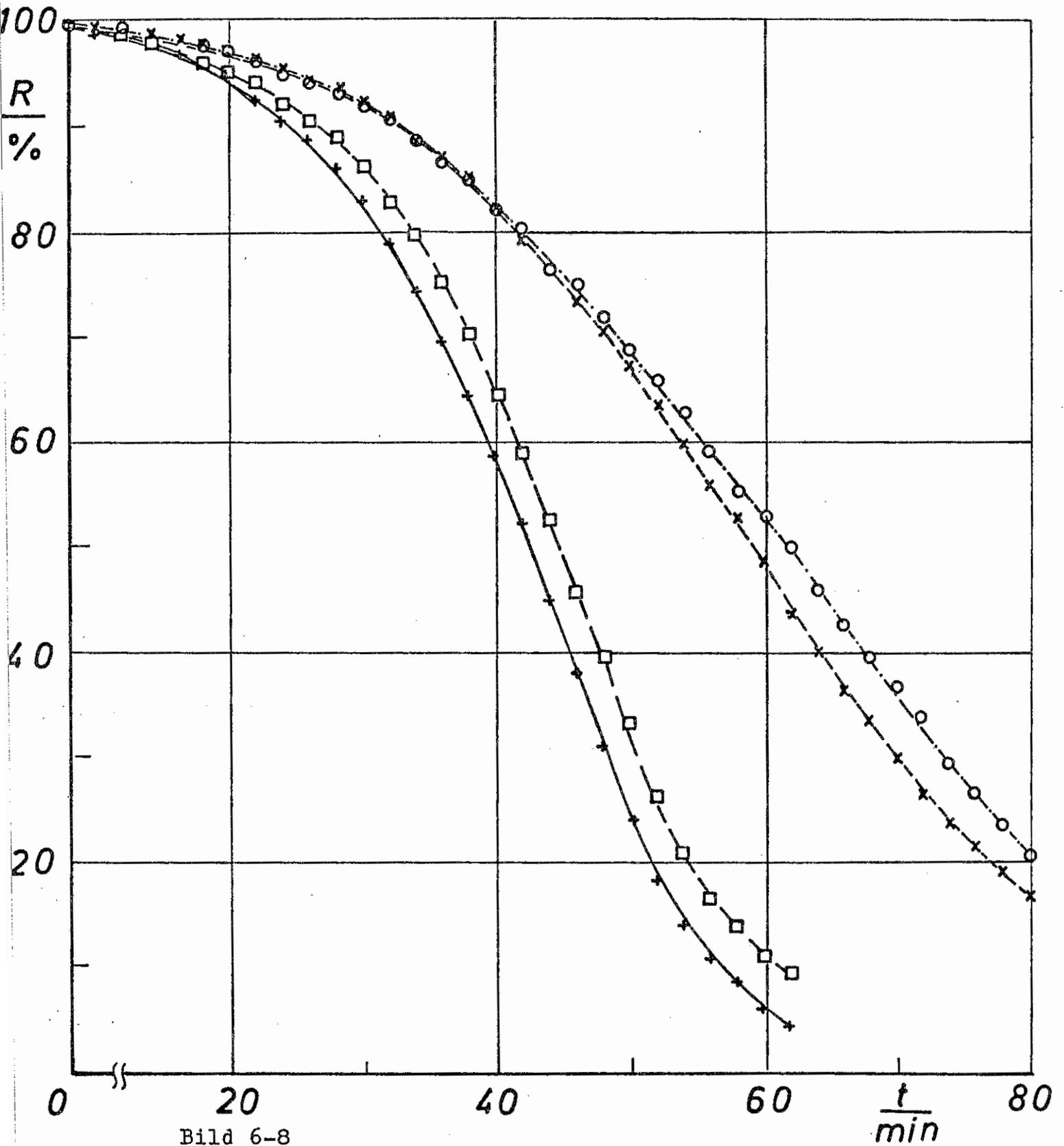


Bild 6-8

Versuch 28 x - - - - 26 + ———
" 29 o ——— 27 □ - - - -

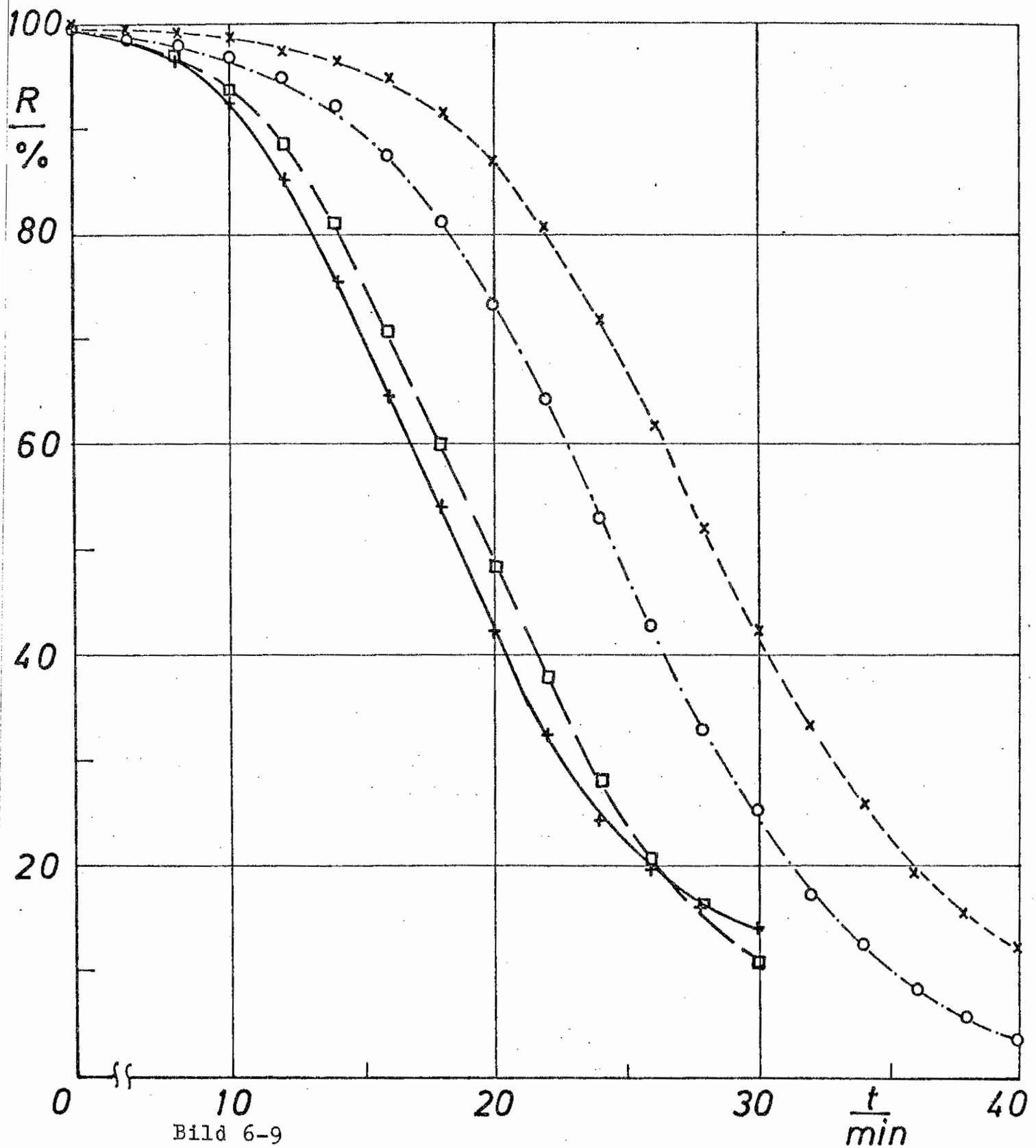


Bild 6-9

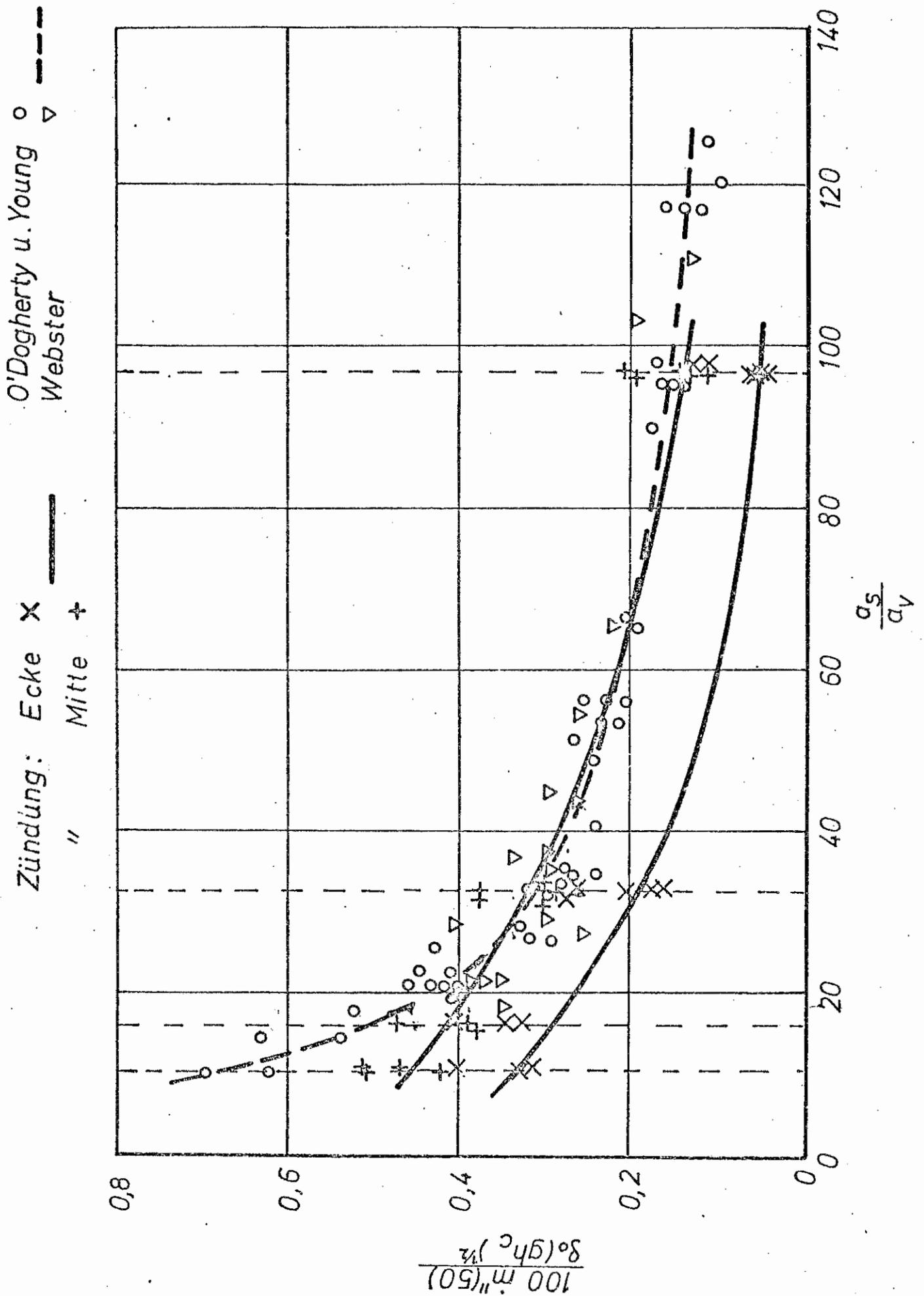


Bild 6-10

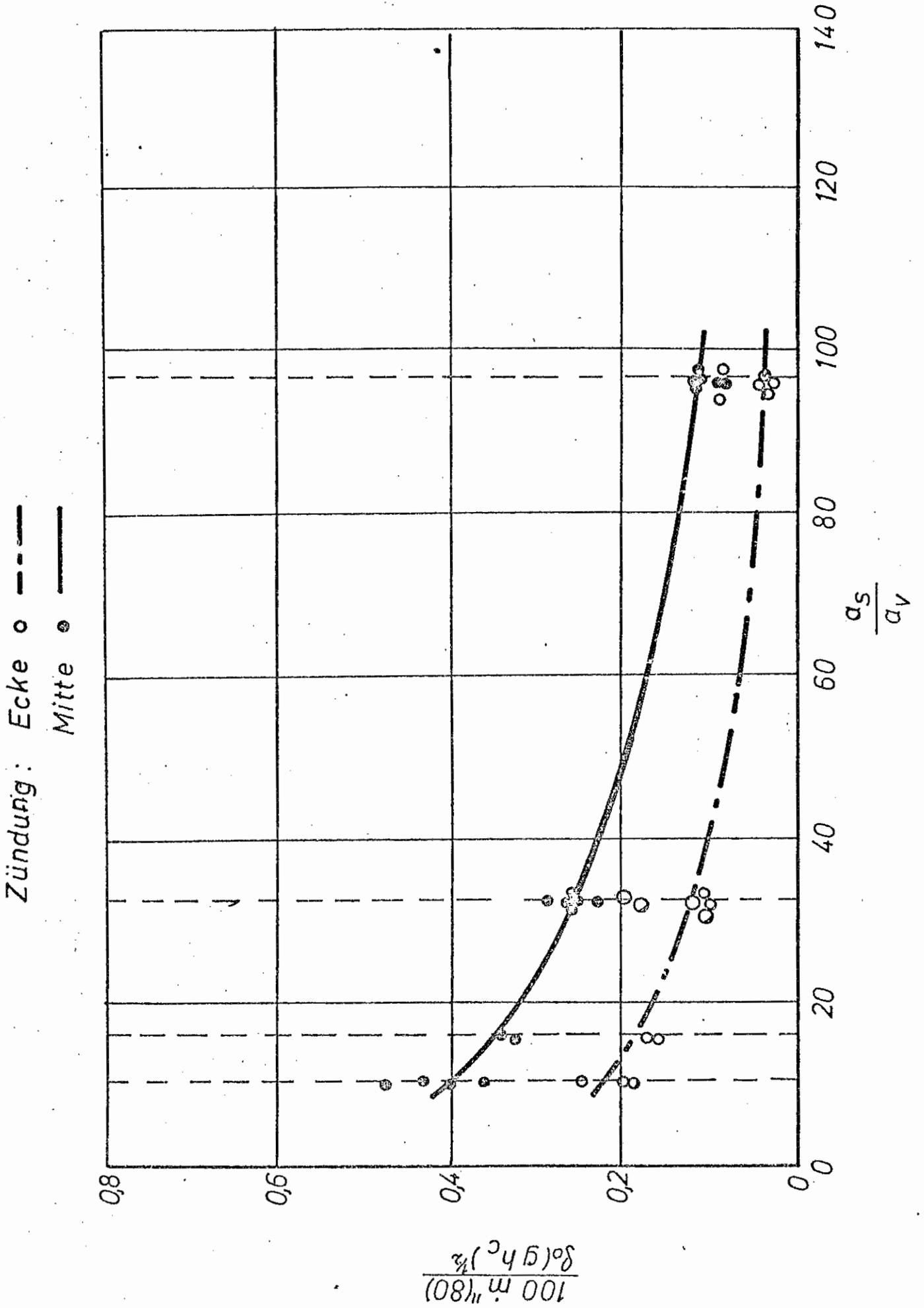


Bild 6-11

Ecke

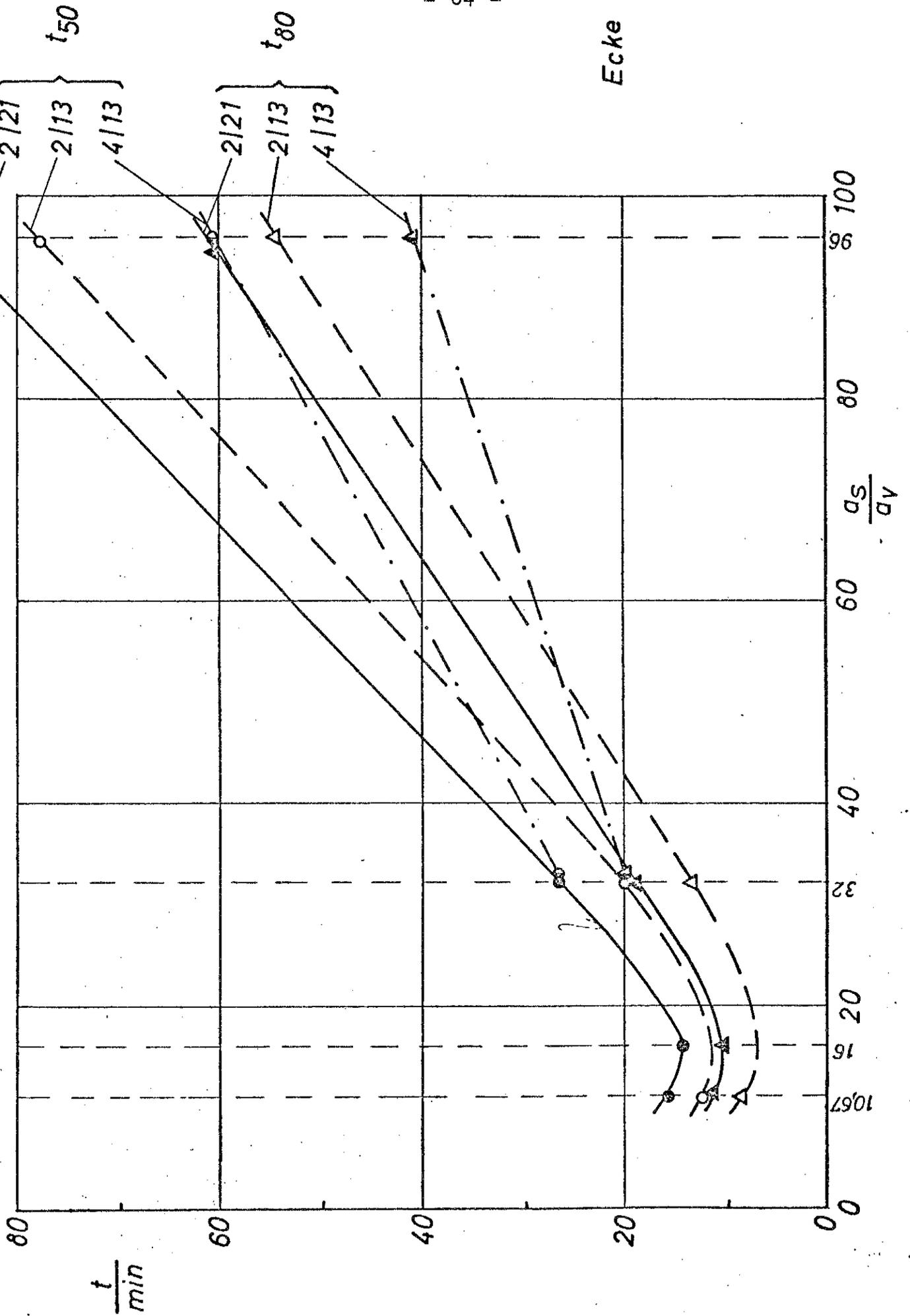


Bild 6-12

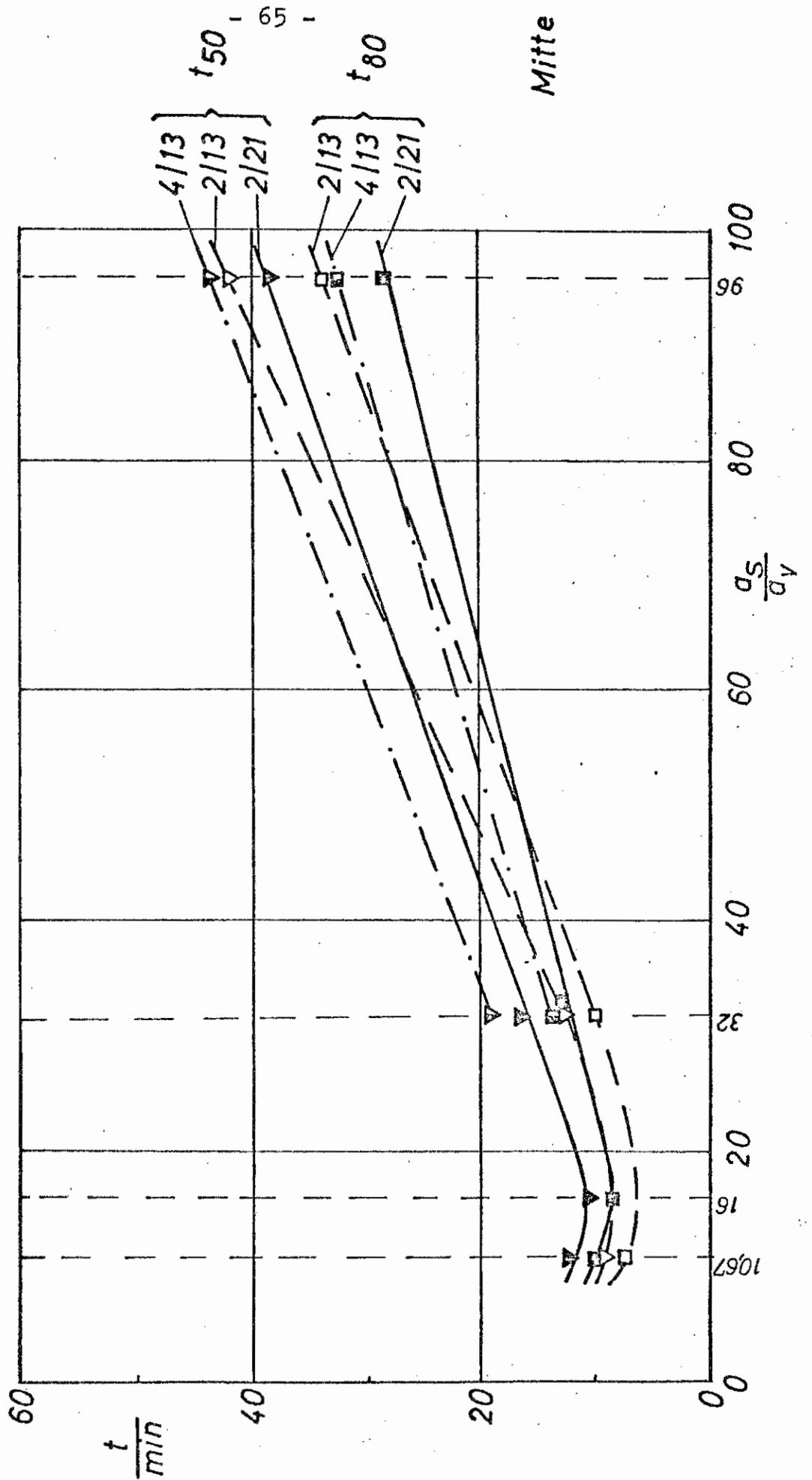


Bild 6-13

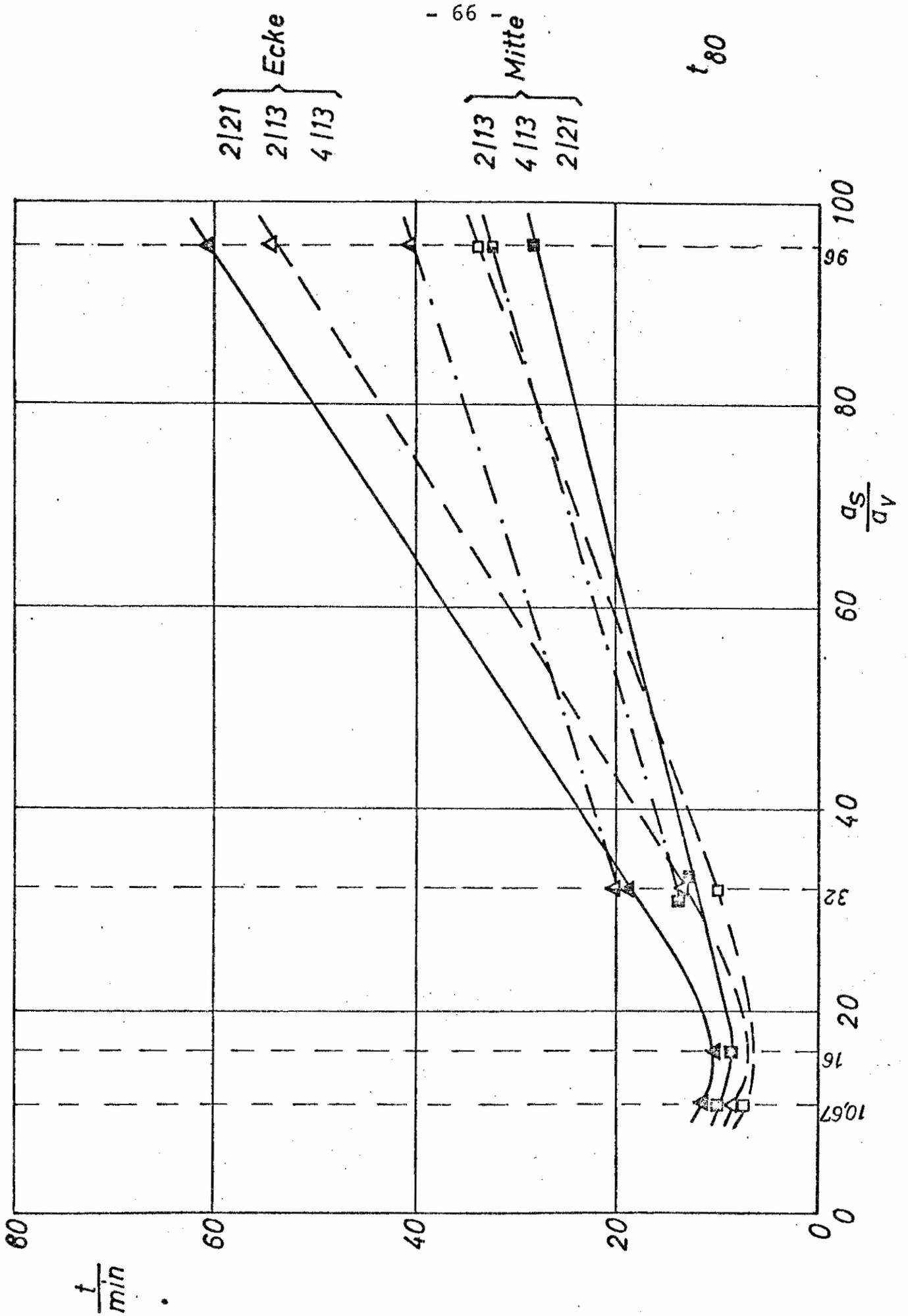


Bild 6-14

t₅₀

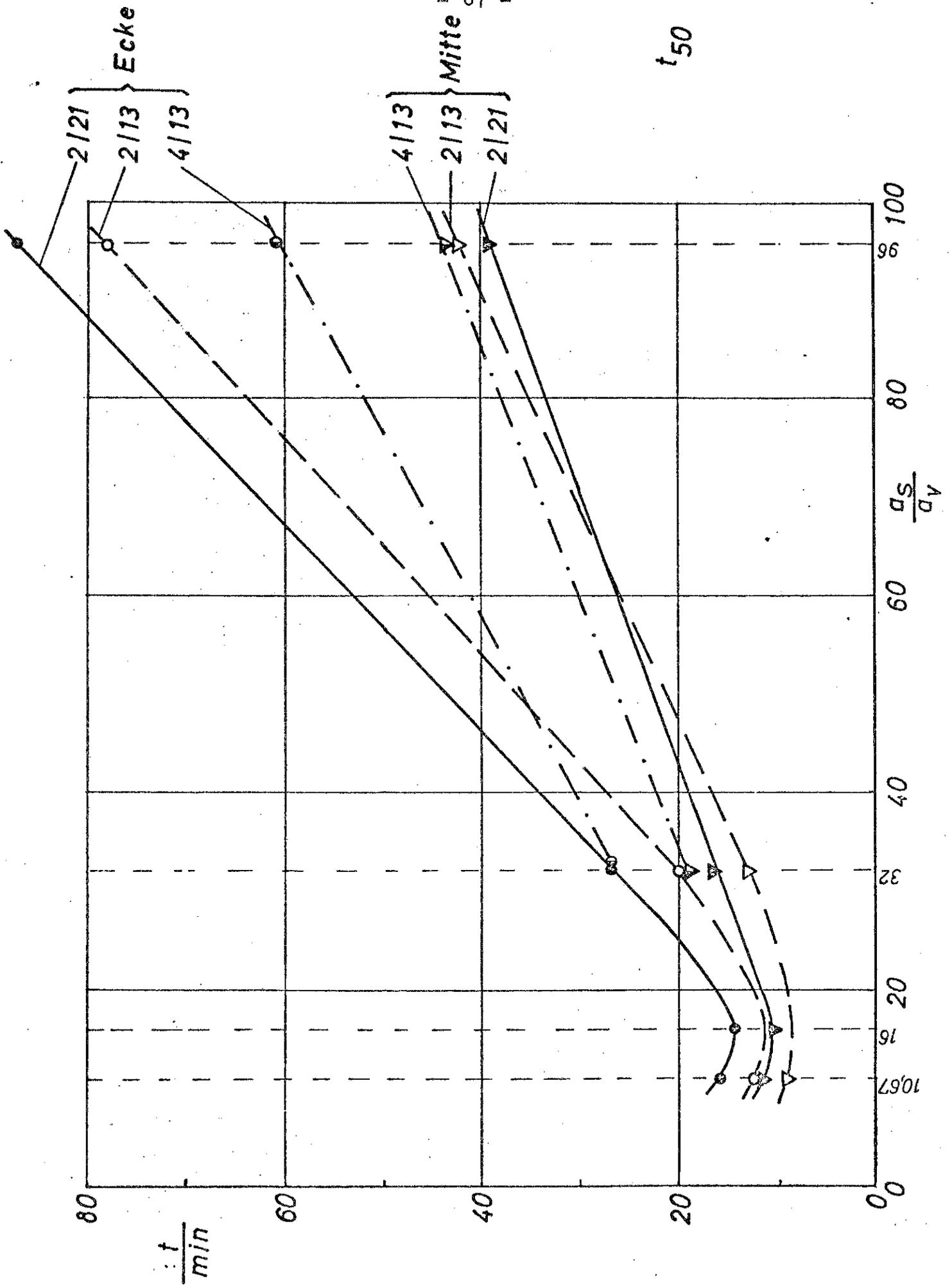


Bild 6-15

Versuch 1 x T12 ———
max Temp. - - - -
min " - - - -

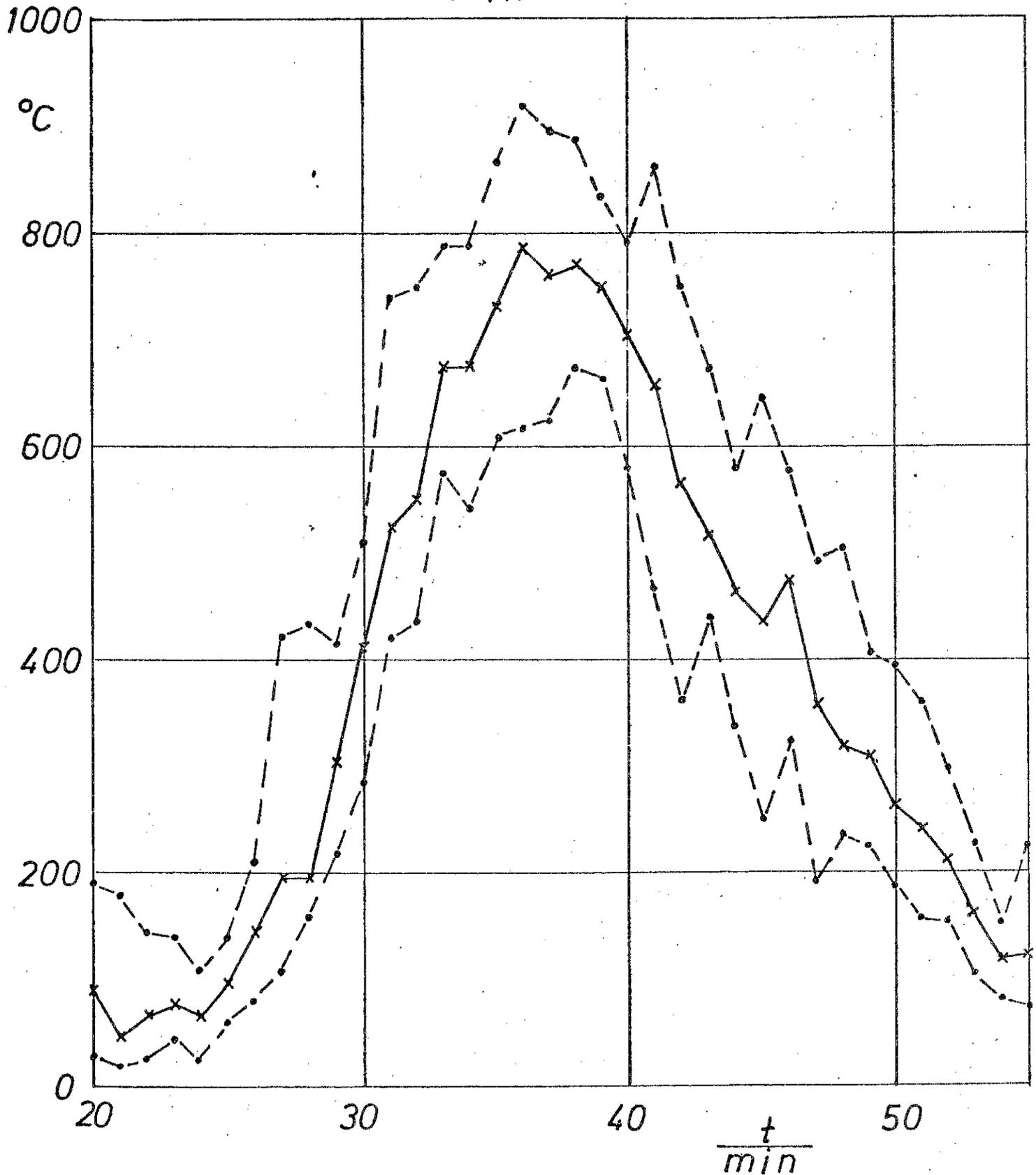
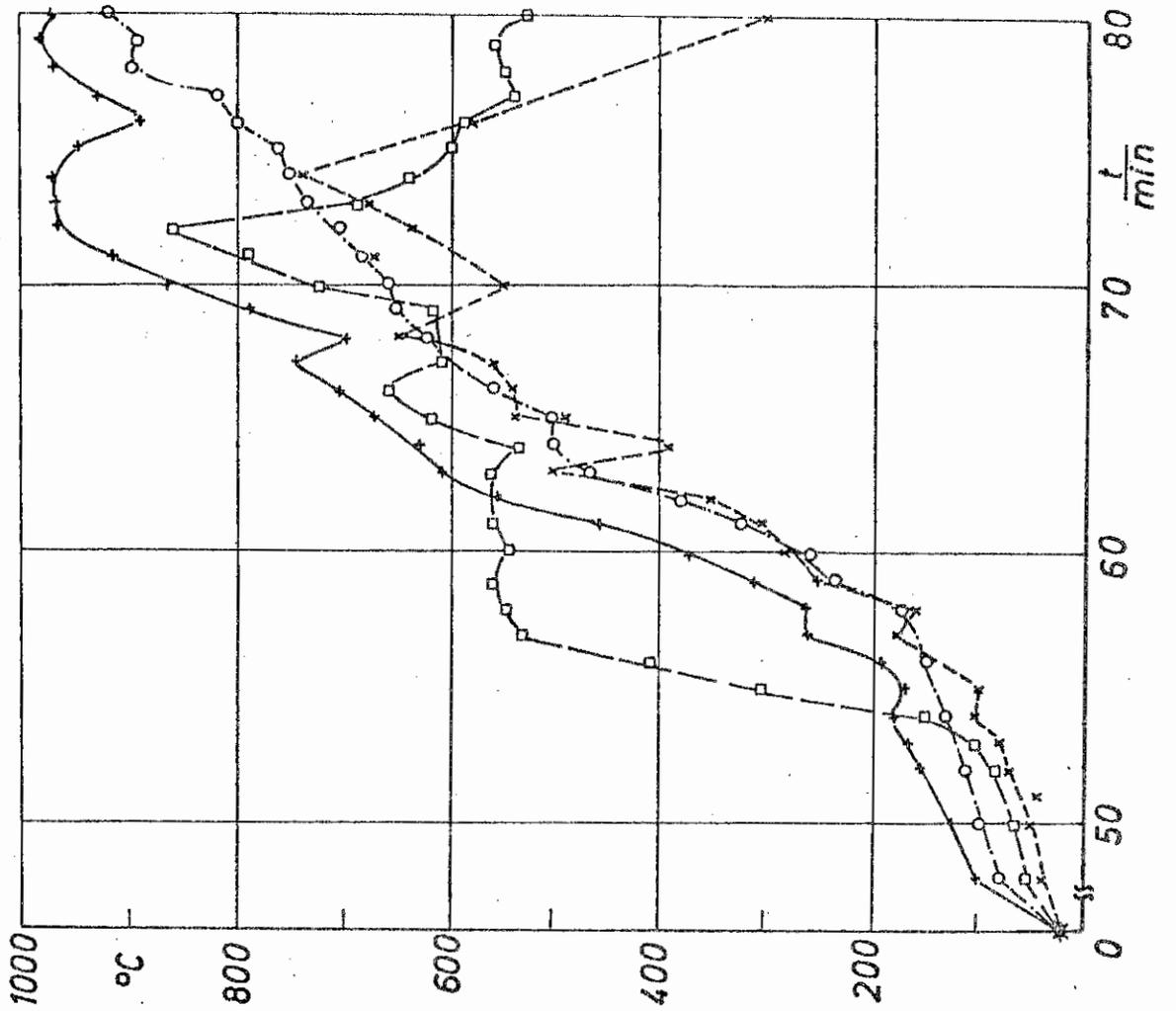


Bild 6-16

Versuch 2
x T 1
o T 2
+ T 3
□ T 4



Versuch 1
x T 1
o T 2
+ T 3
□ T 4

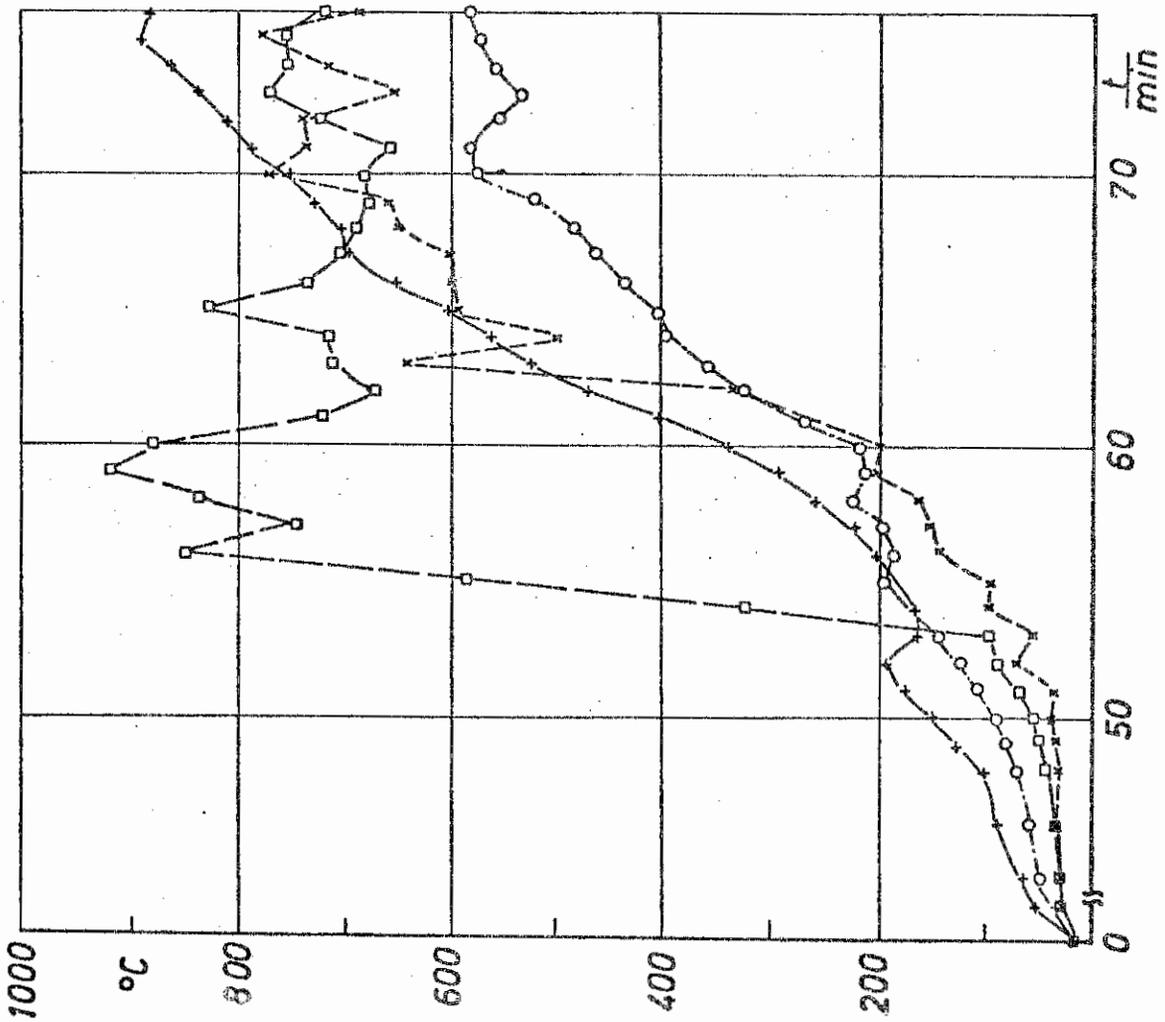


Bild 6-17

Versuch 1
x T 5
o T 6
+ T 7
□ T 8

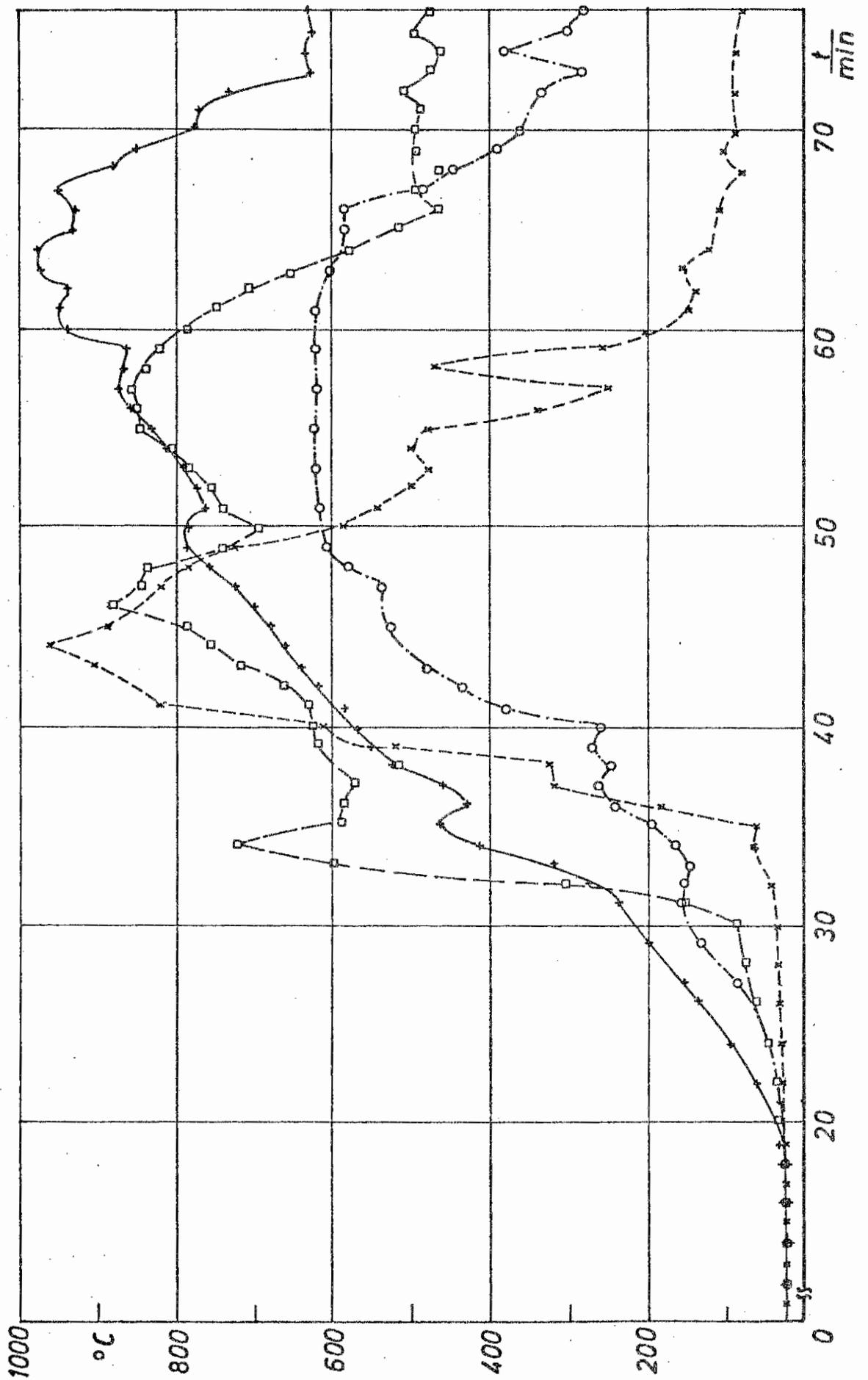


Bild 6-18

Versuch 2 * T 5 ---
o T 6 ---
+ T 7 ---
□ T 8 ---

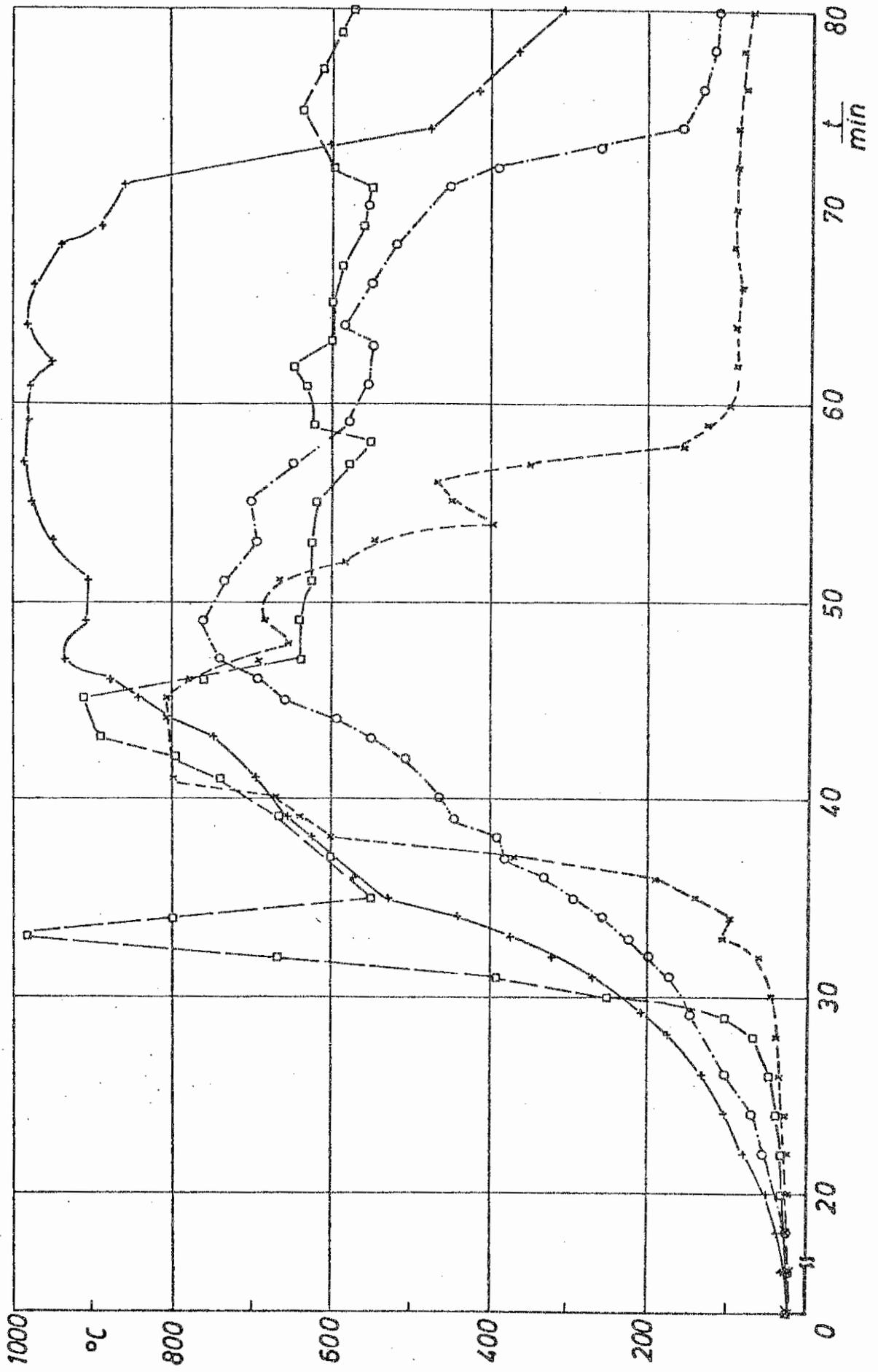
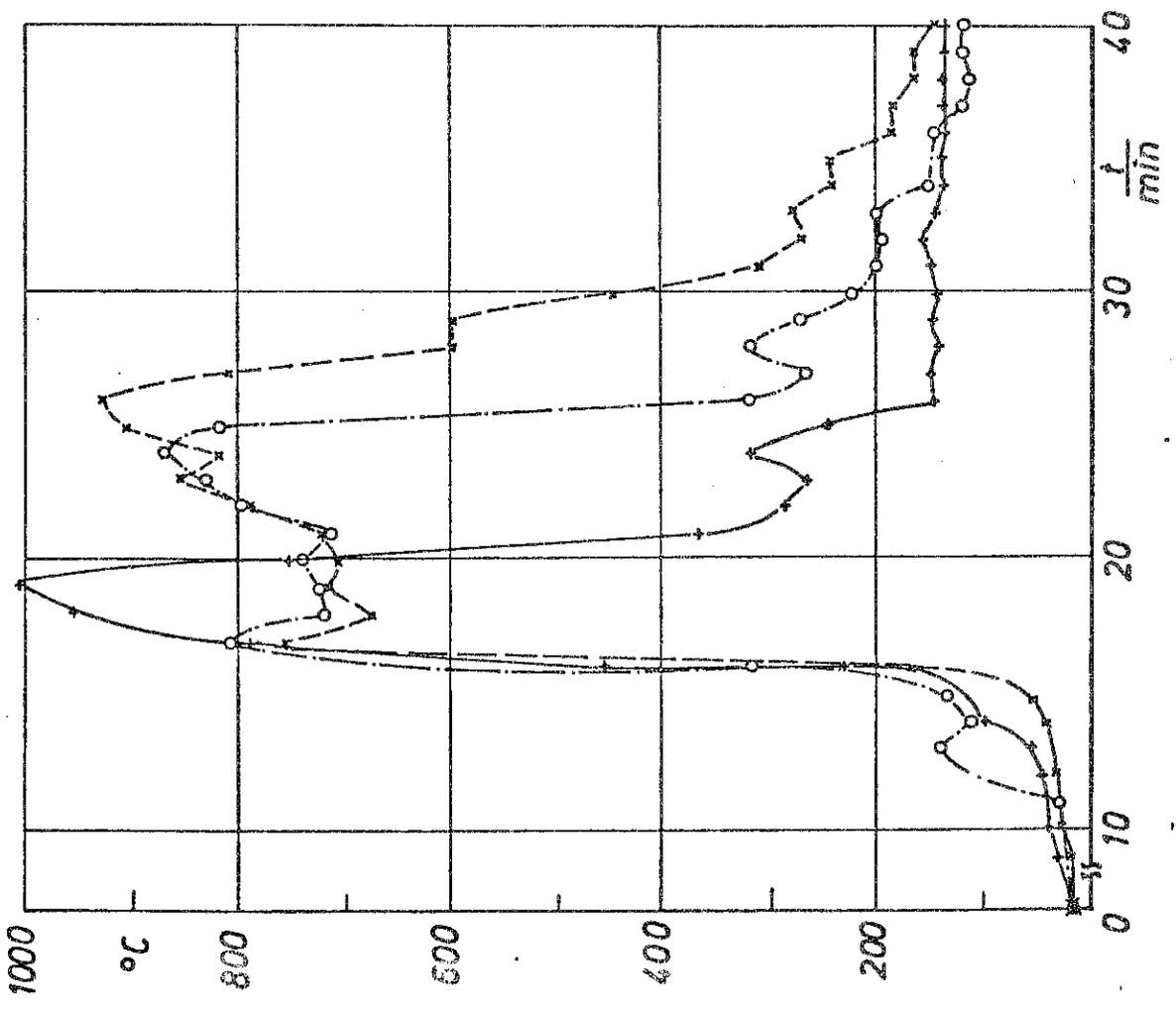


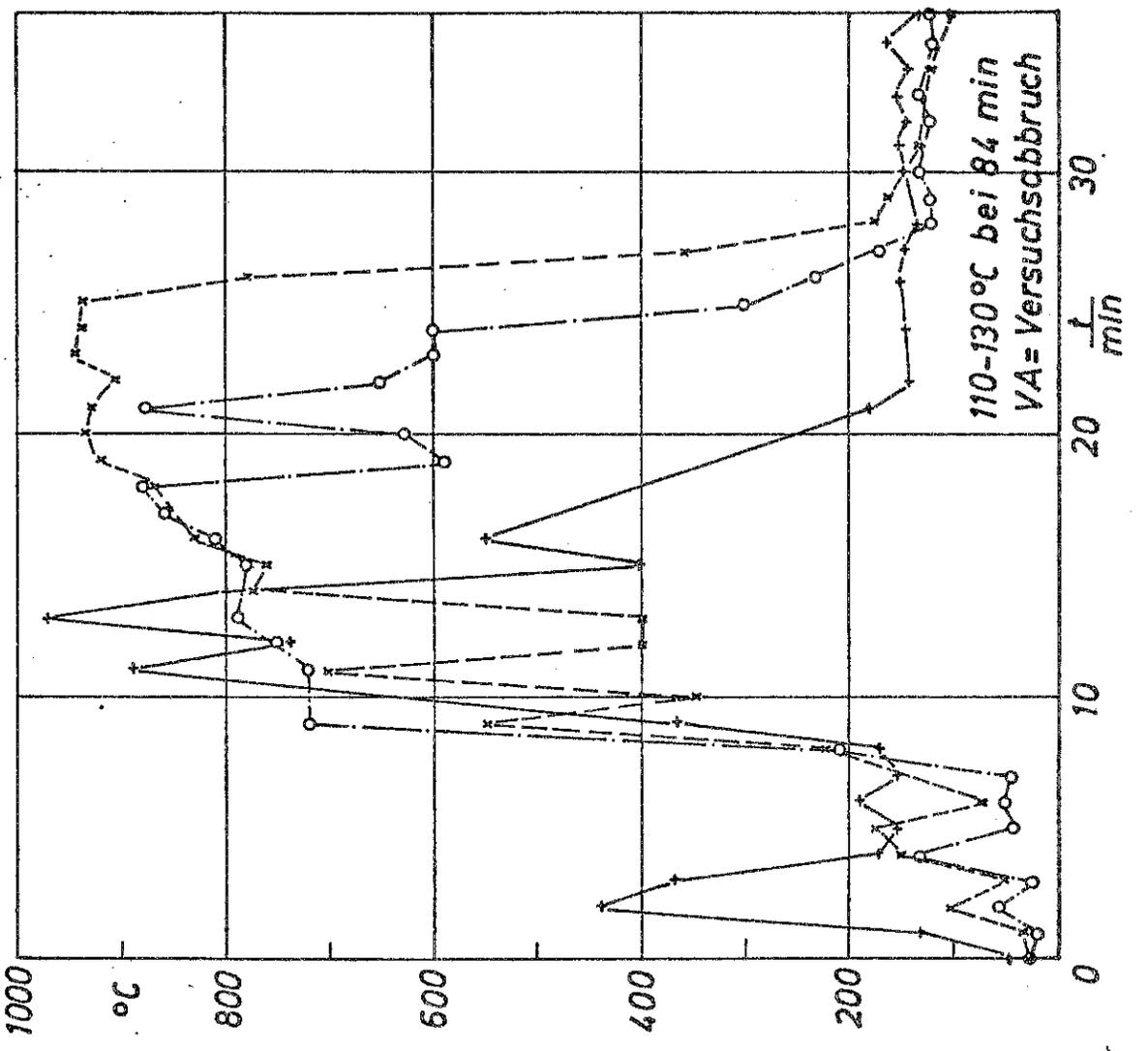
Bild 6-19

Bild 6-20

Versuch 1 * T 9 ---
o T 10 ---
+ T 11 ---



Versuch 2 * T 9 ---
o T 10 ---
+ T 11 ---



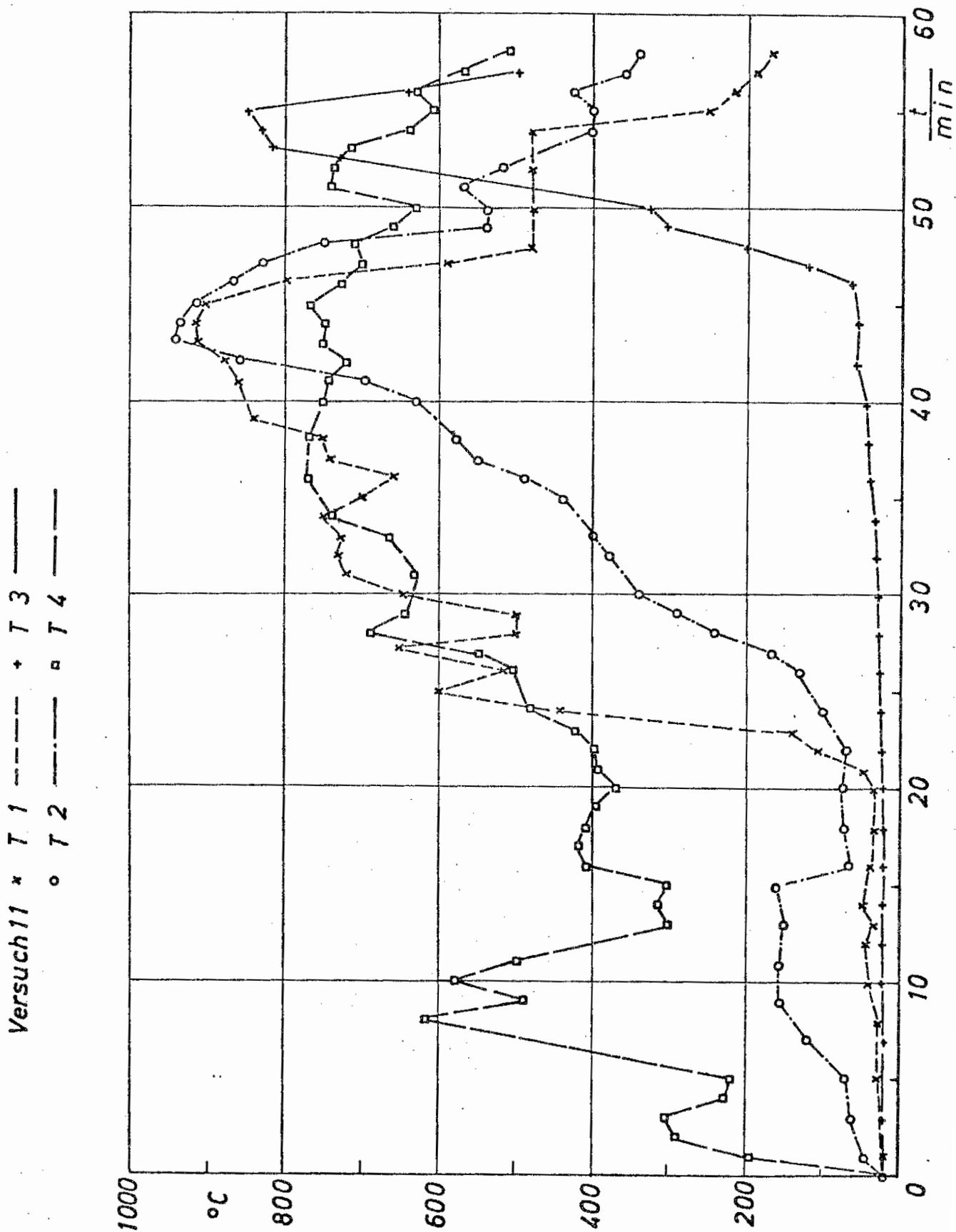


Bild 6-21

Versuch 11 * 75 - - - - - * 77 - - - - -
o 76 - - - - - □ 78 - - - - -

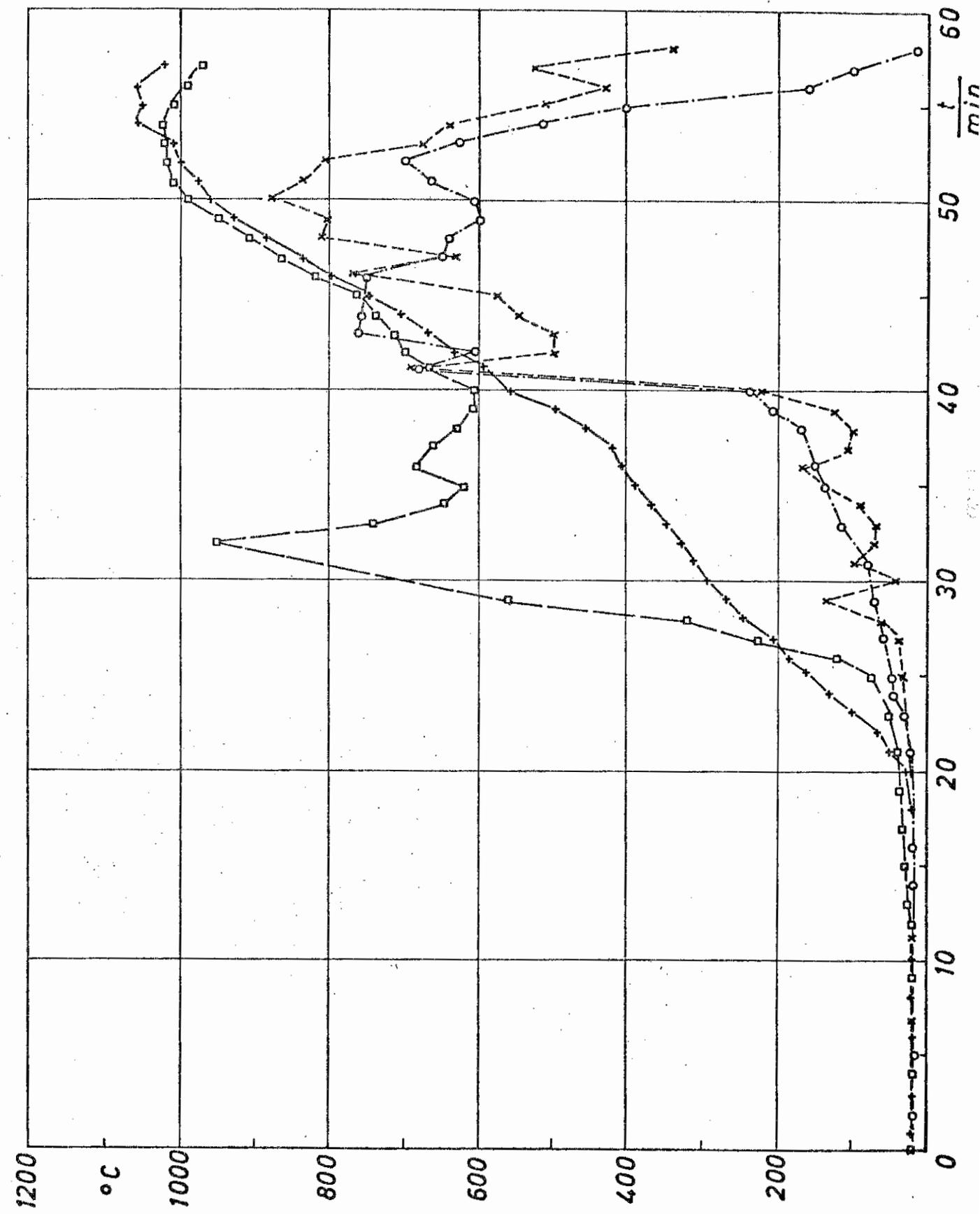


Bild 6-22

Versuch 11 * T 9 ---
o T 10 ---
+ T 11 ---

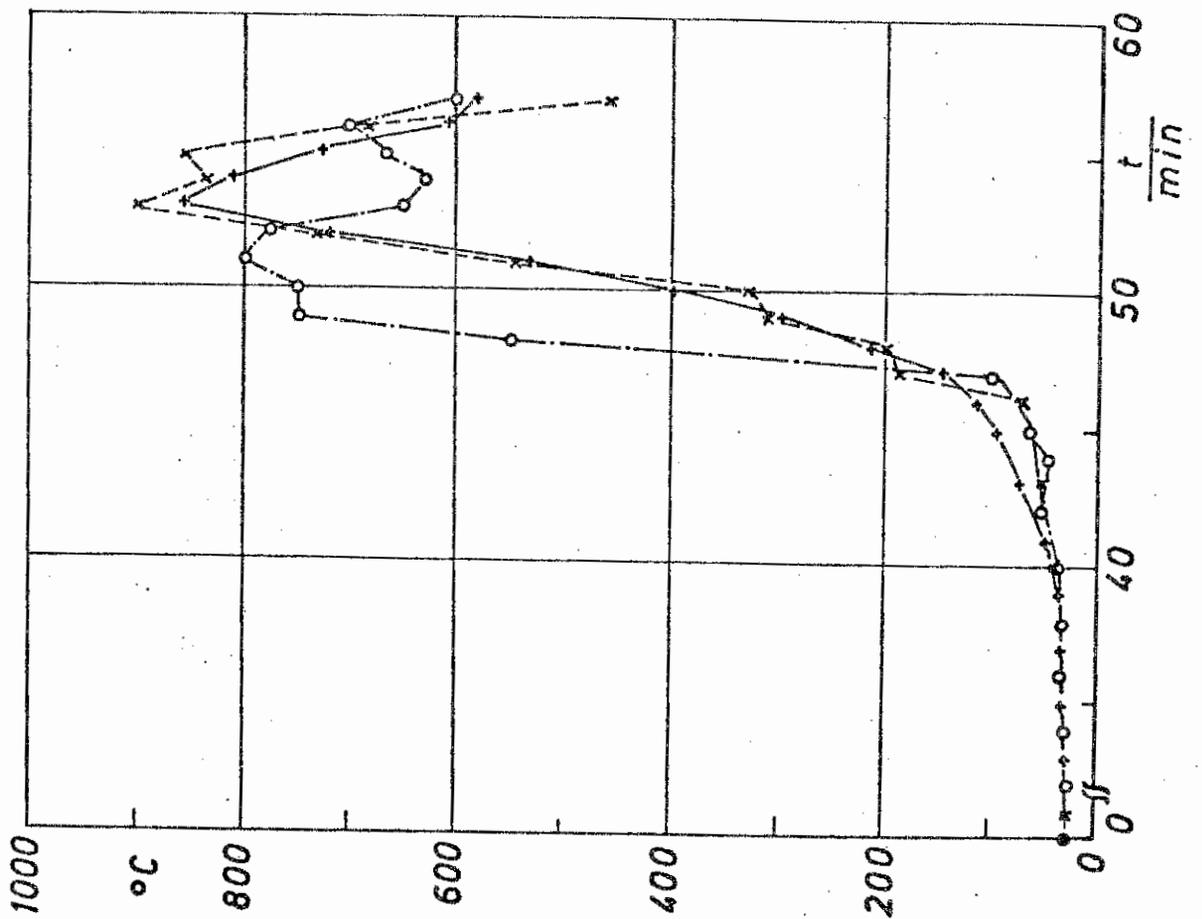
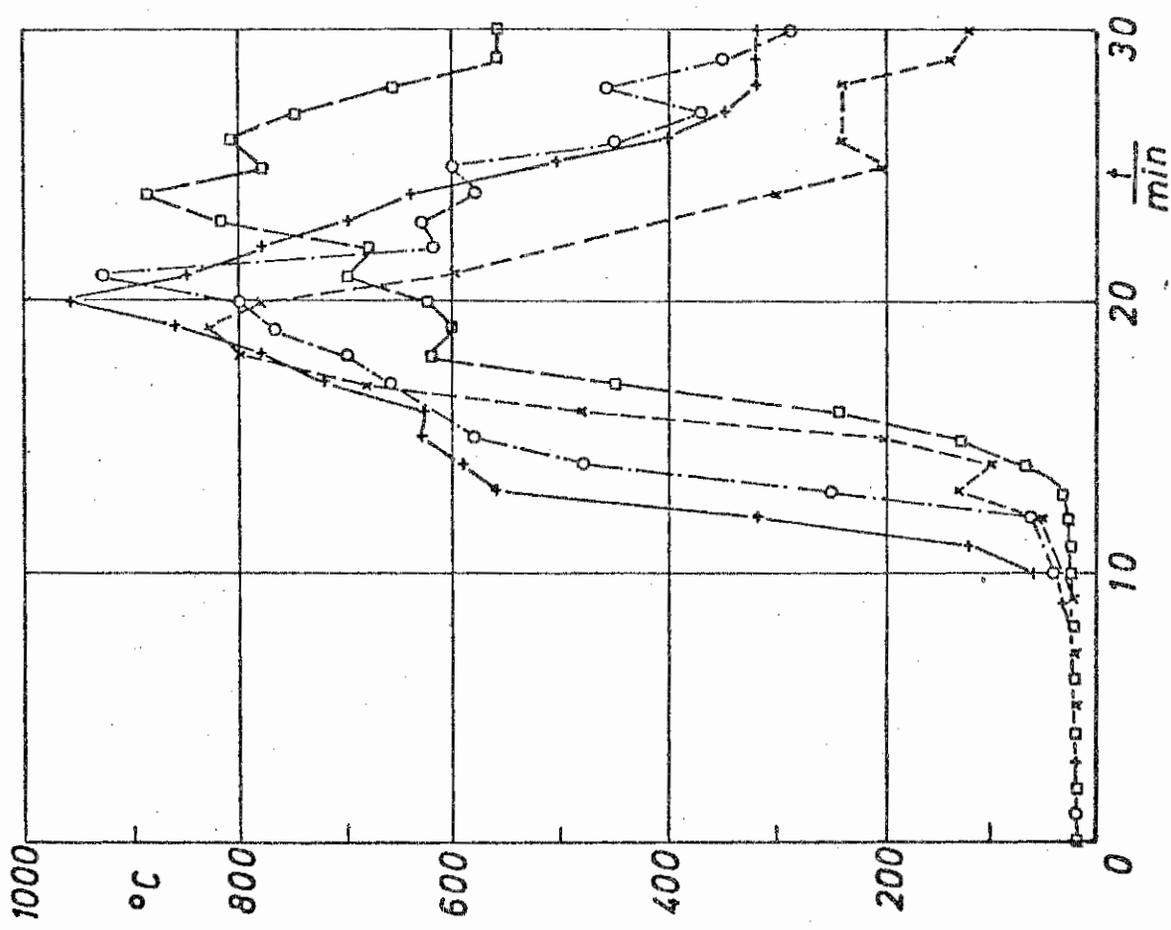


Bild 6- 23

Versuch 5 * T 1
o T 2
+ T 3
□ T 4



Versuch 6 * T 1
o T 2
+ T 3
□ T 4

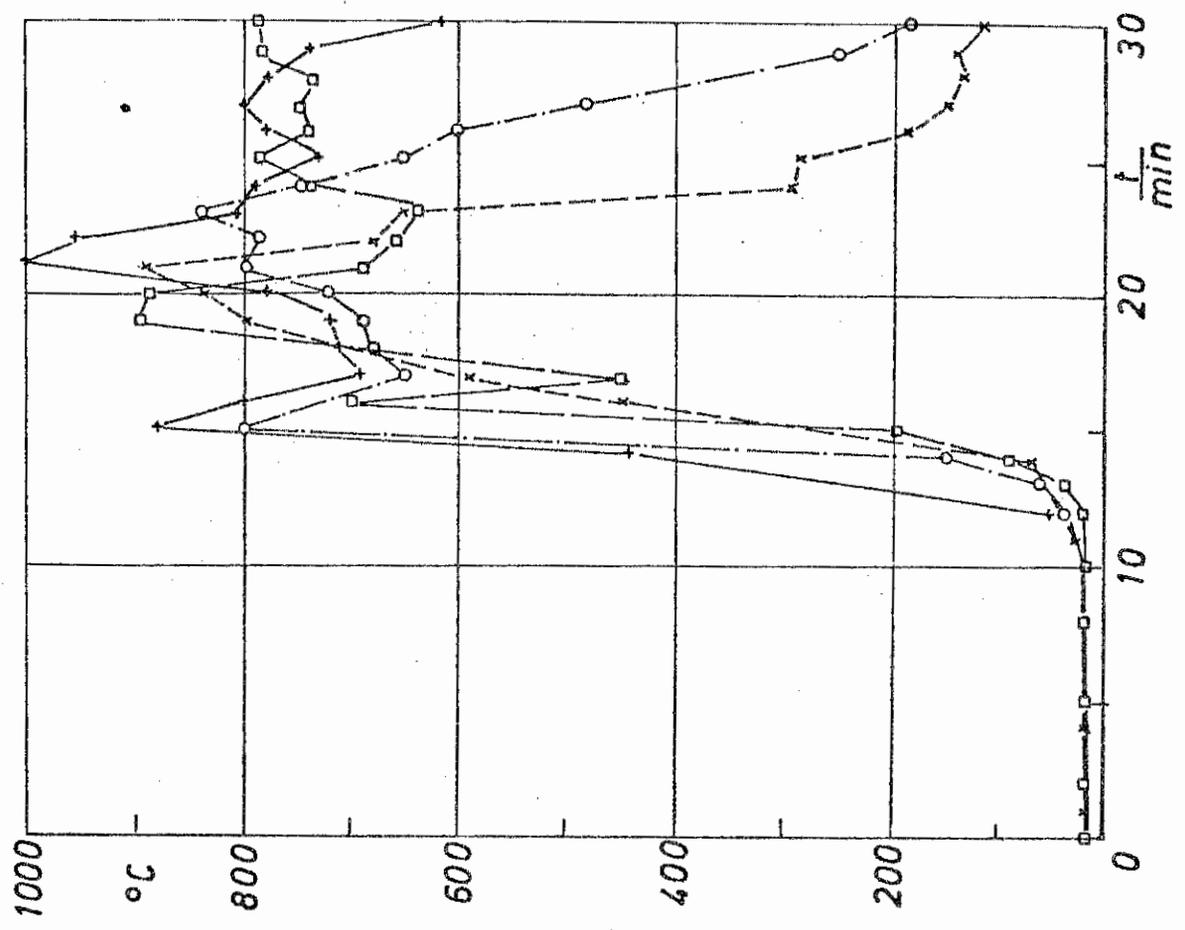
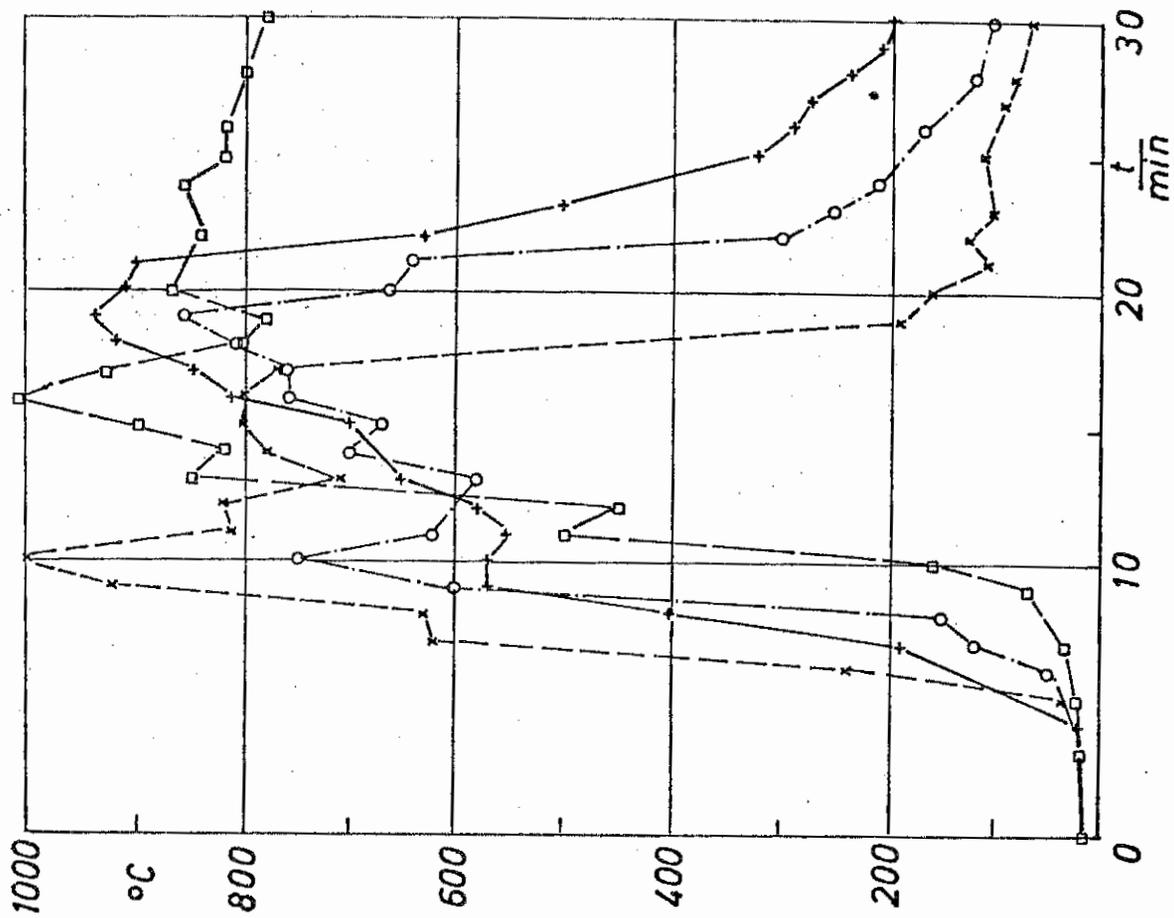


Bild 6-24

Versuch 6 * T 5
o T 6
+ T 7
□ T 8



Versuch 5 * T 5
o T 6
+ T 7
□ T 8

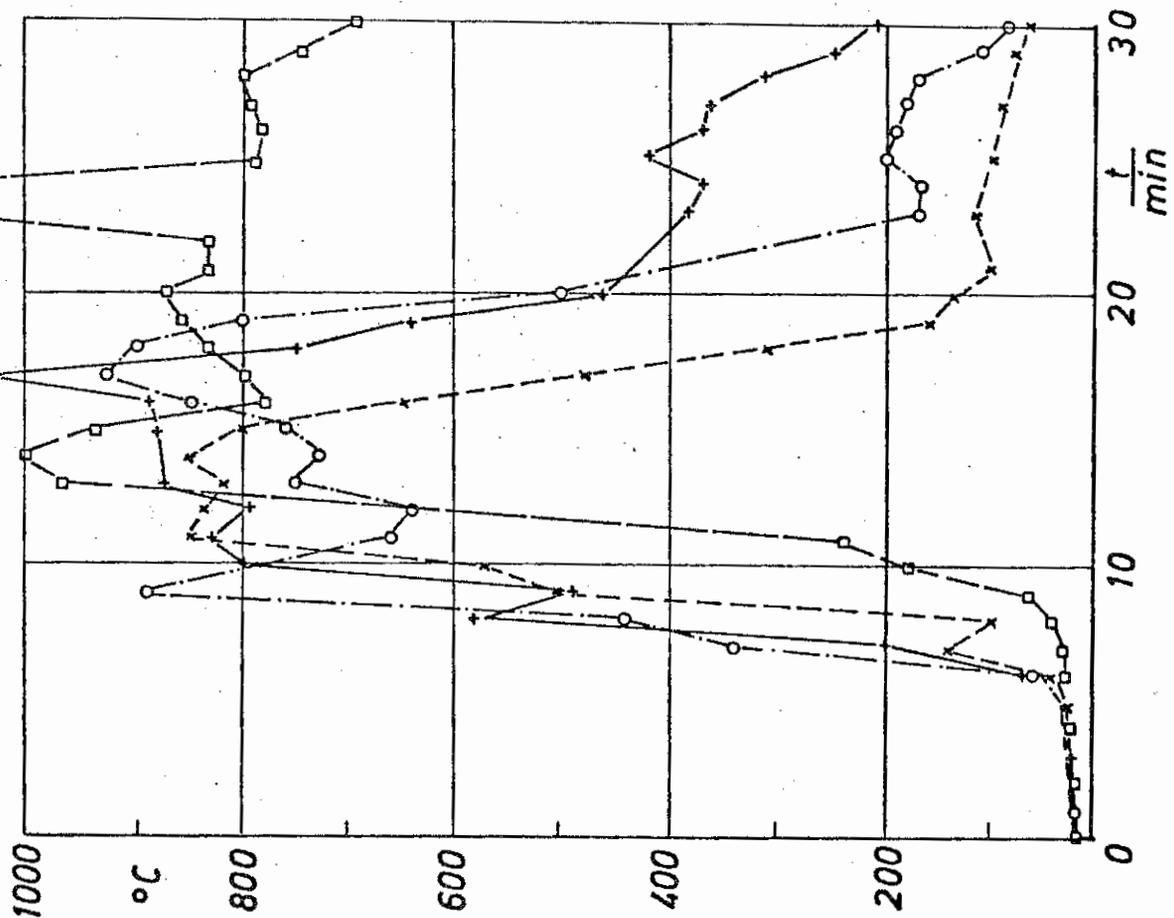
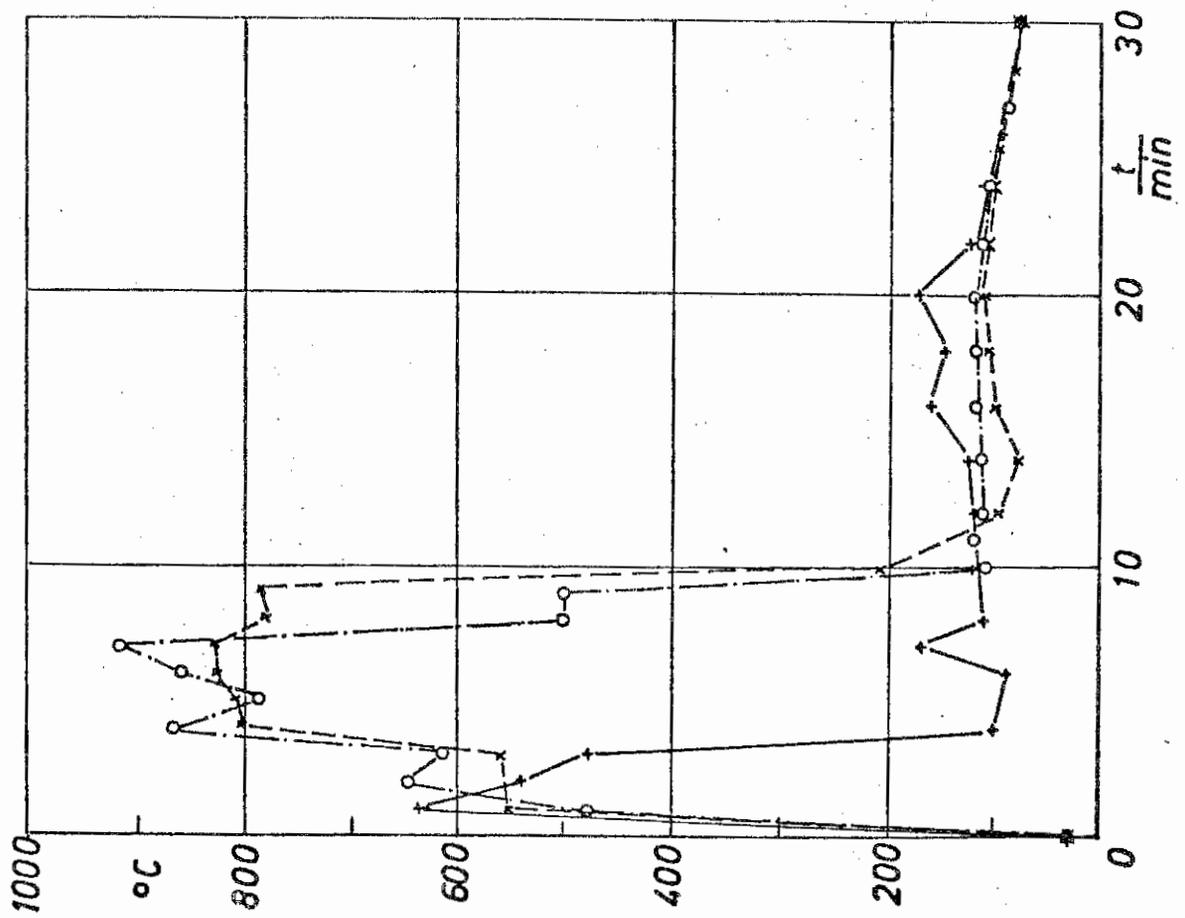


Bild 6-25

Versuch 5 * T 9
o T 10
+ T 11



Versuch 6 * T 9
o T 10
+ T 11

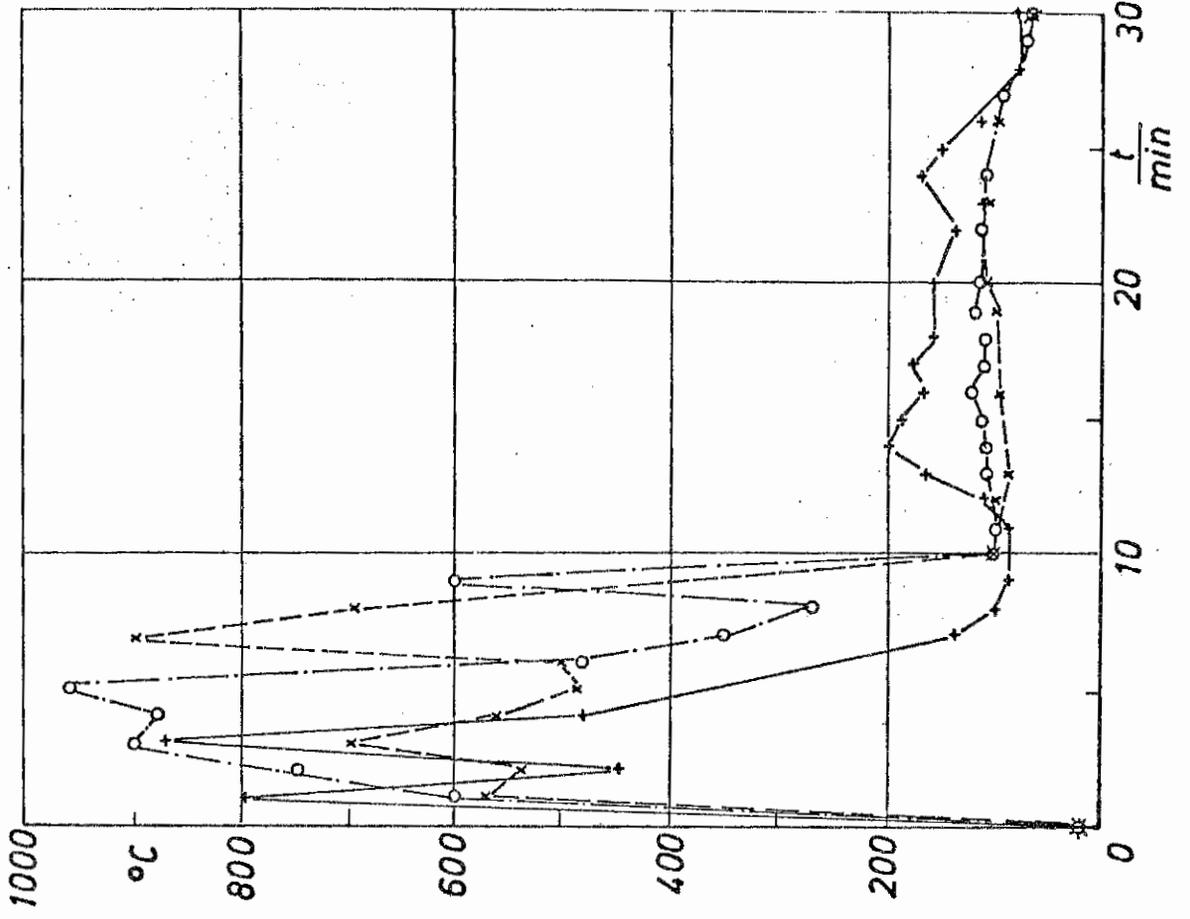
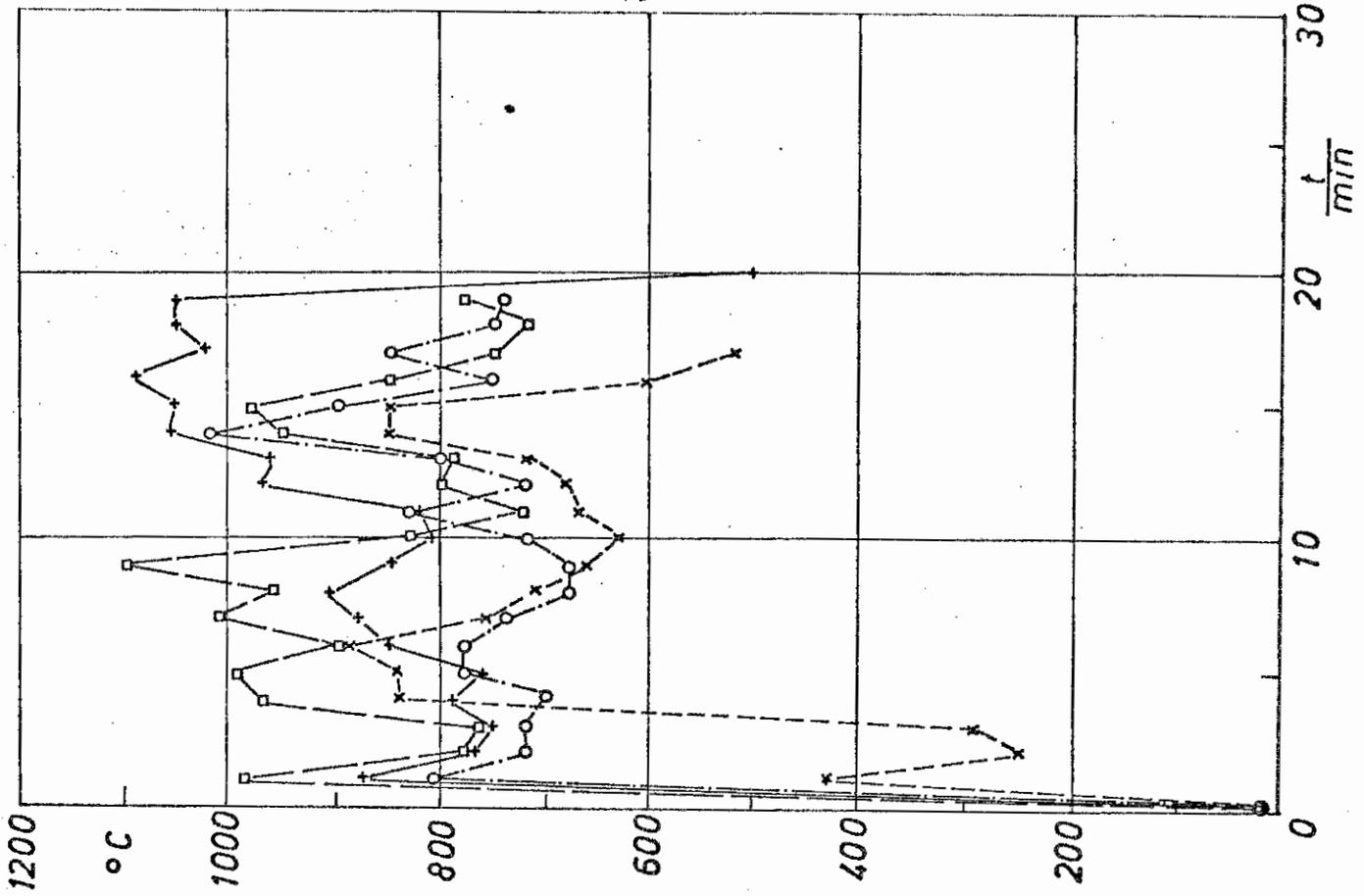


Bild 6-26

versuch 6-11

○ T 2 — □ T 4 —



versuch 6-13

○ T 2 — □ T 4 —

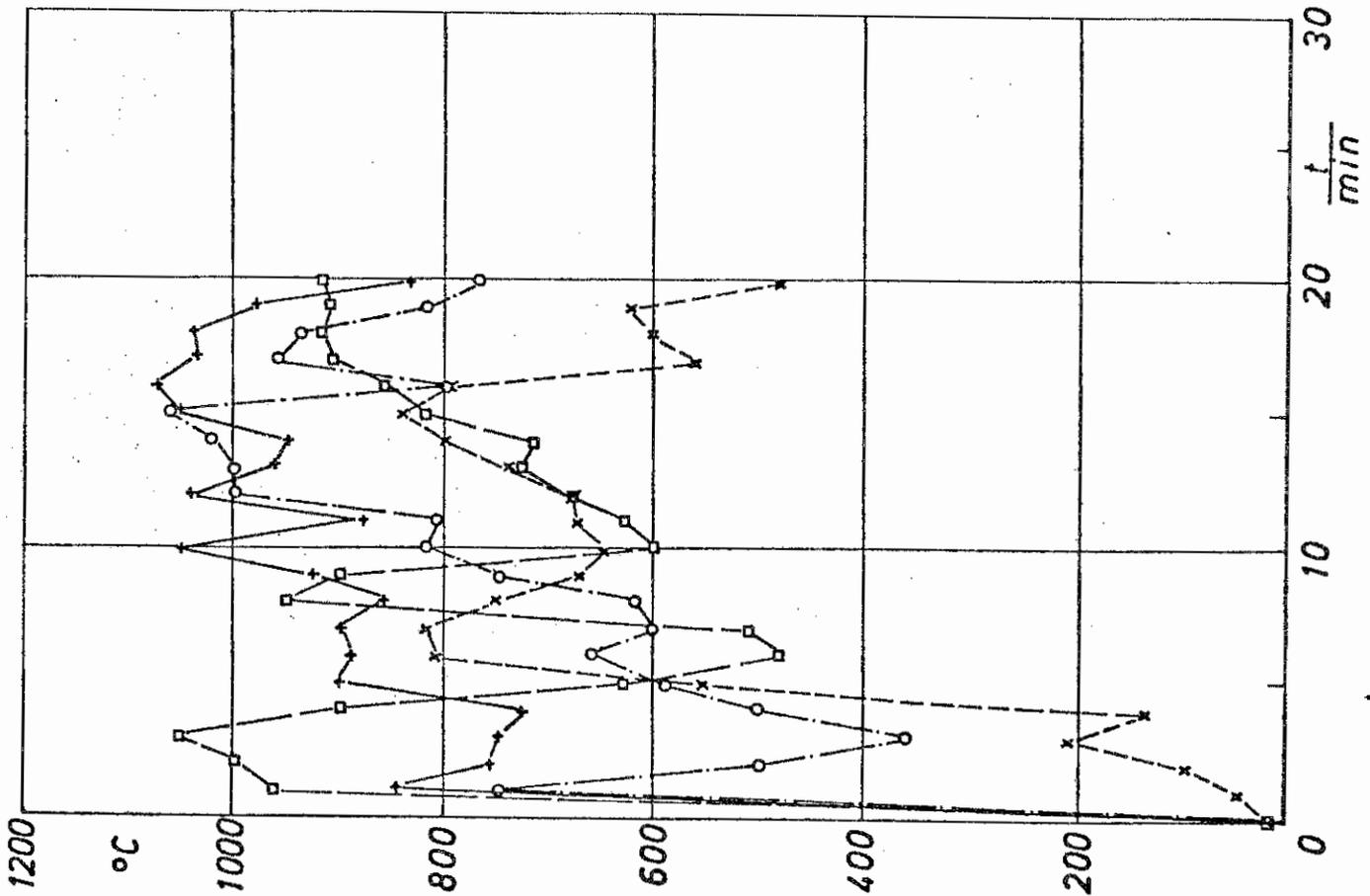
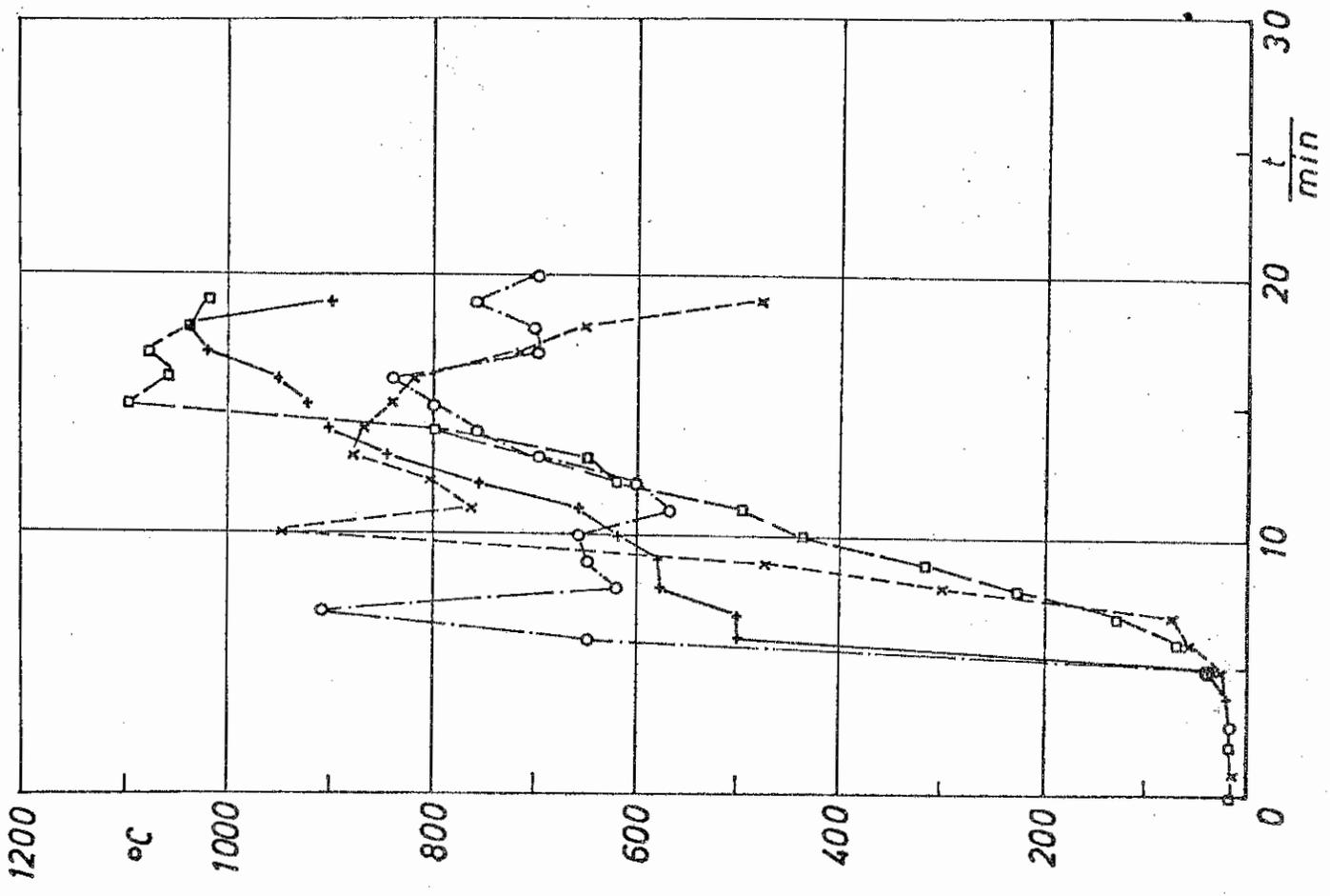


Bild 6-27

Versuch 8 x 75 ---+ 77 ---
o 76 ---□ 78 ---



Versuch 7 x 75 ---+ 77 ---
o 76 ---□ 78 ---

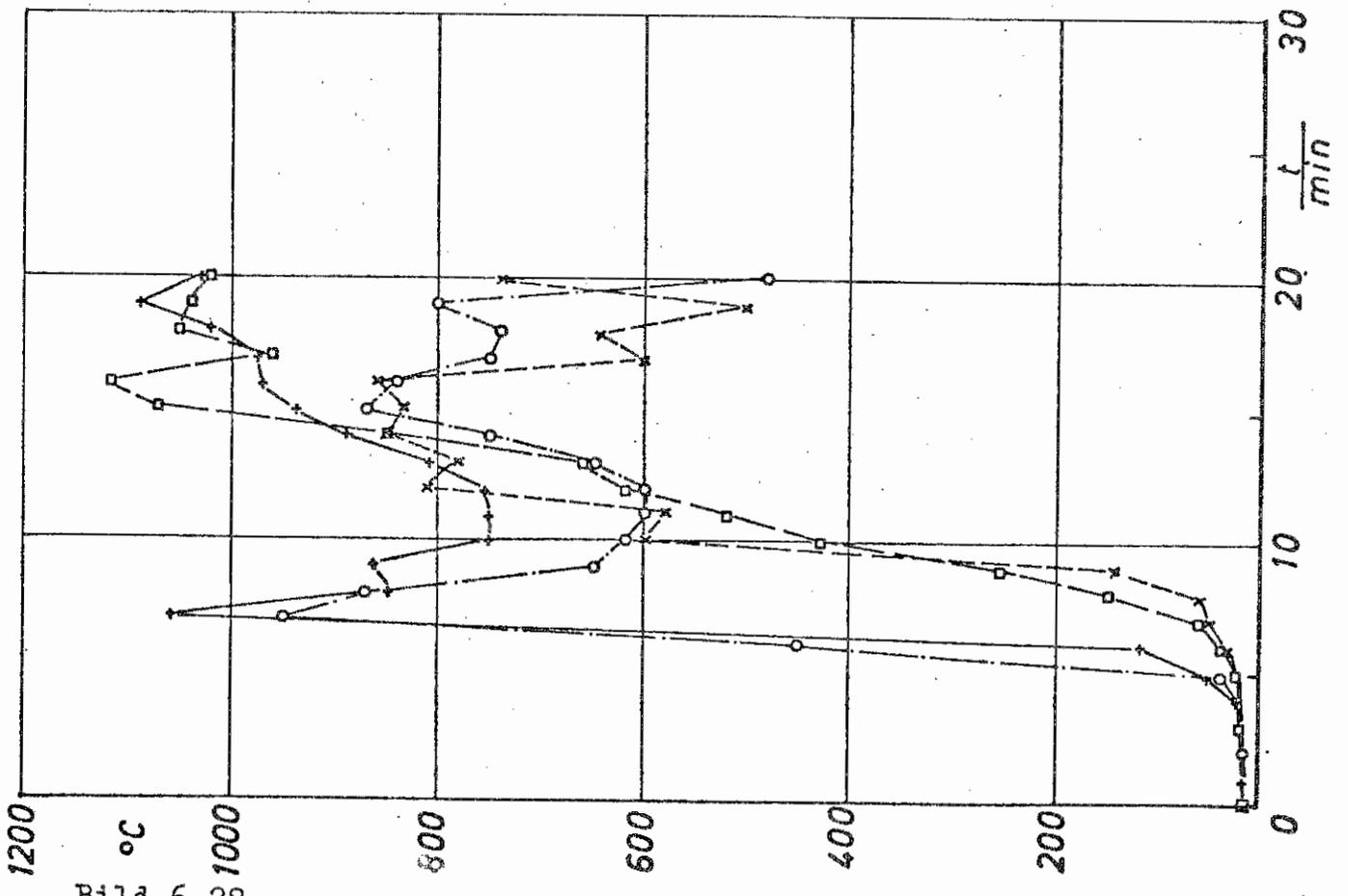


Bild 6-28

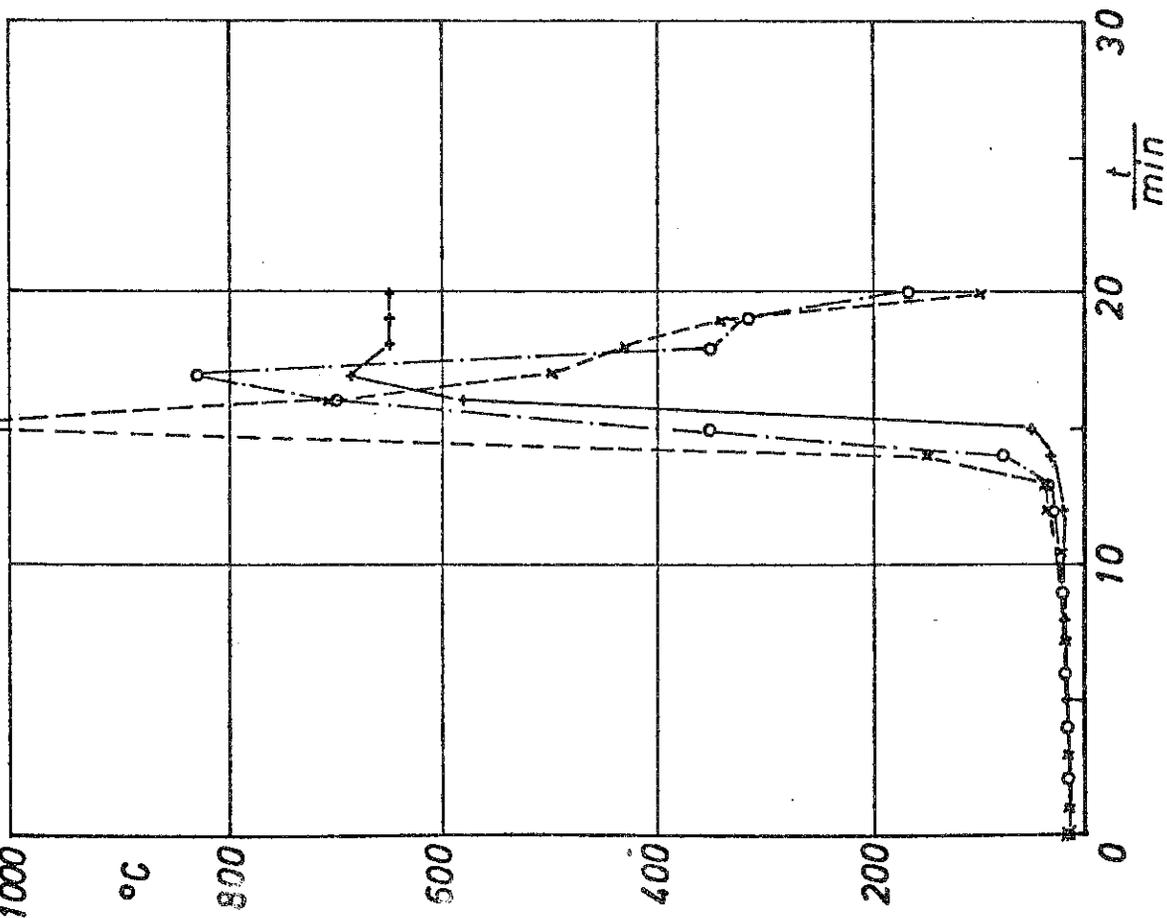
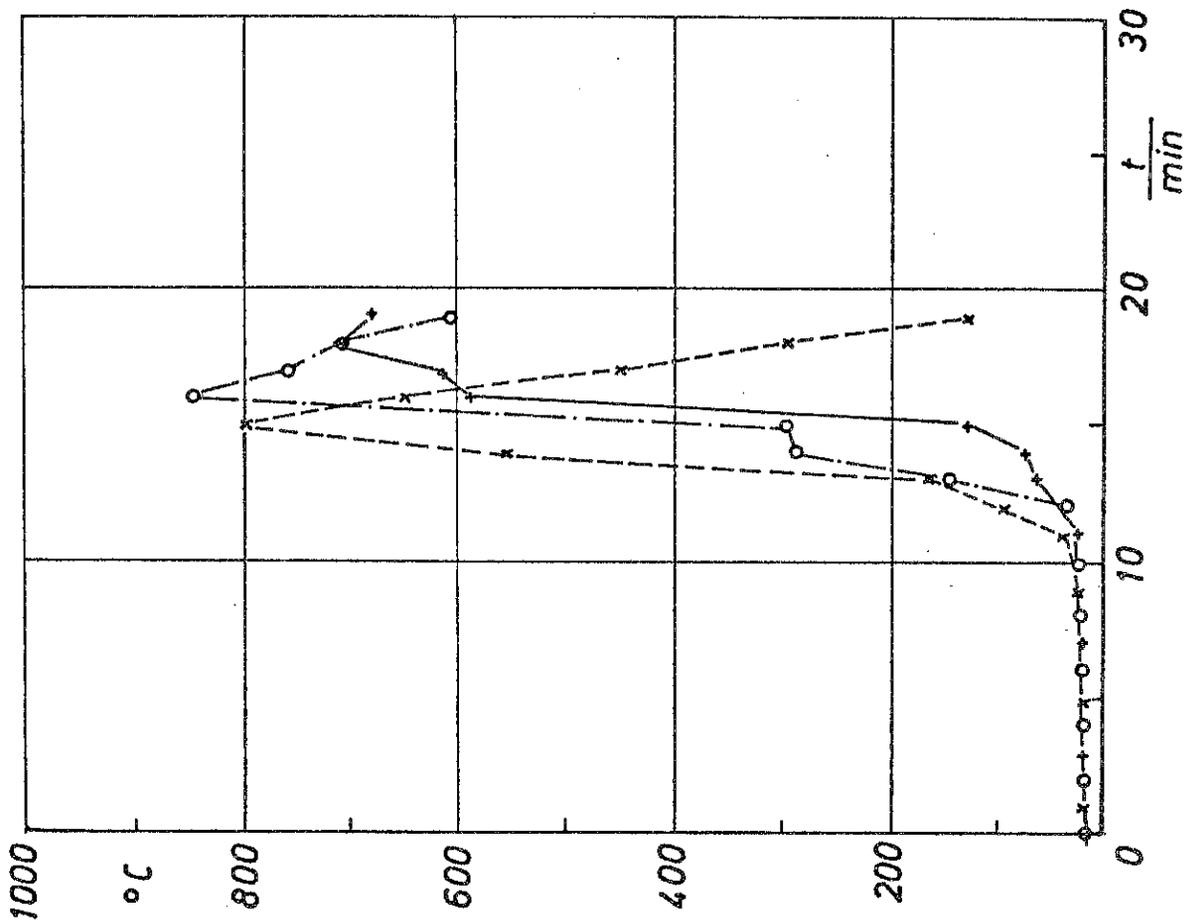


Bild 6-29

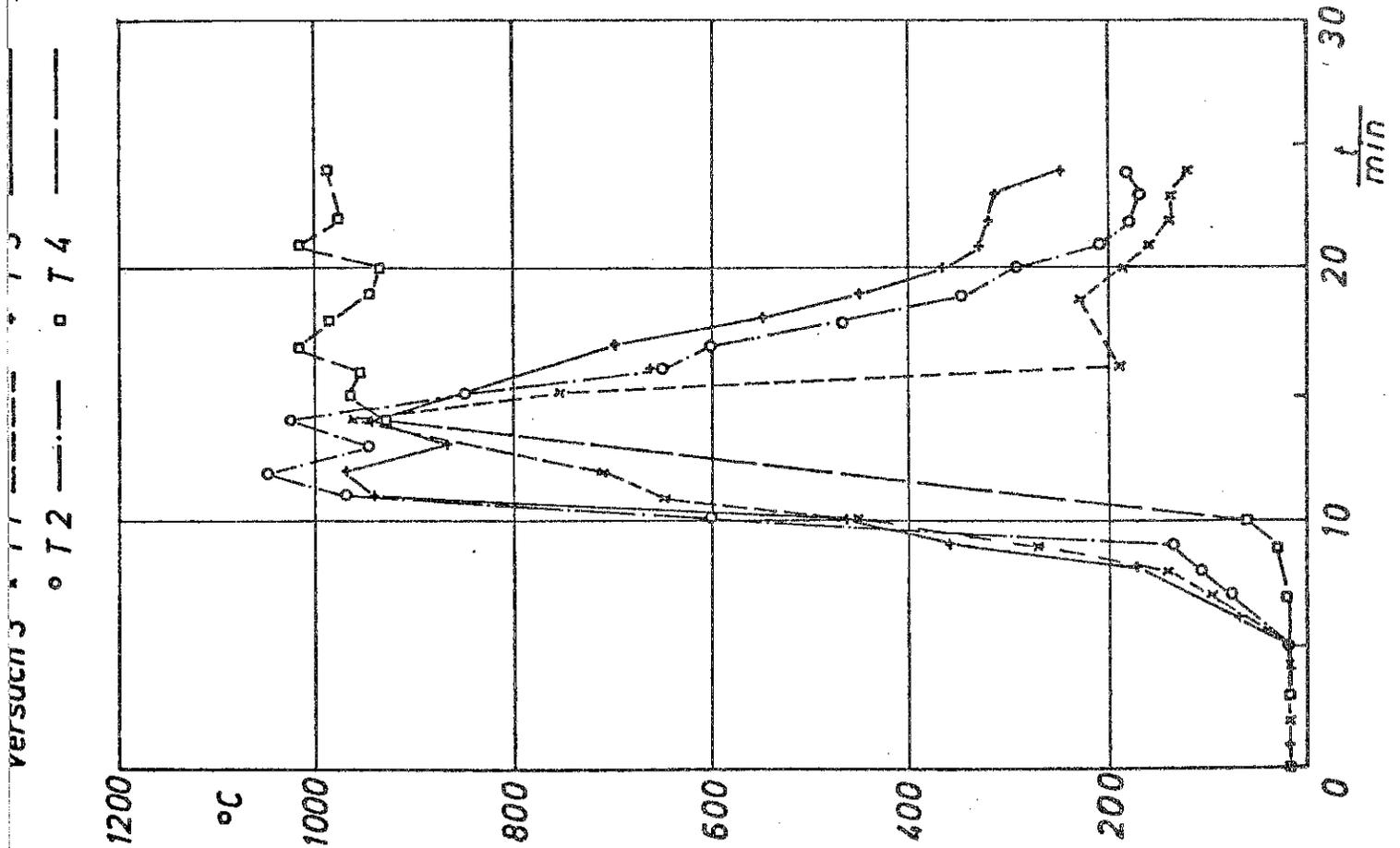
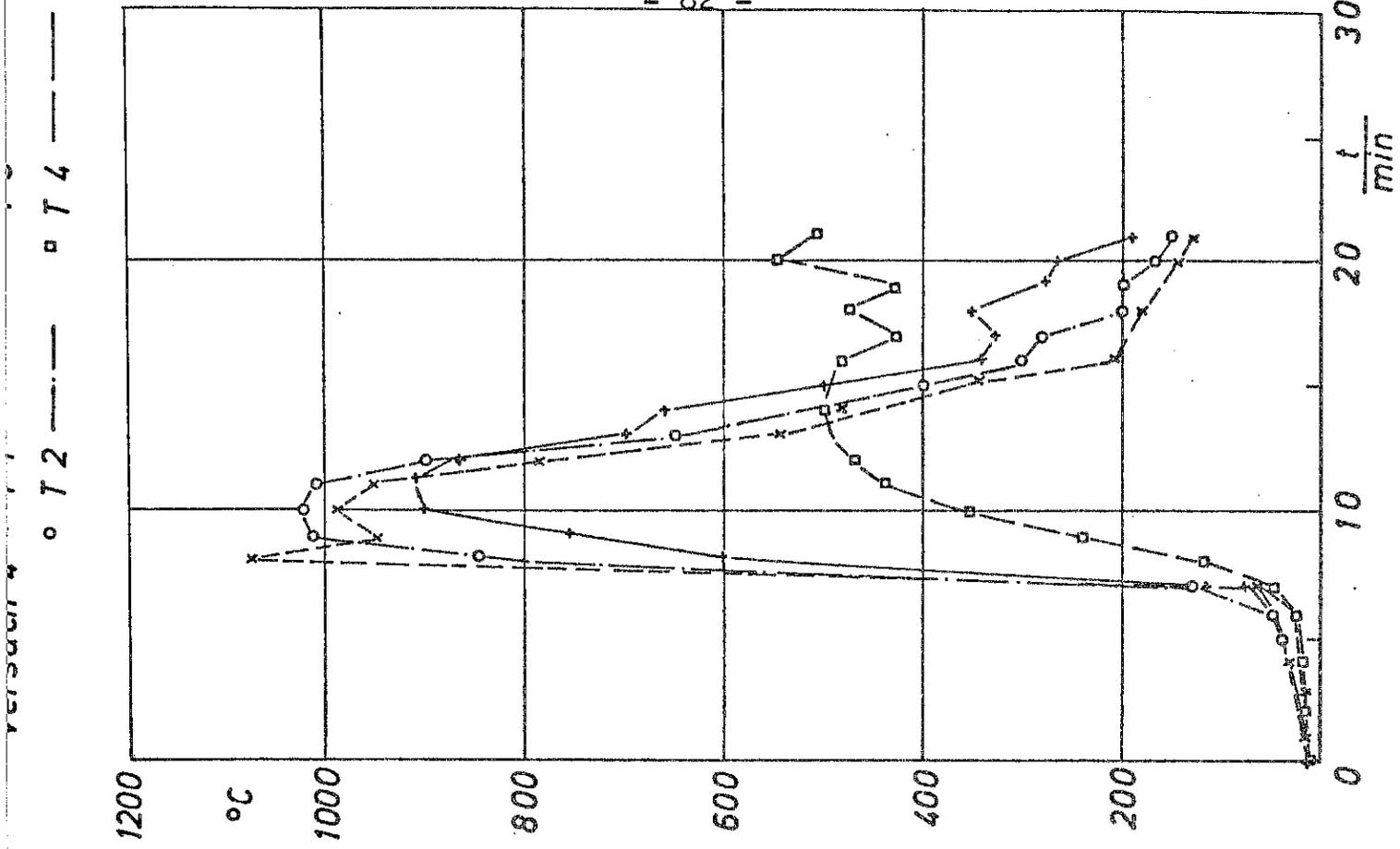


Bild 6-30

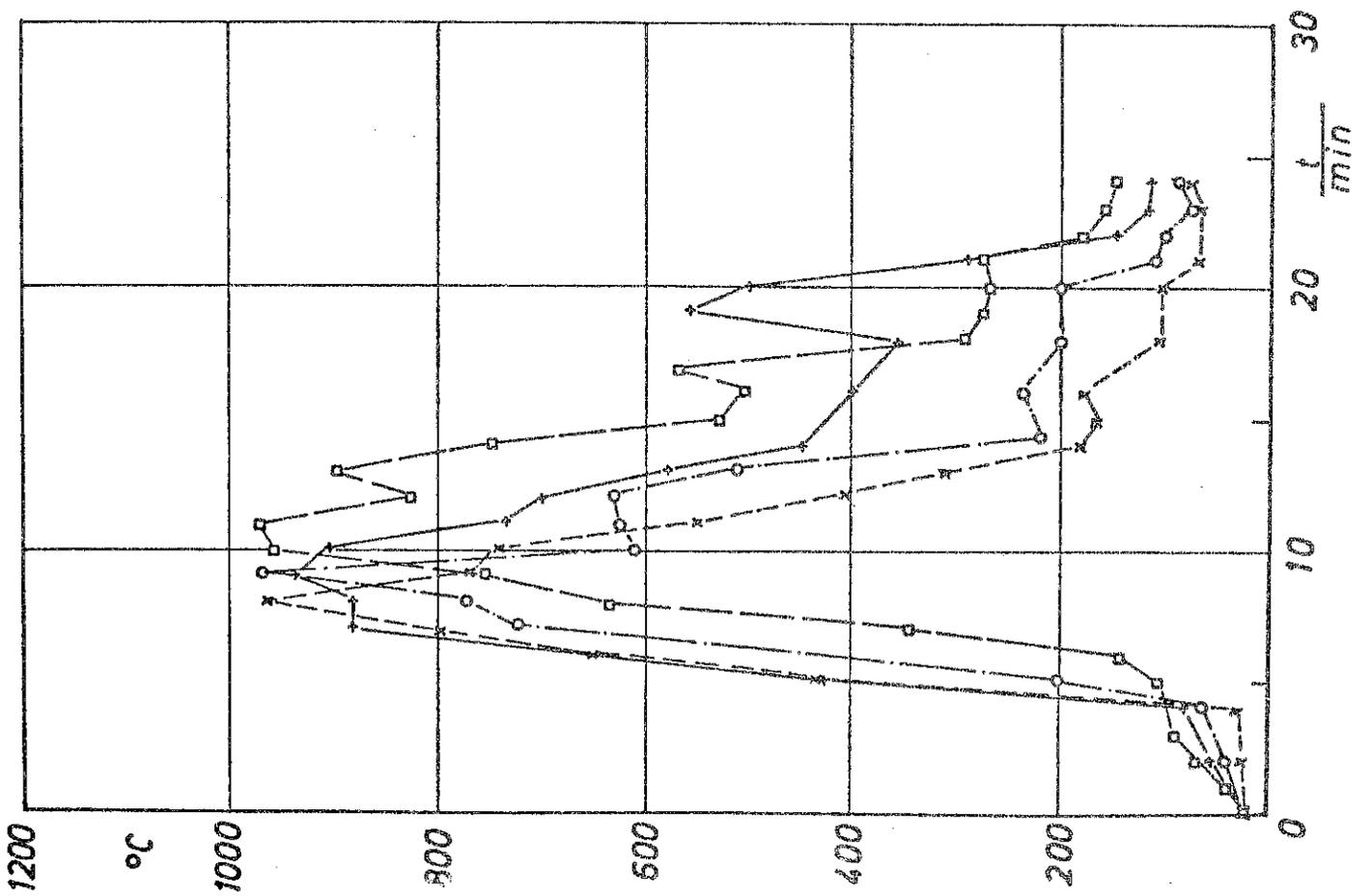
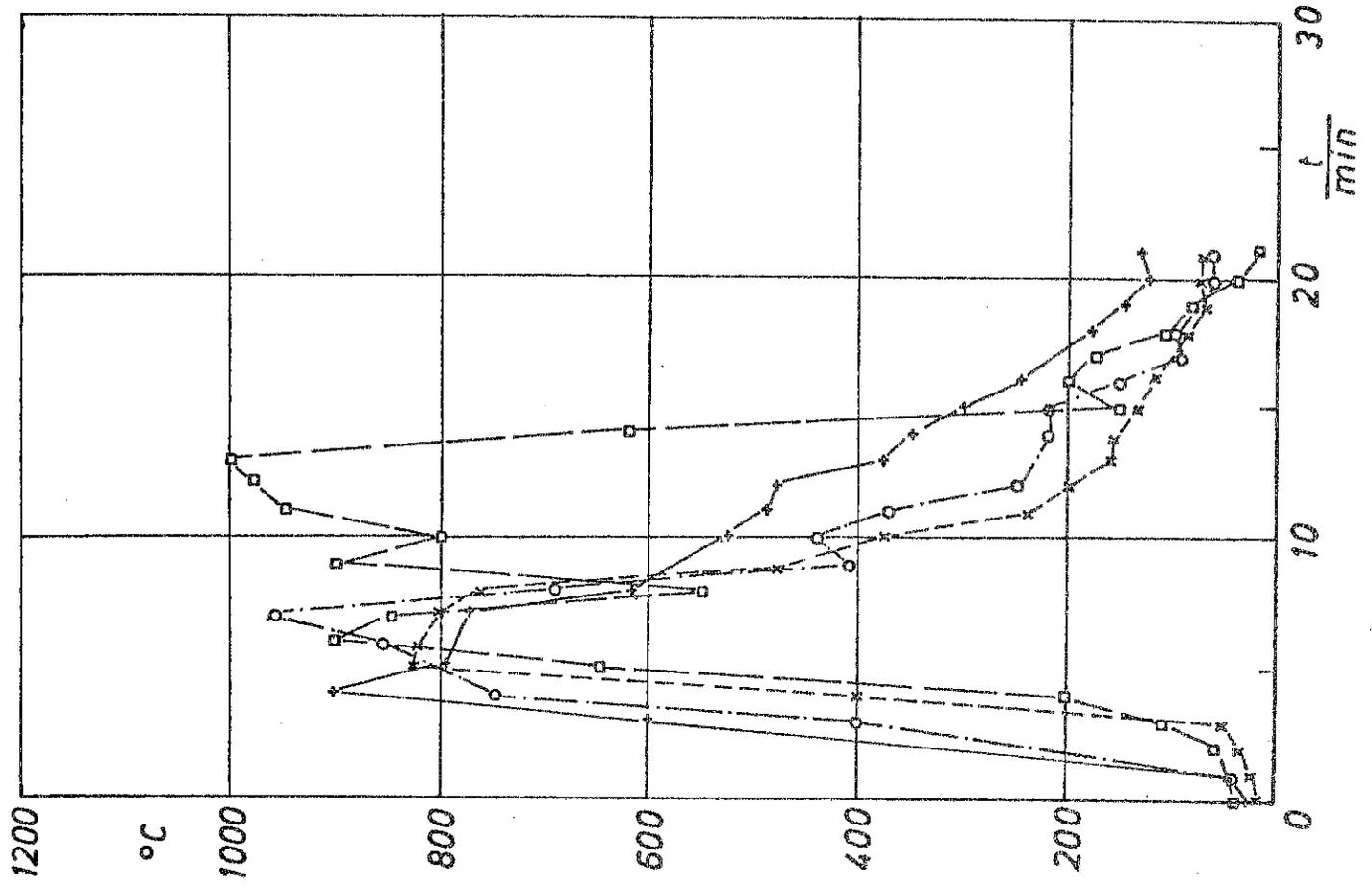
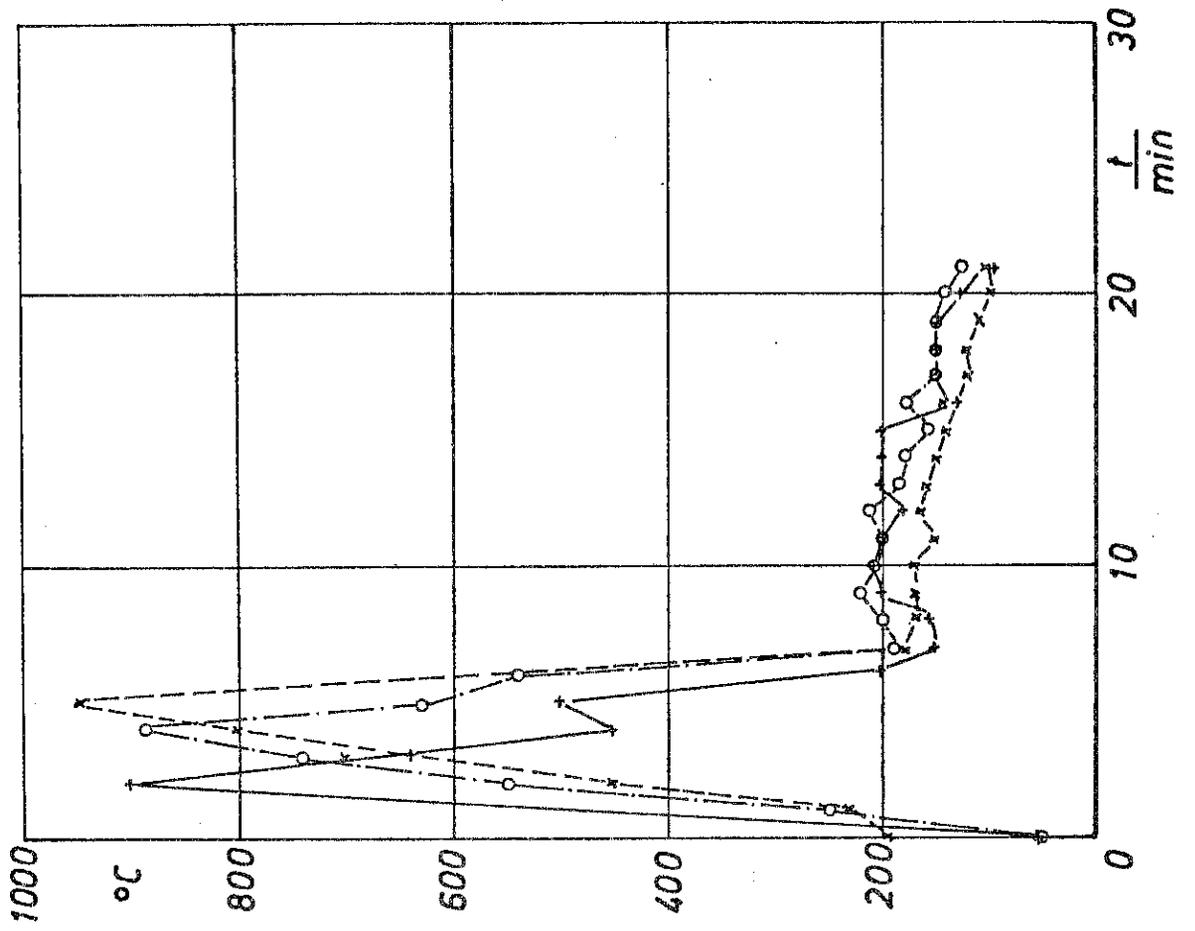


Bild 6-31

Versuch 4 * T 9 ---
o T 10 - - -
+ T 11 ———



Versuch 3 * T 9 ---
o T 10 - - -
+ T 11 ———

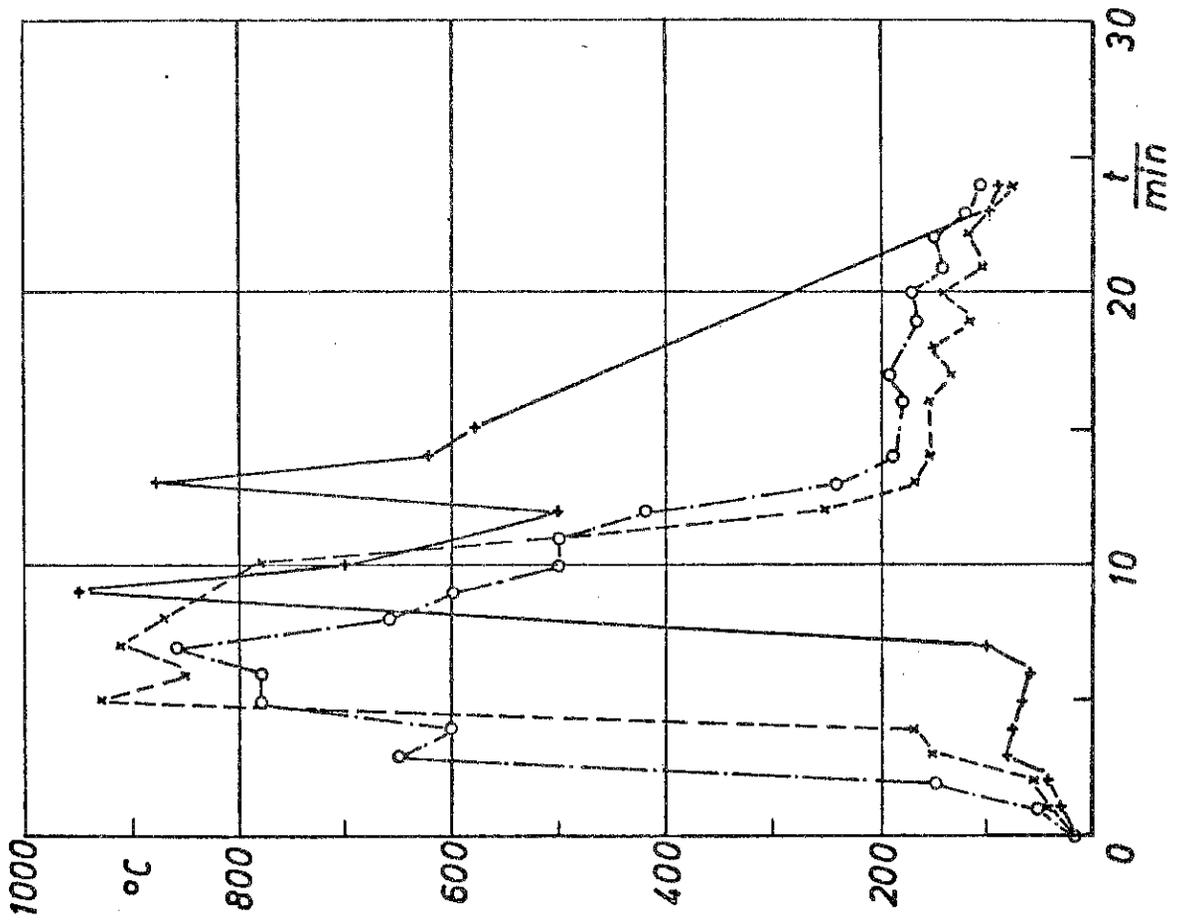
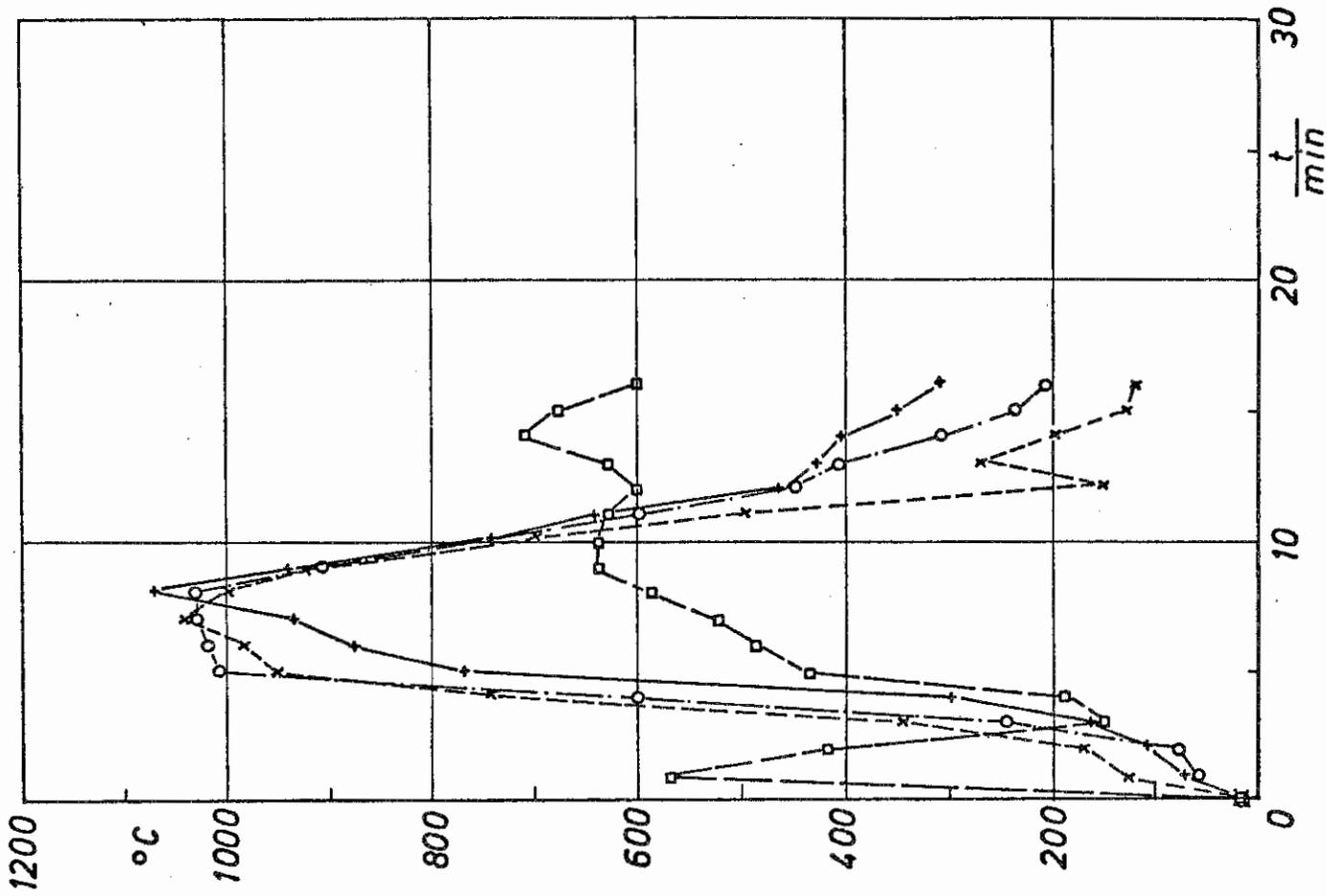


Bild 6-32

○ T 2 --- ○ T 4 ---



○ T 2 --- ○ T 4 ---

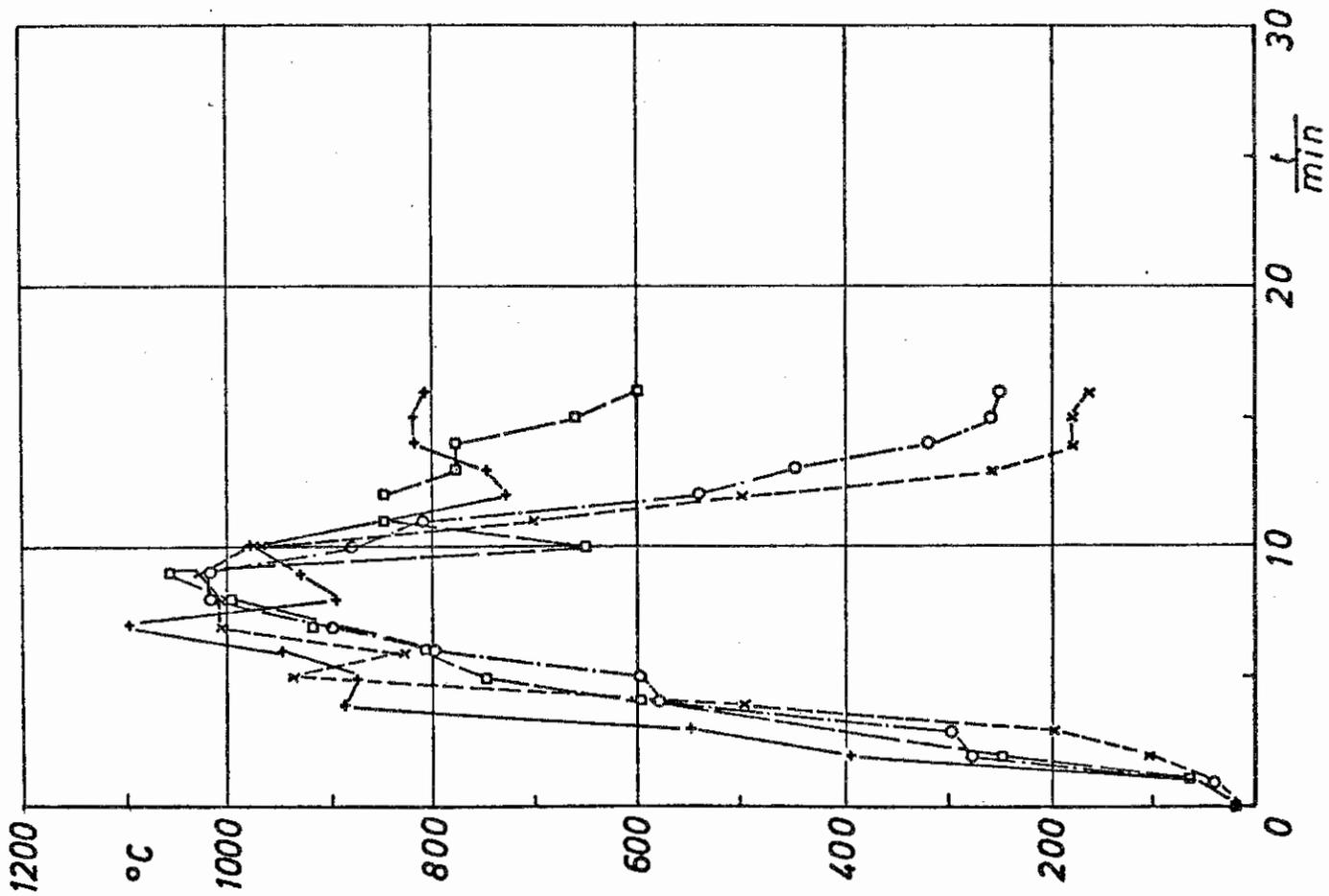


Bild 6-33

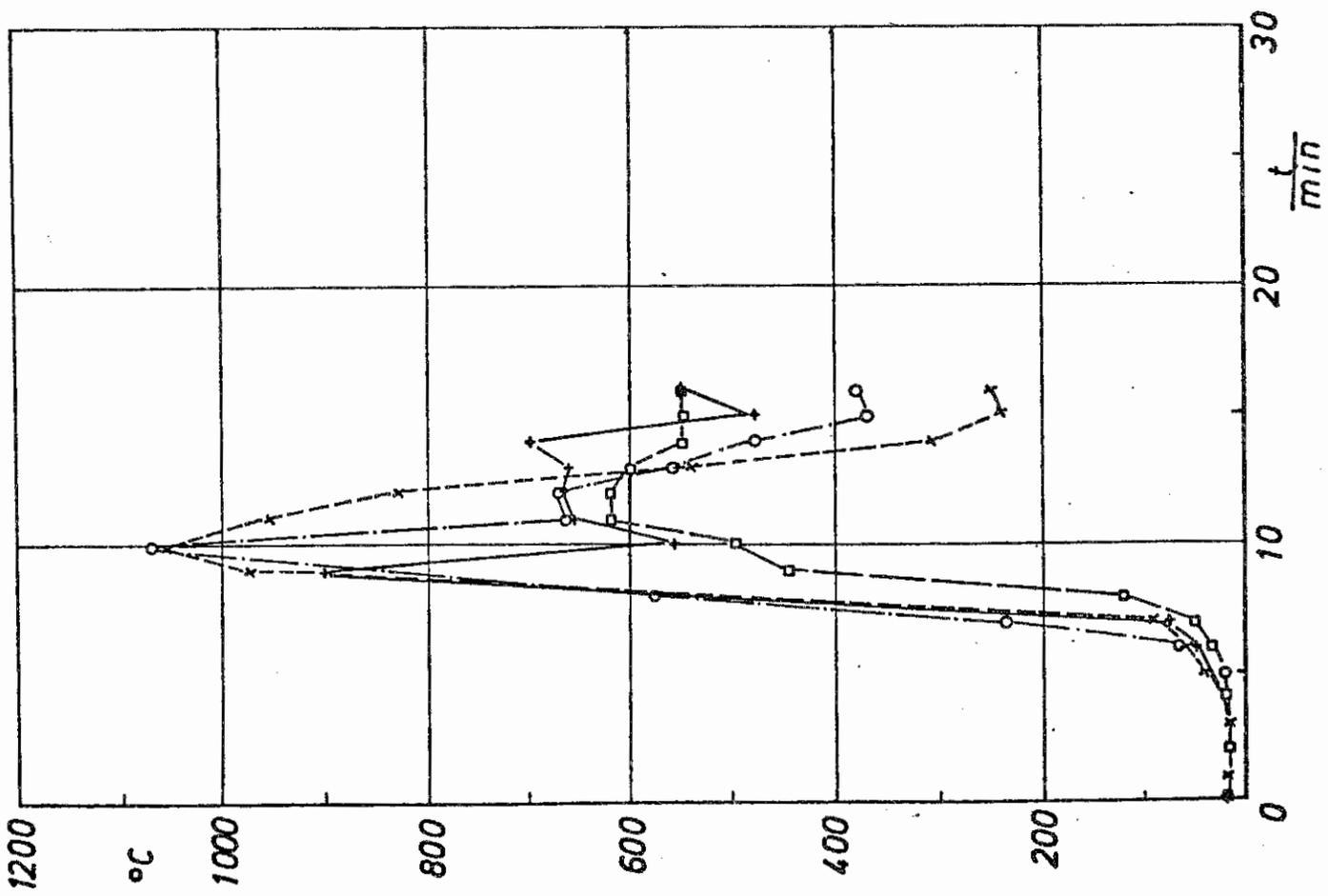
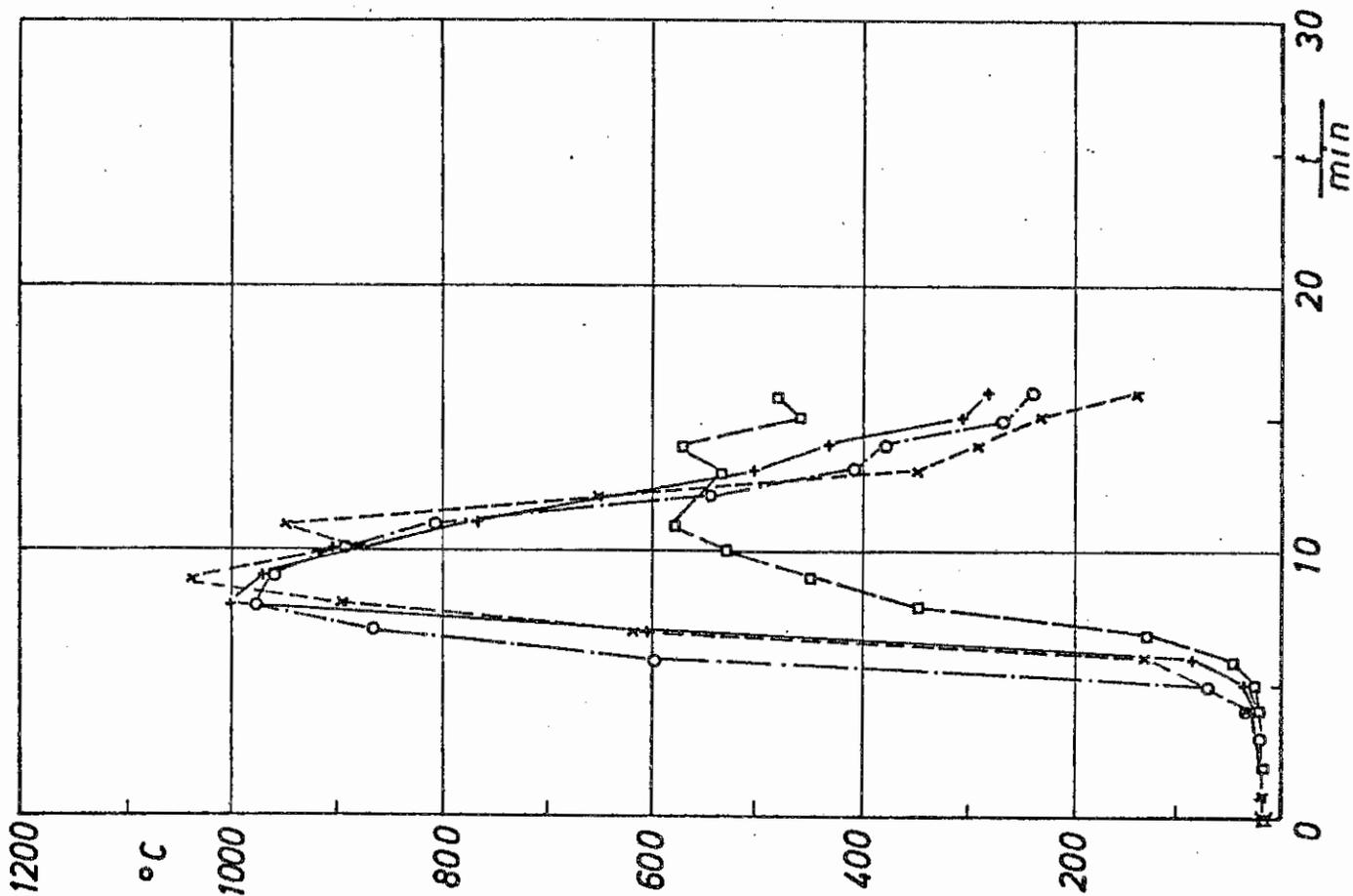
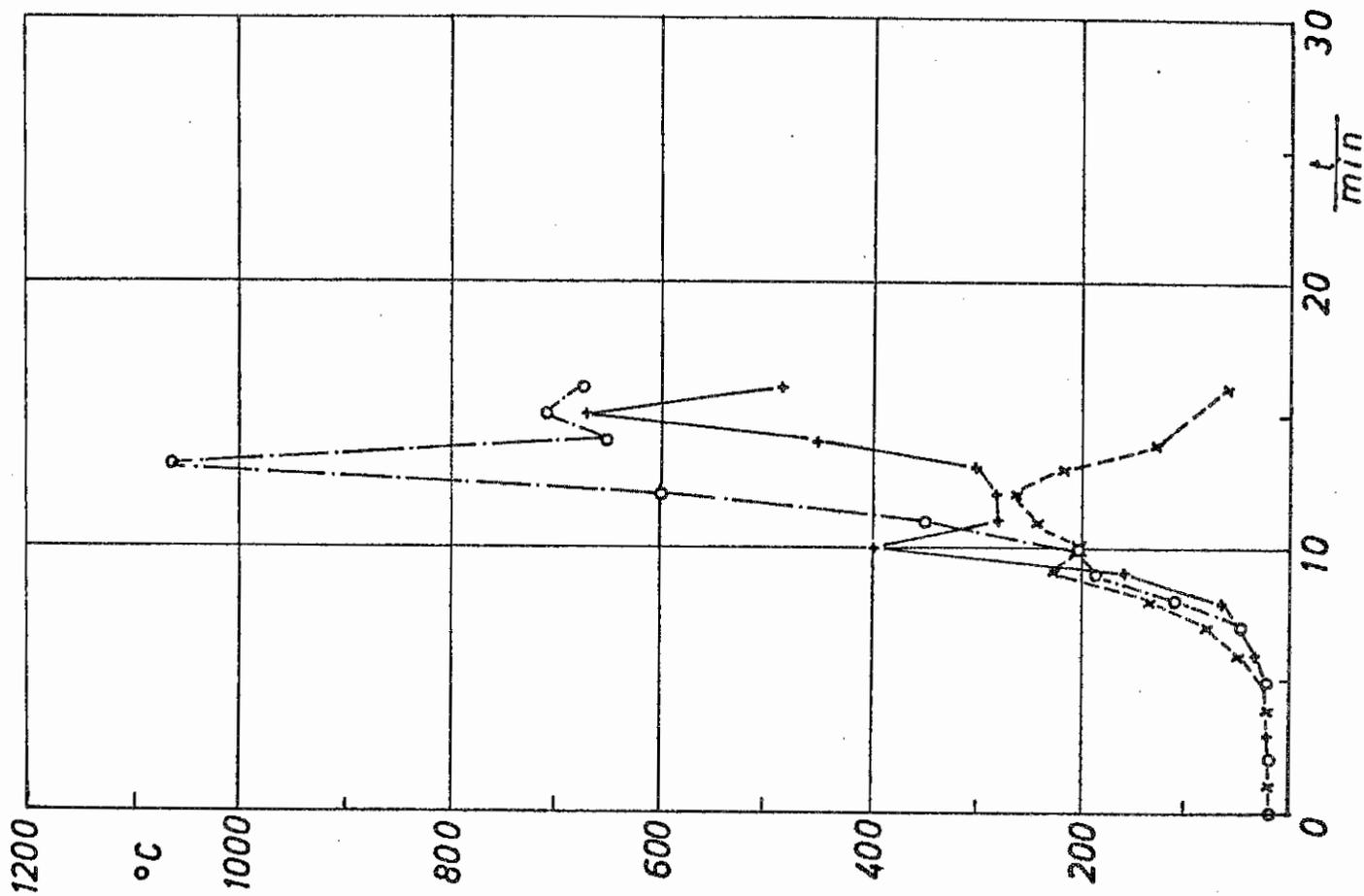


Bild 6-34

○ T 10
+ T 11



Versuch 9 * T 9
○ T 10
+ T 11

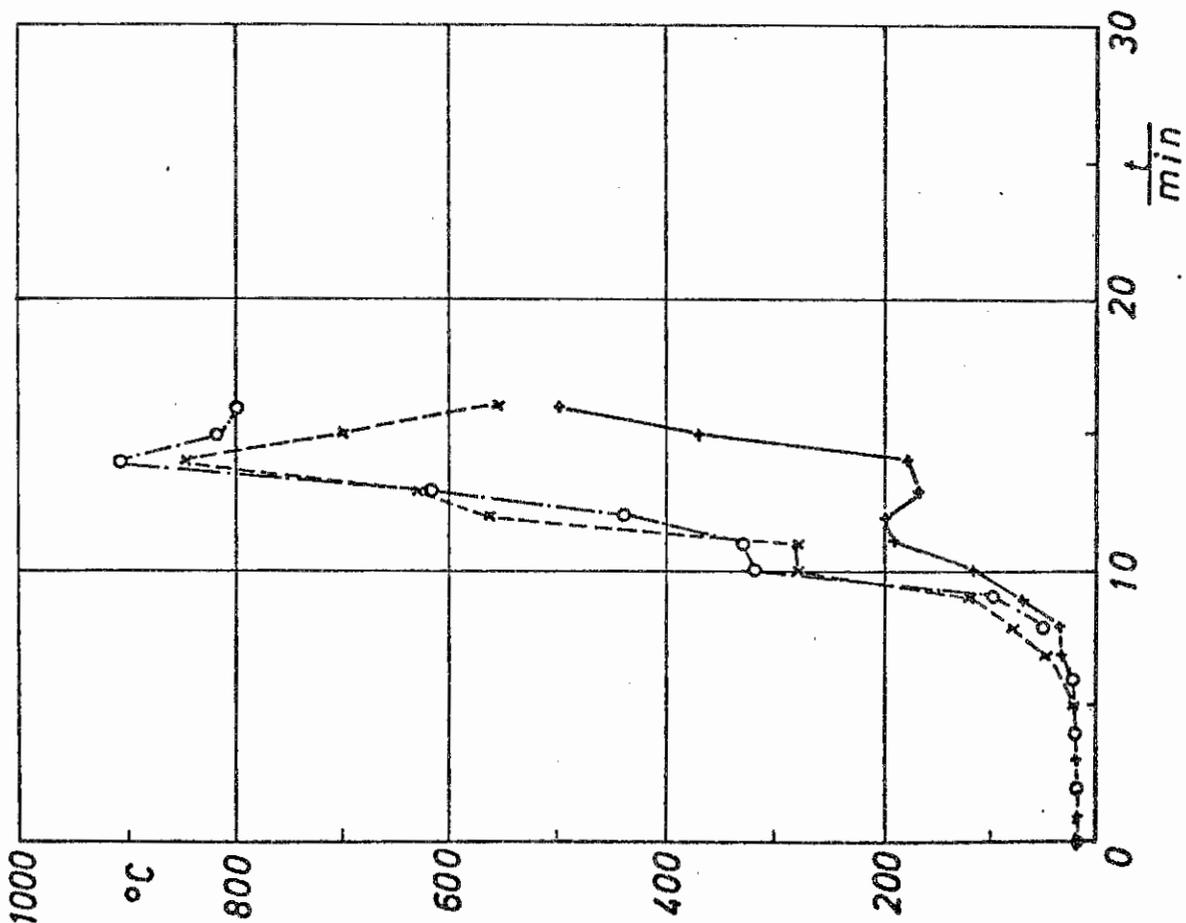


Bild 6-35

Versuch 24

- x T 1
- o T 2
- + T 3
- T 4

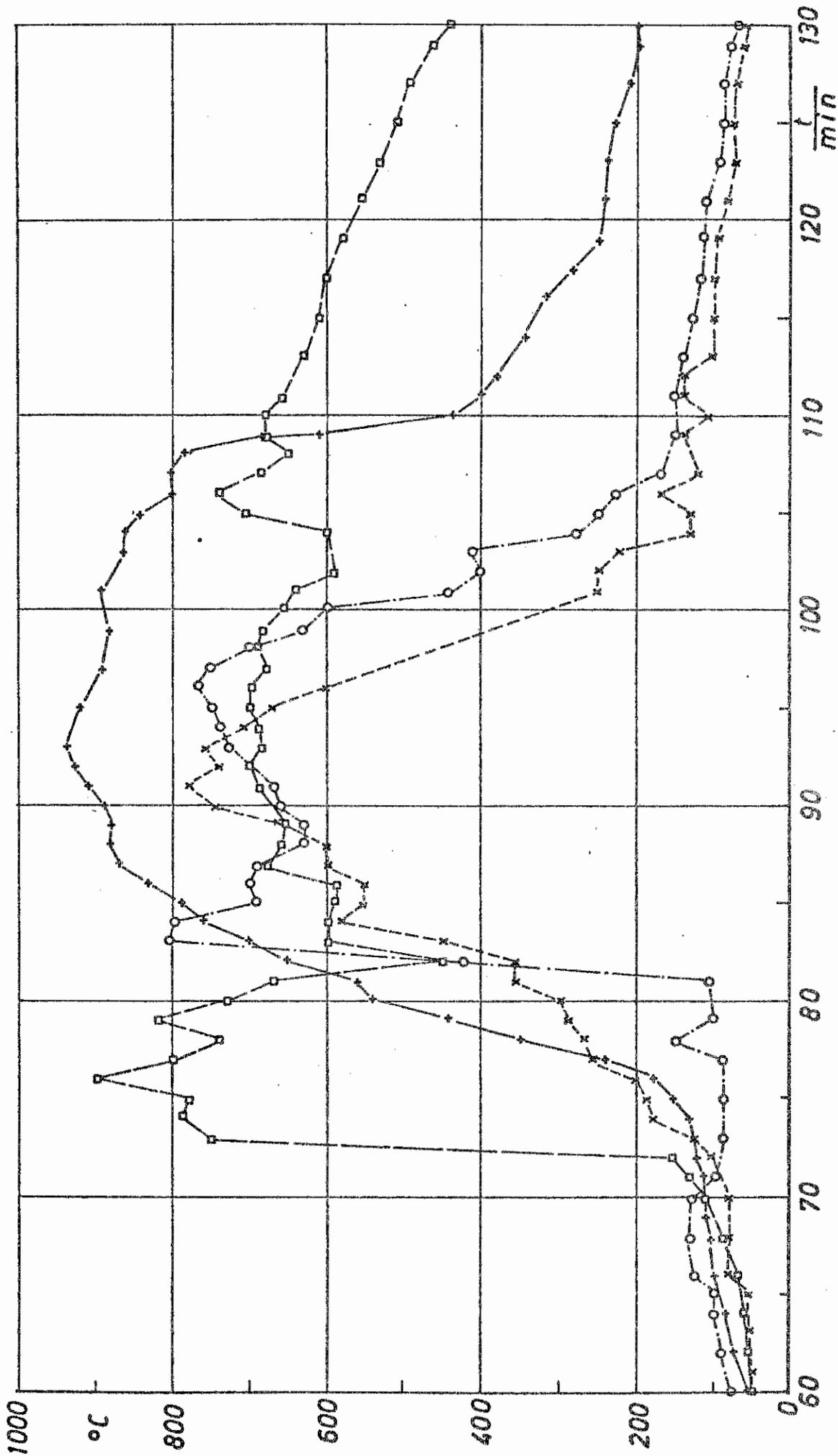


Bild 6-36

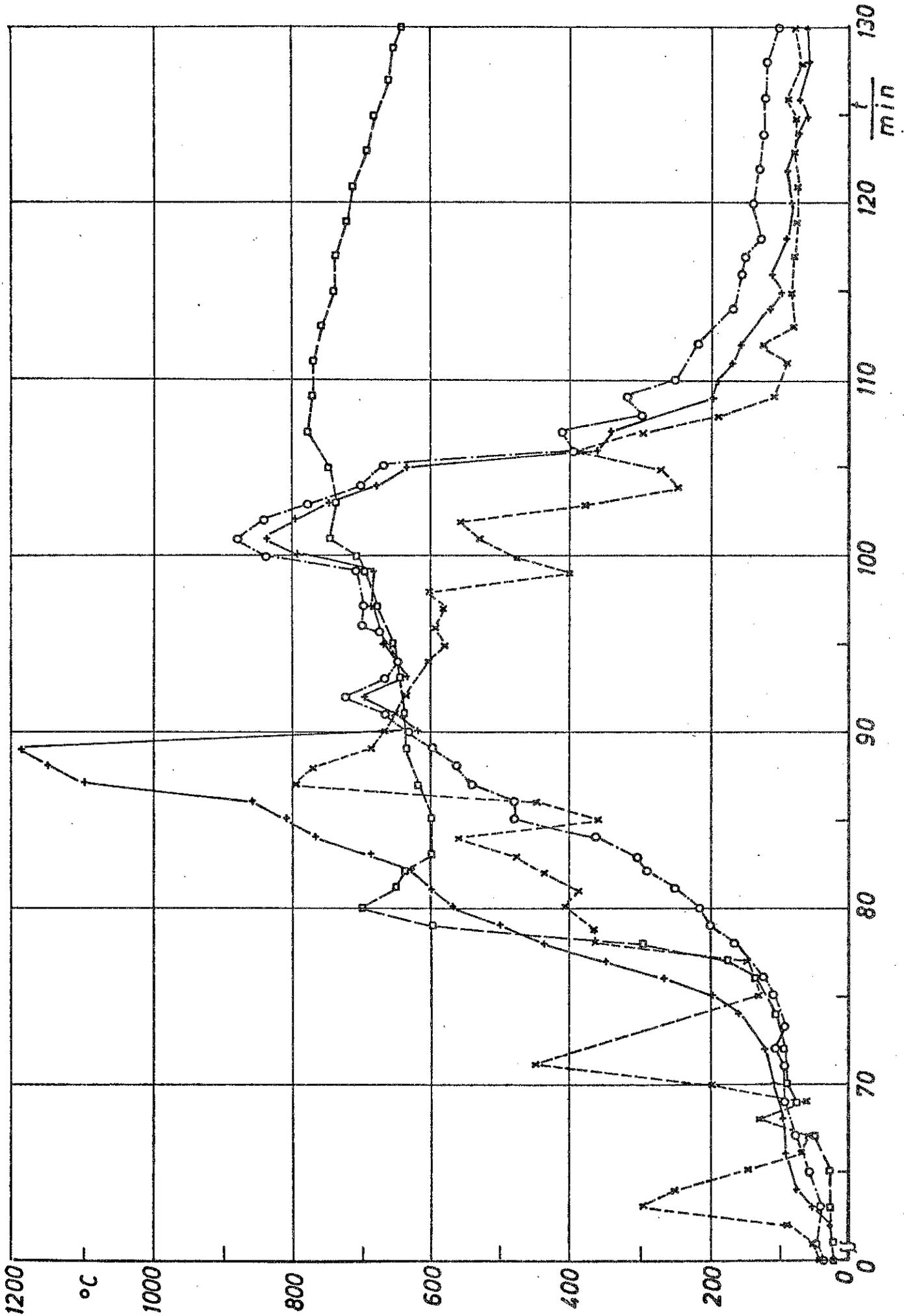
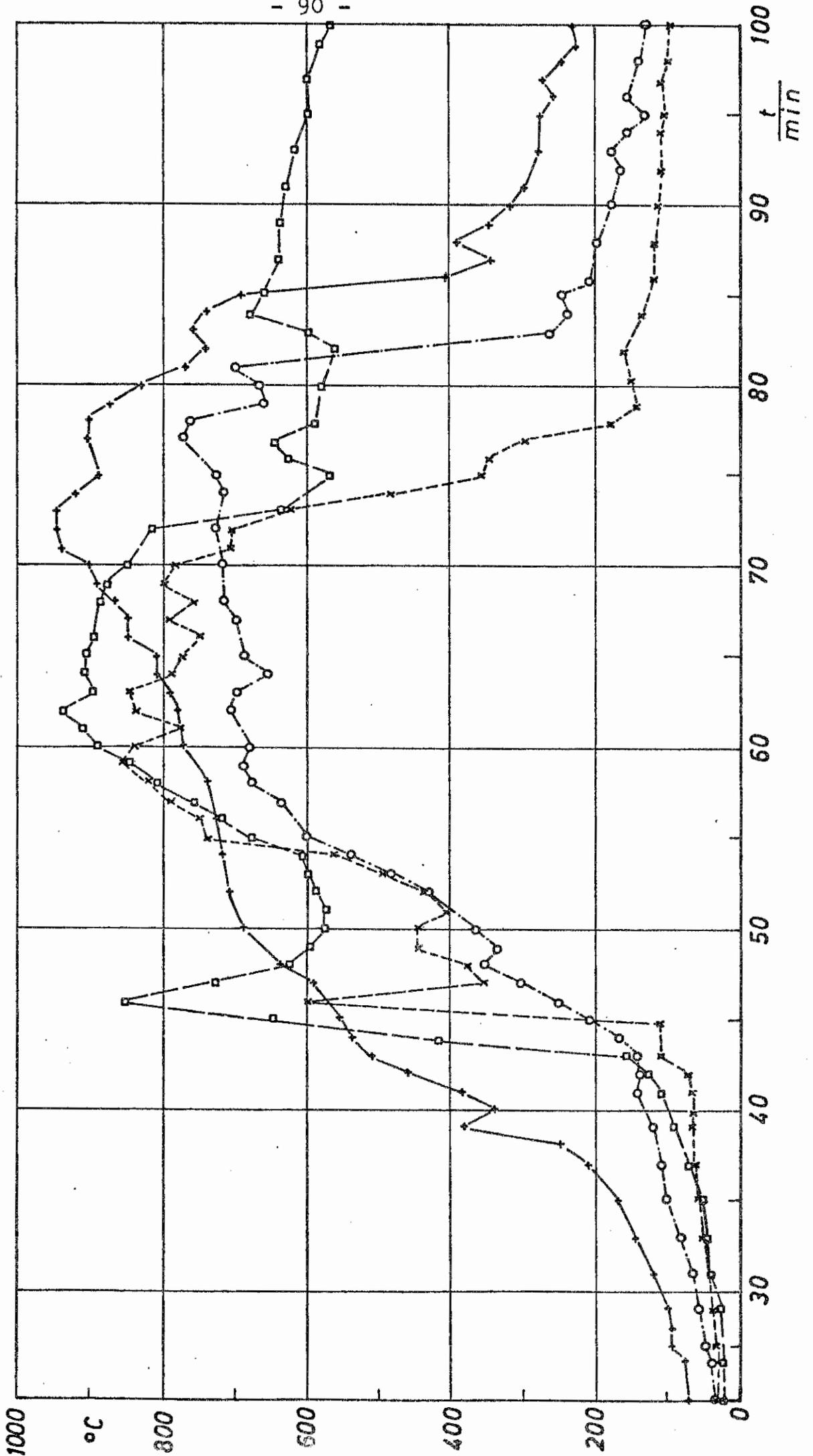


Bild 6-37

Versuch 24

- x T 5
- o T 6
- + T 7
- T 8



○ T 6 — — — □ T 8 — — —

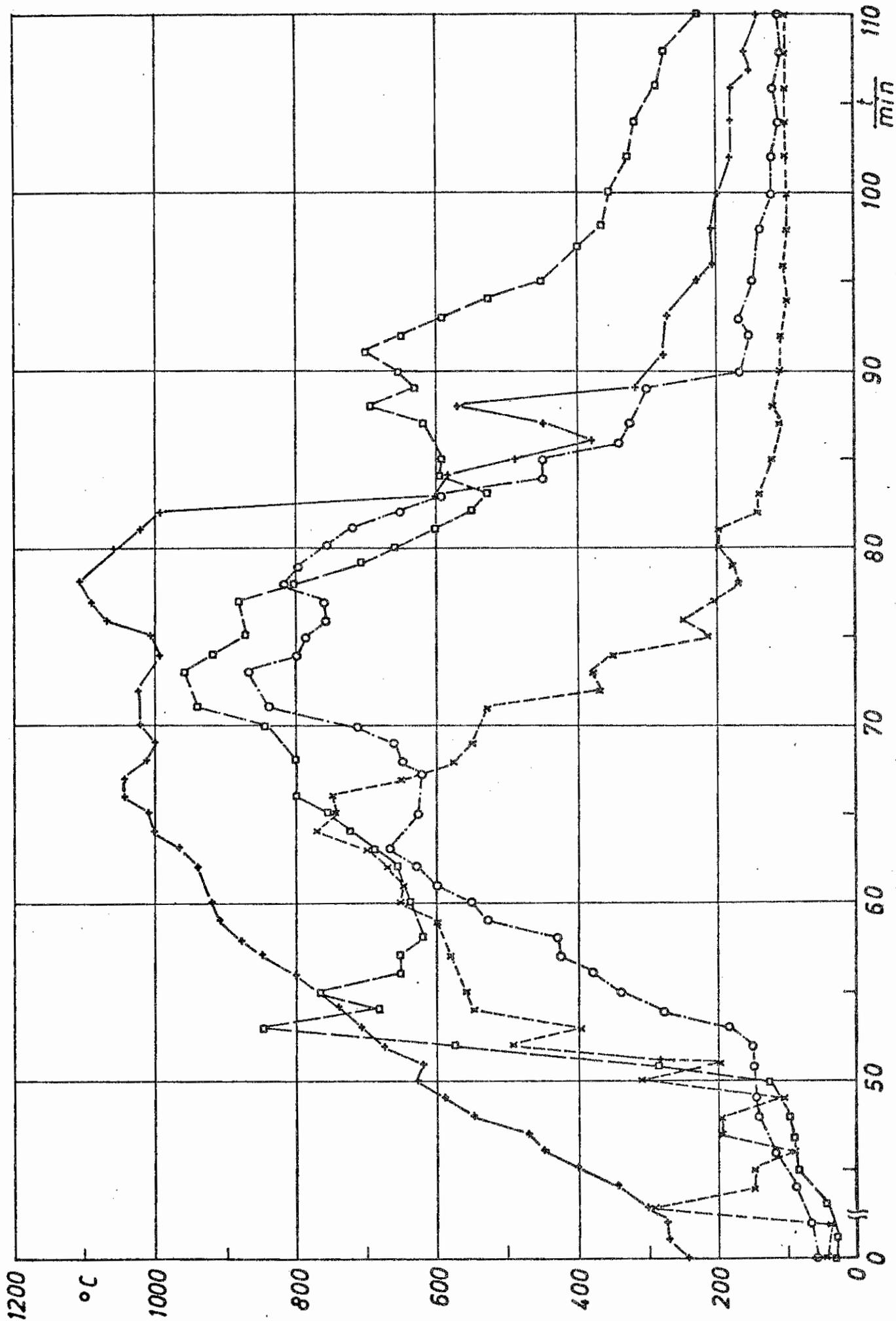
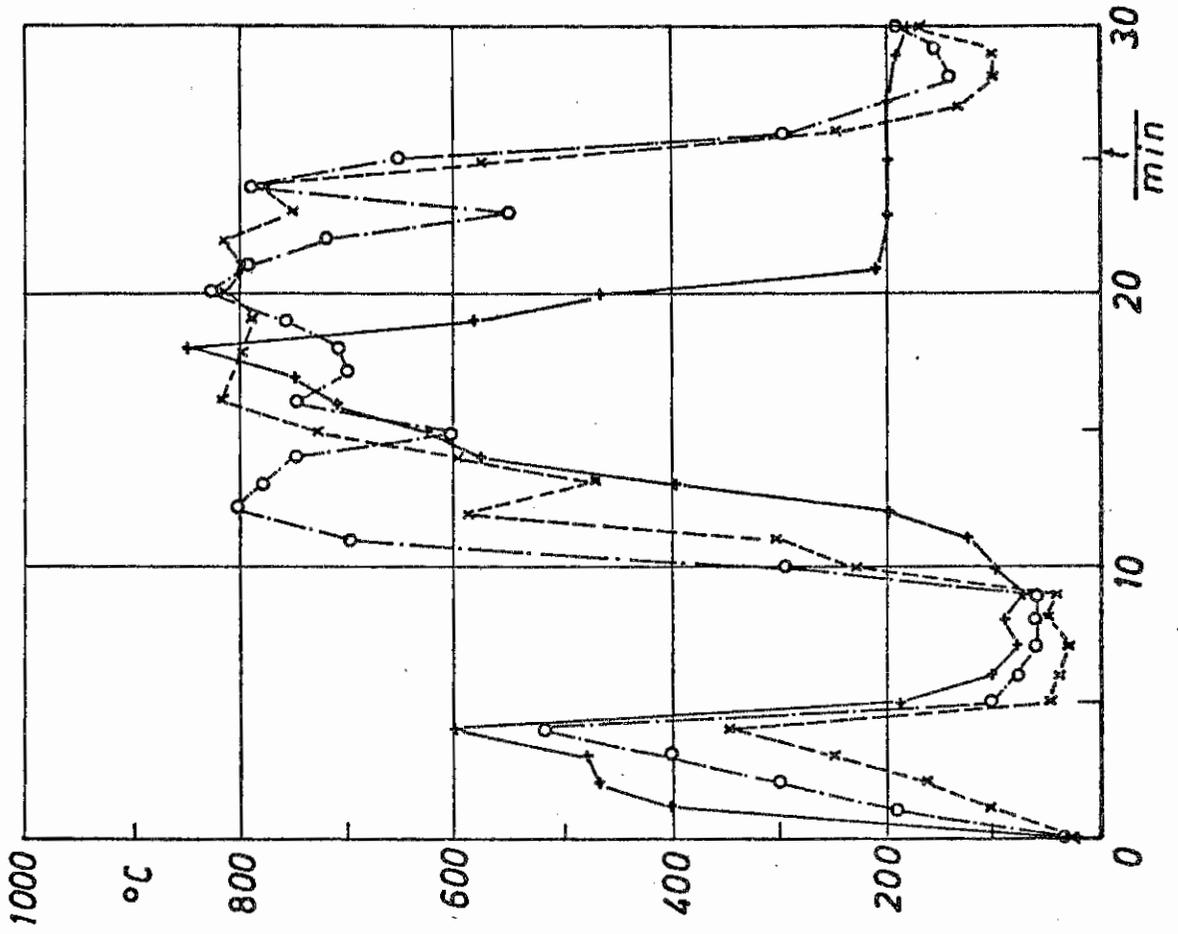


Bild 6-39

Versuch 25 * T 9
o T 10
+ T 11



Versuch 24 * T 9
o T 10
+ T 11

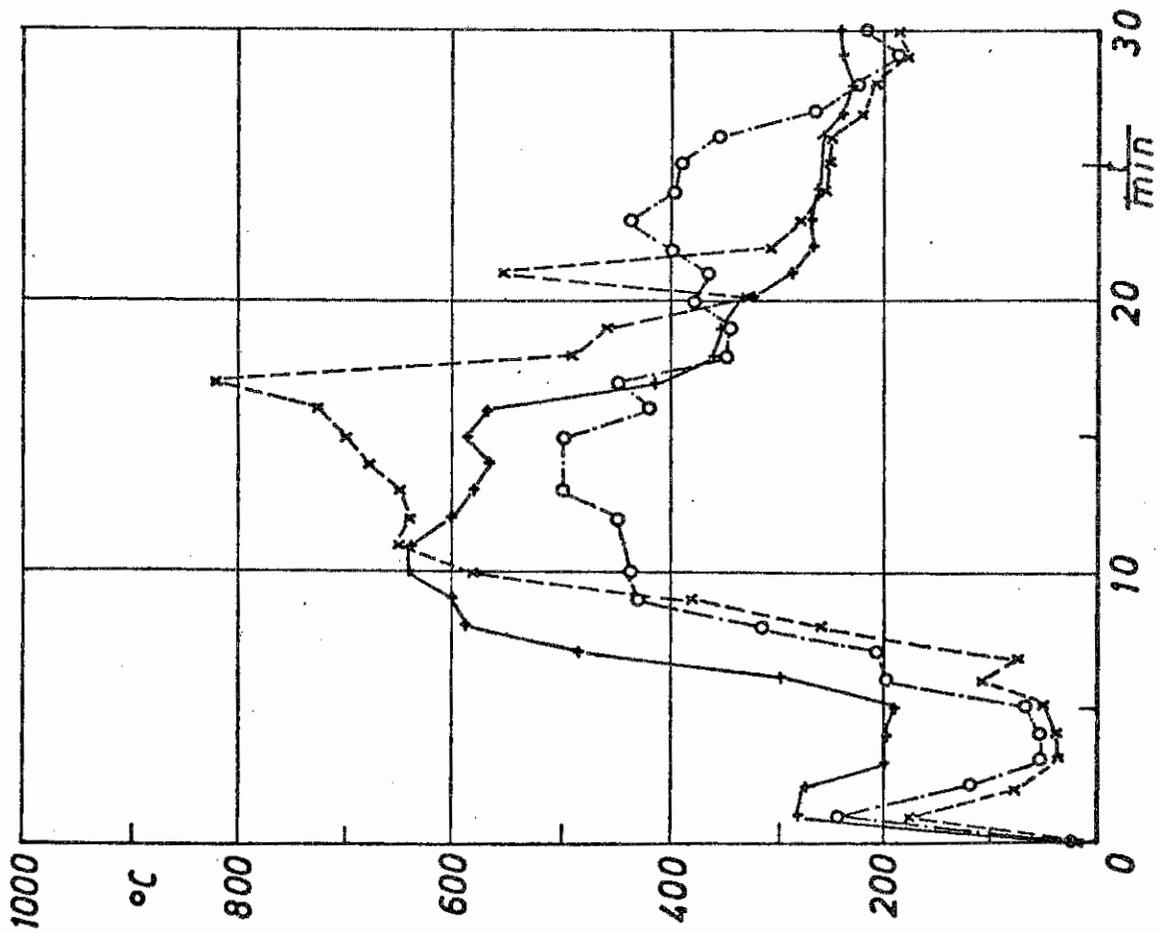


Bild 6-40

o T 2 --- □ T 4 ---

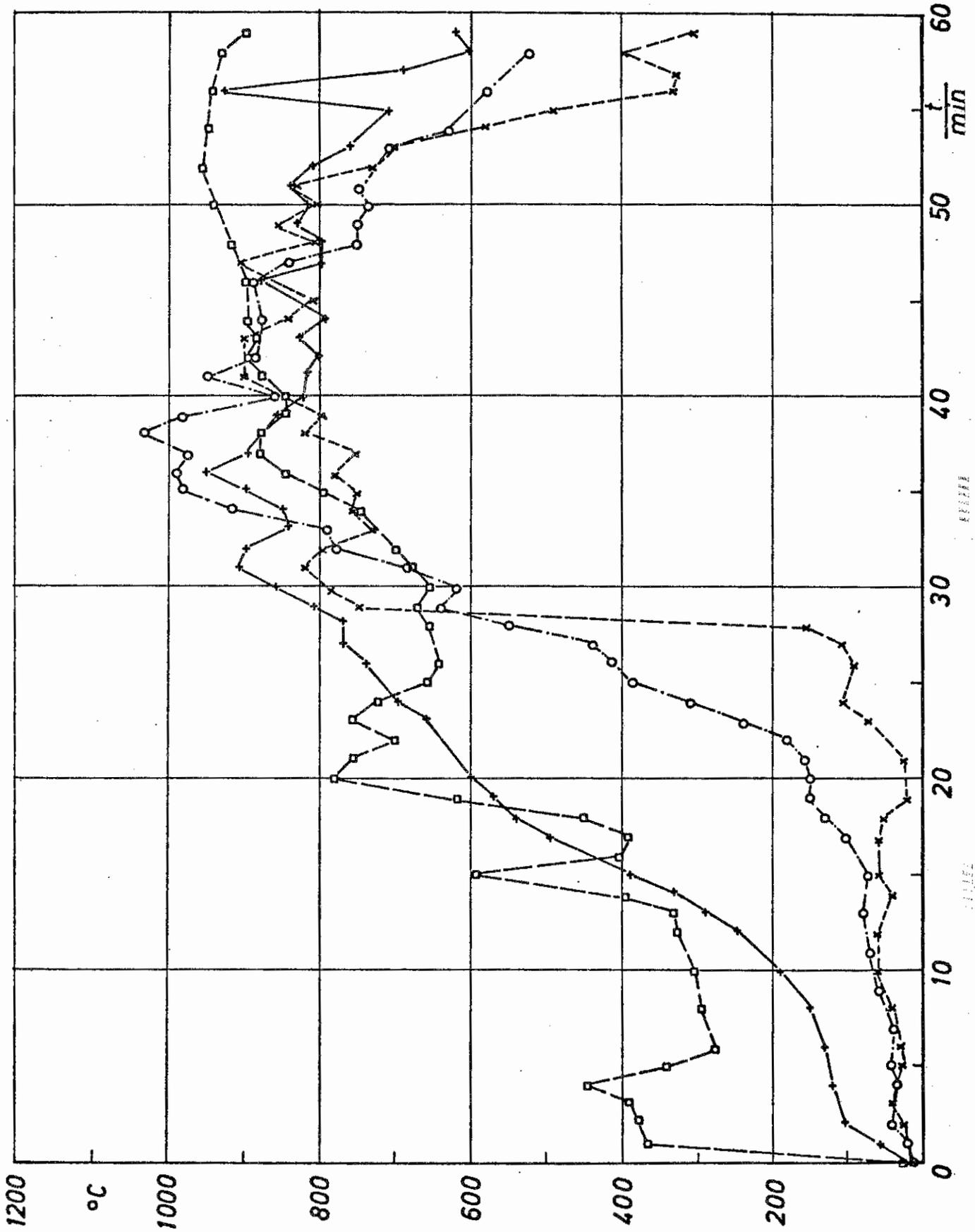


Bild 6-41

Versuch 34
x T1
o T2
+ T3
□ T4

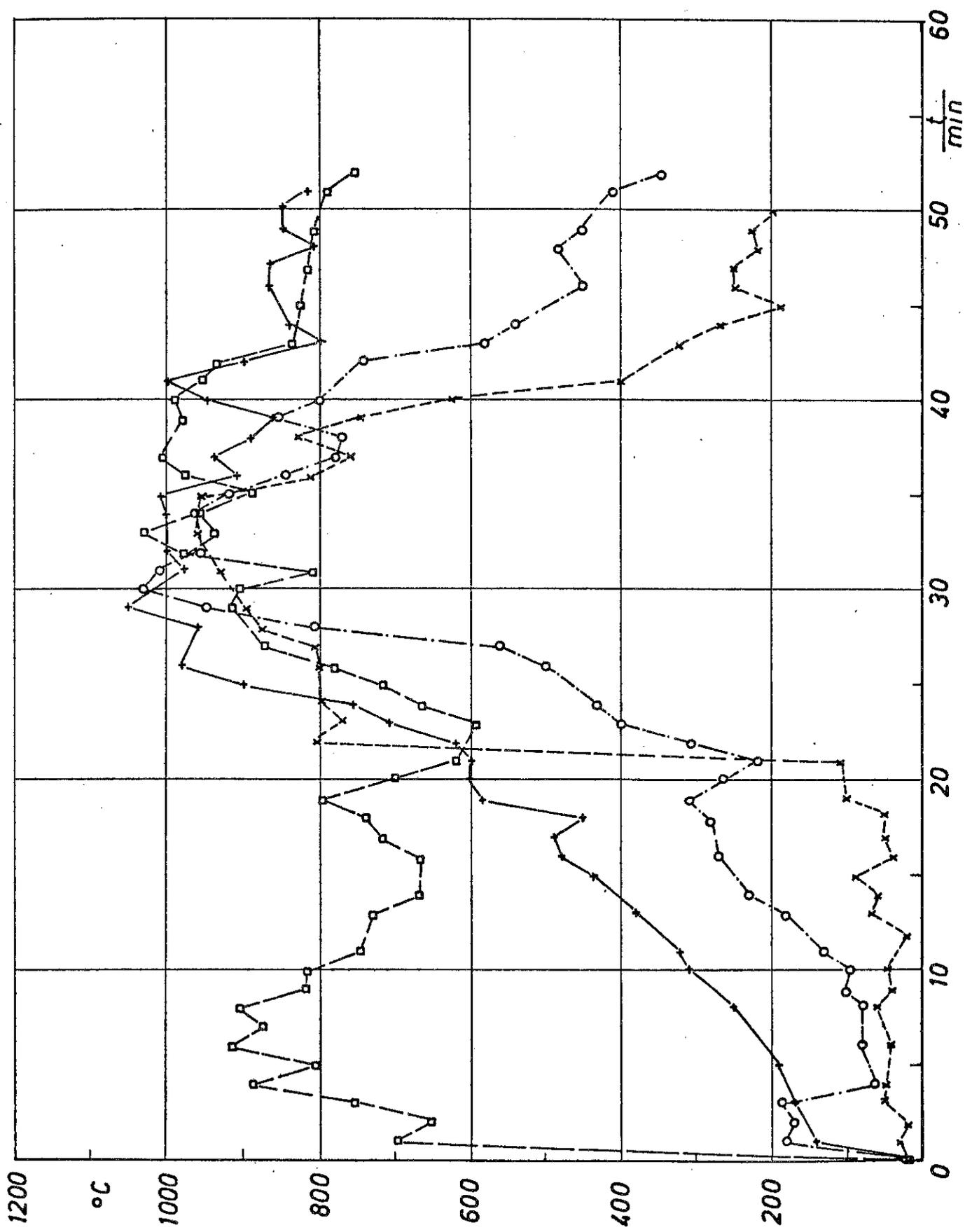
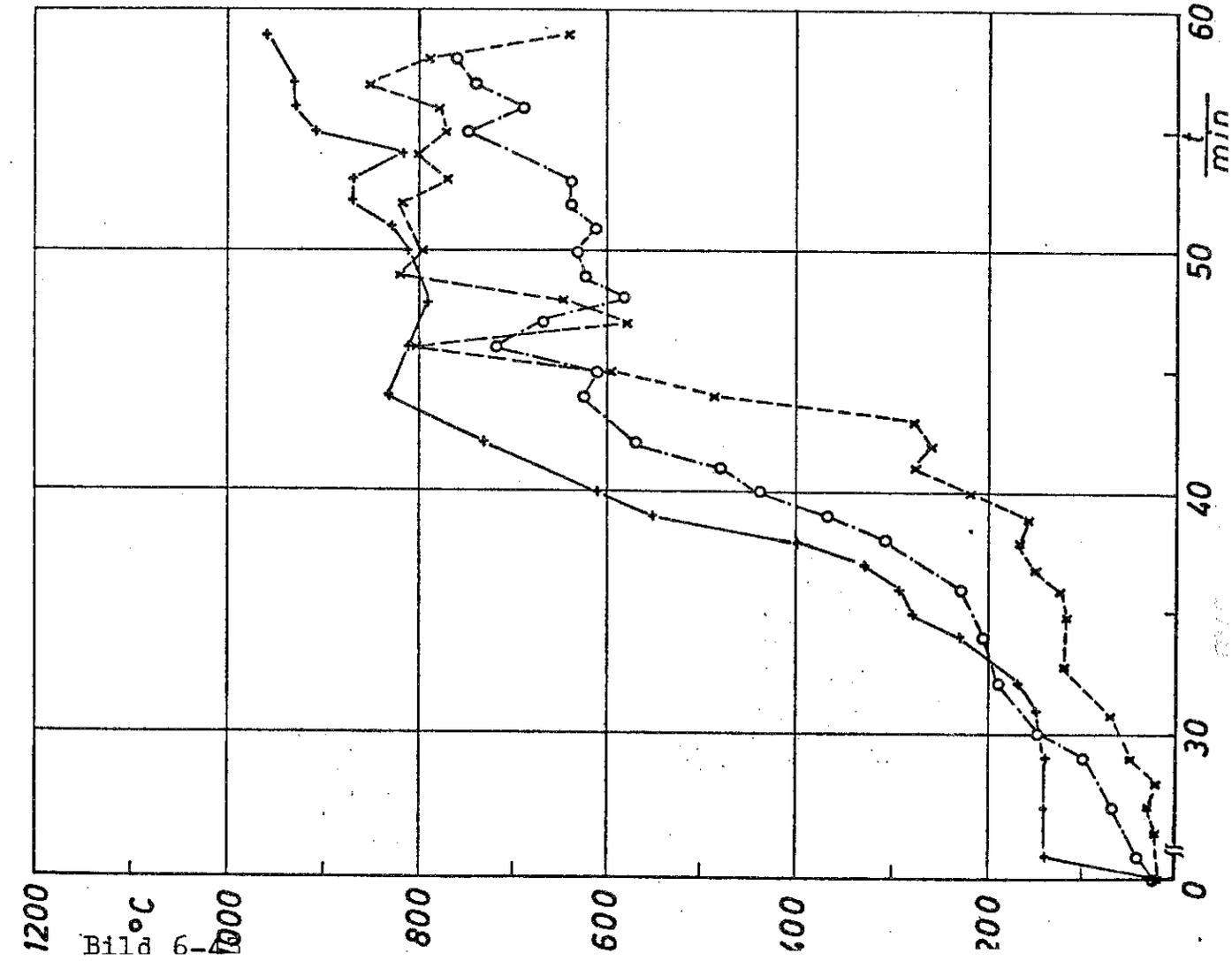
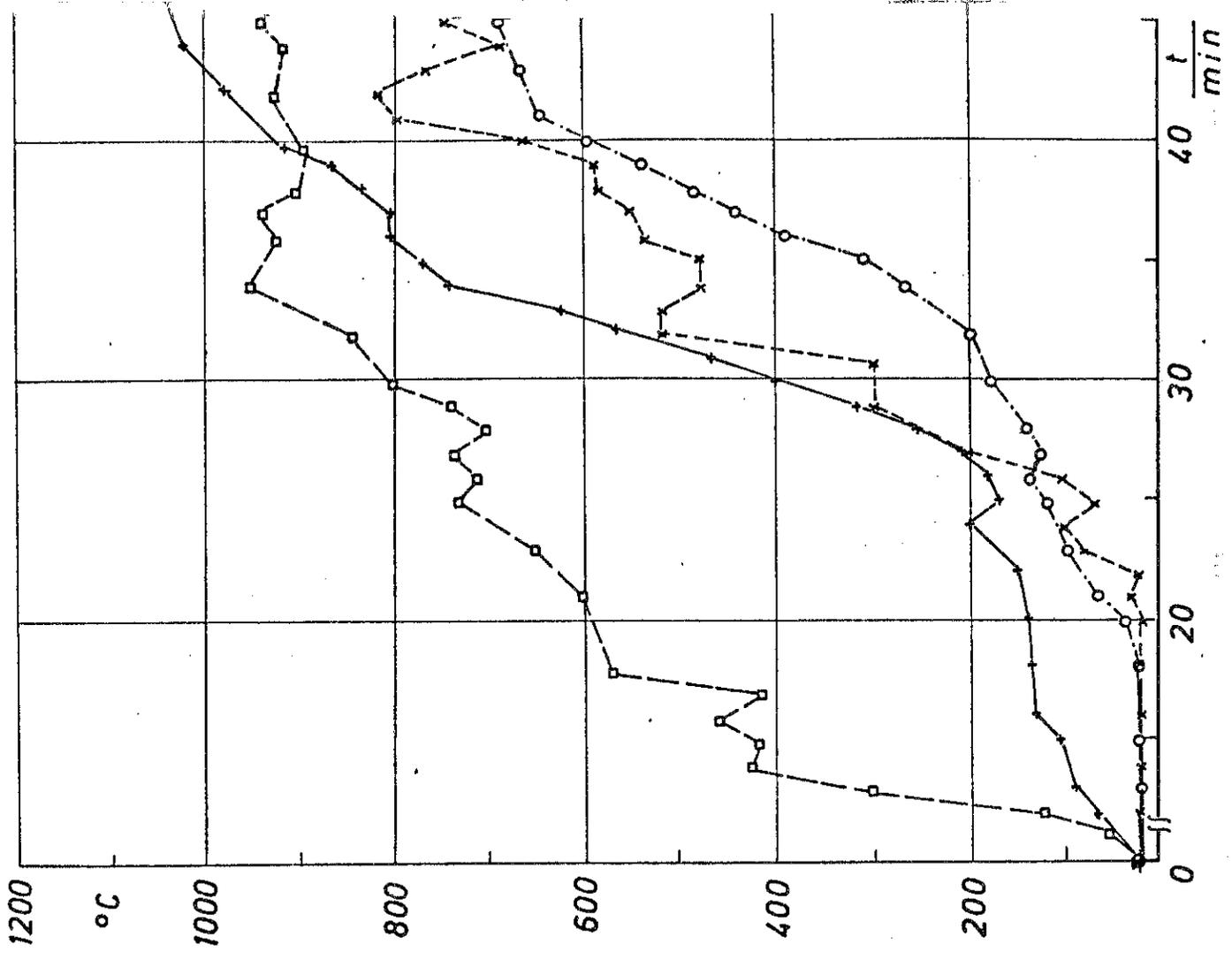


Bild 6-42

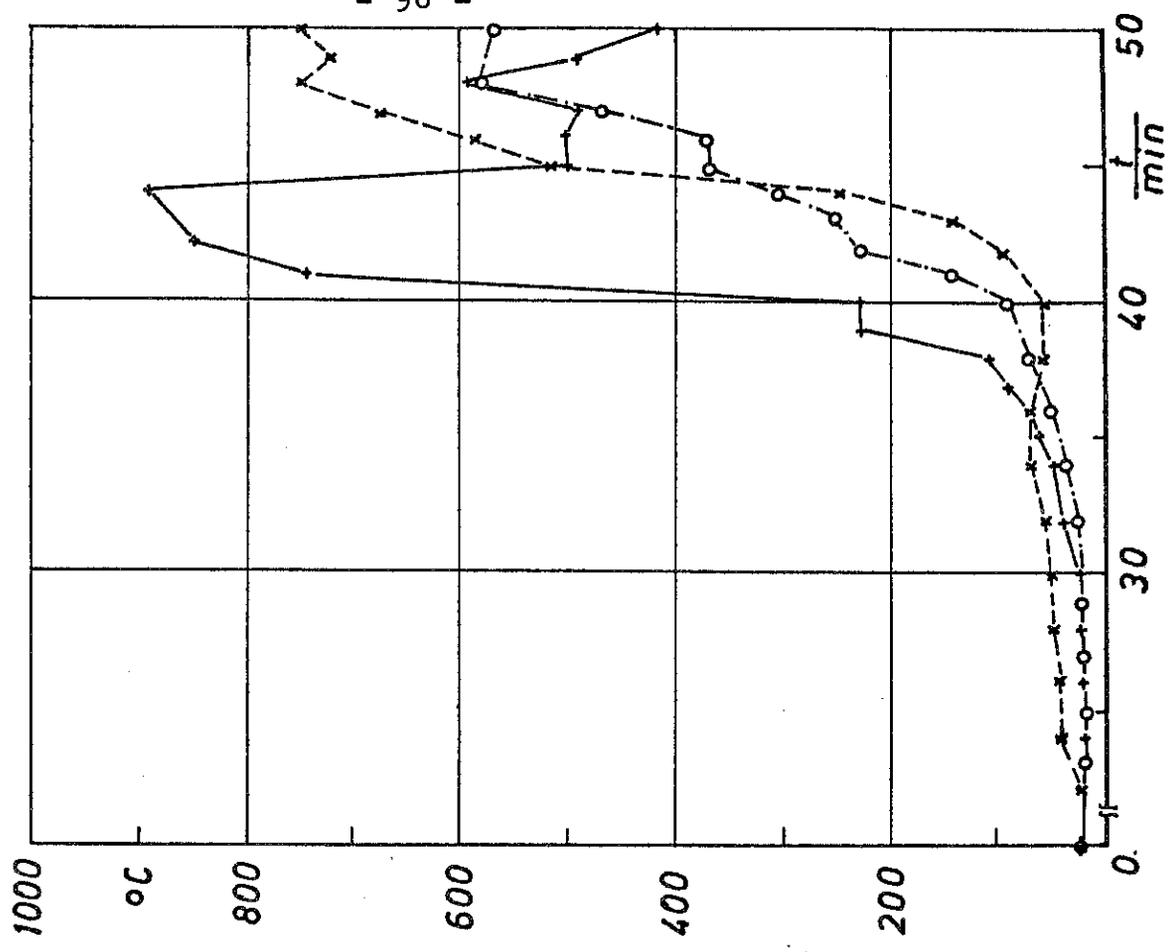
Versuch 32 * T 5 ----- + T 7 -----
 o T 6 -----



Versuch 34 * T 5 ----- + T 7 -----
 o T 6 -----



Versuch 34 x T 9 ---
o T10 ---
+ T11 ---



o T10 ---
+ T11 ---

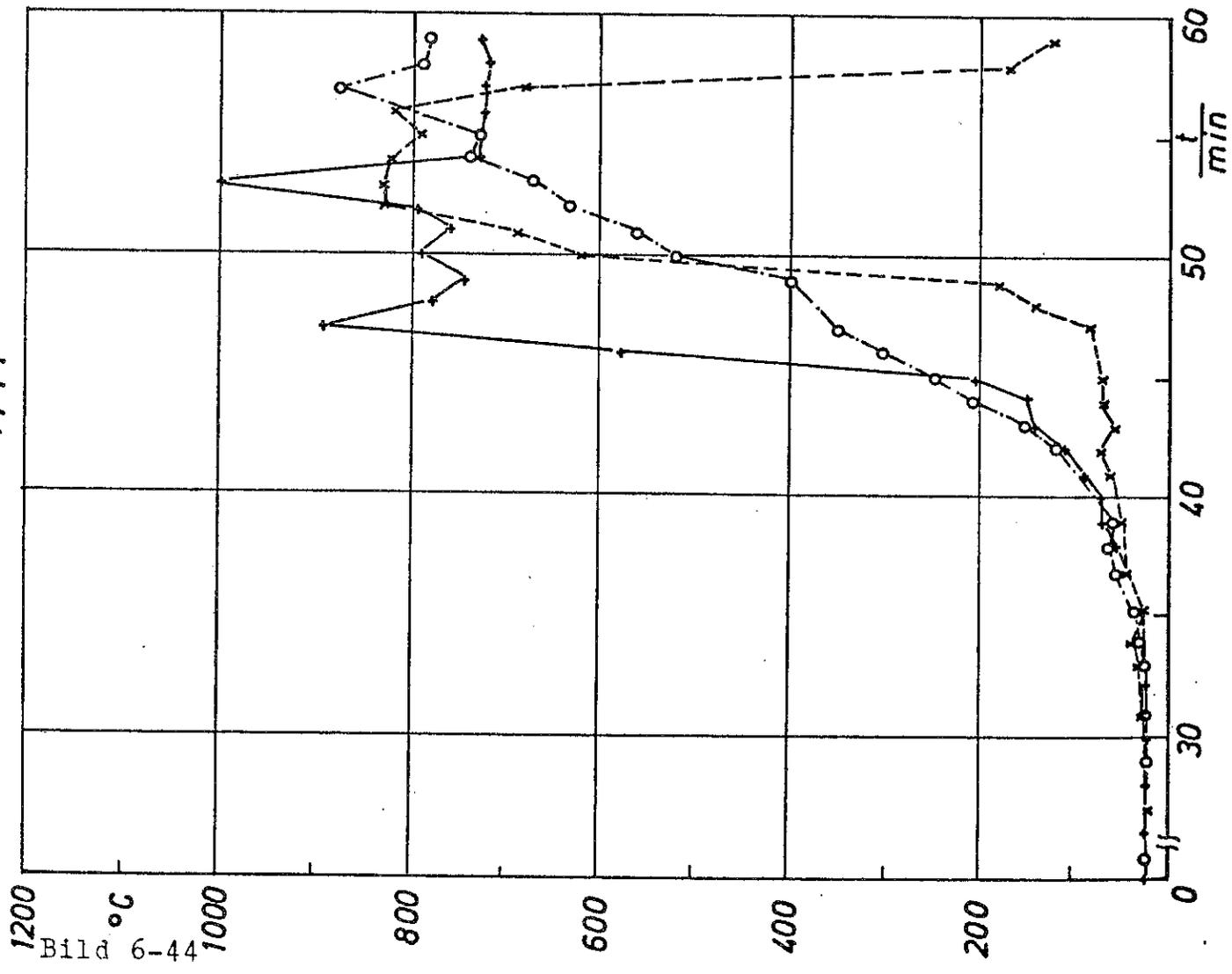
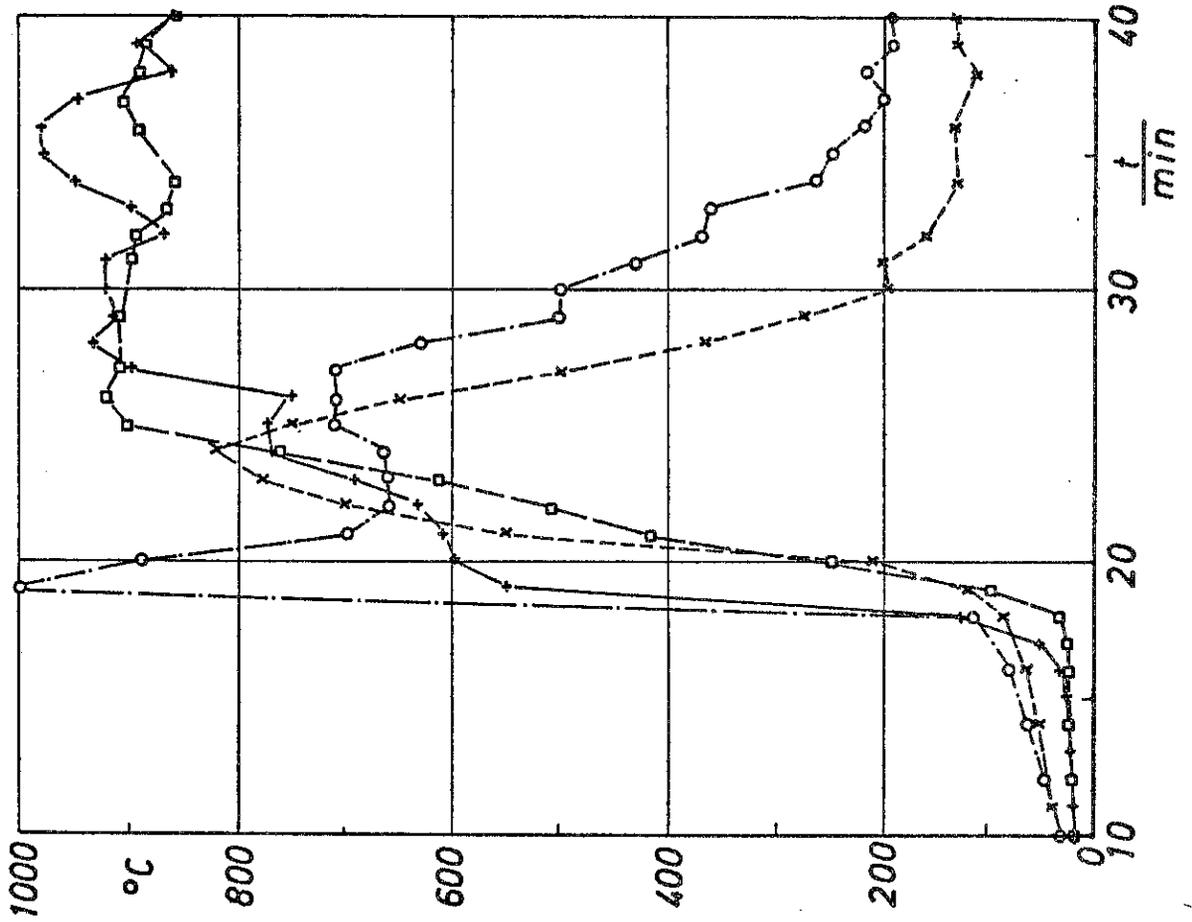


Bild 6-44

Versuch 17 * T 1 ---
o T 2 ---
+ T 3 ---
□ T 4 ---



Versuch 16 * T 1 ---
o T 2 ---
+ T 3 ---
□ T 4 ---

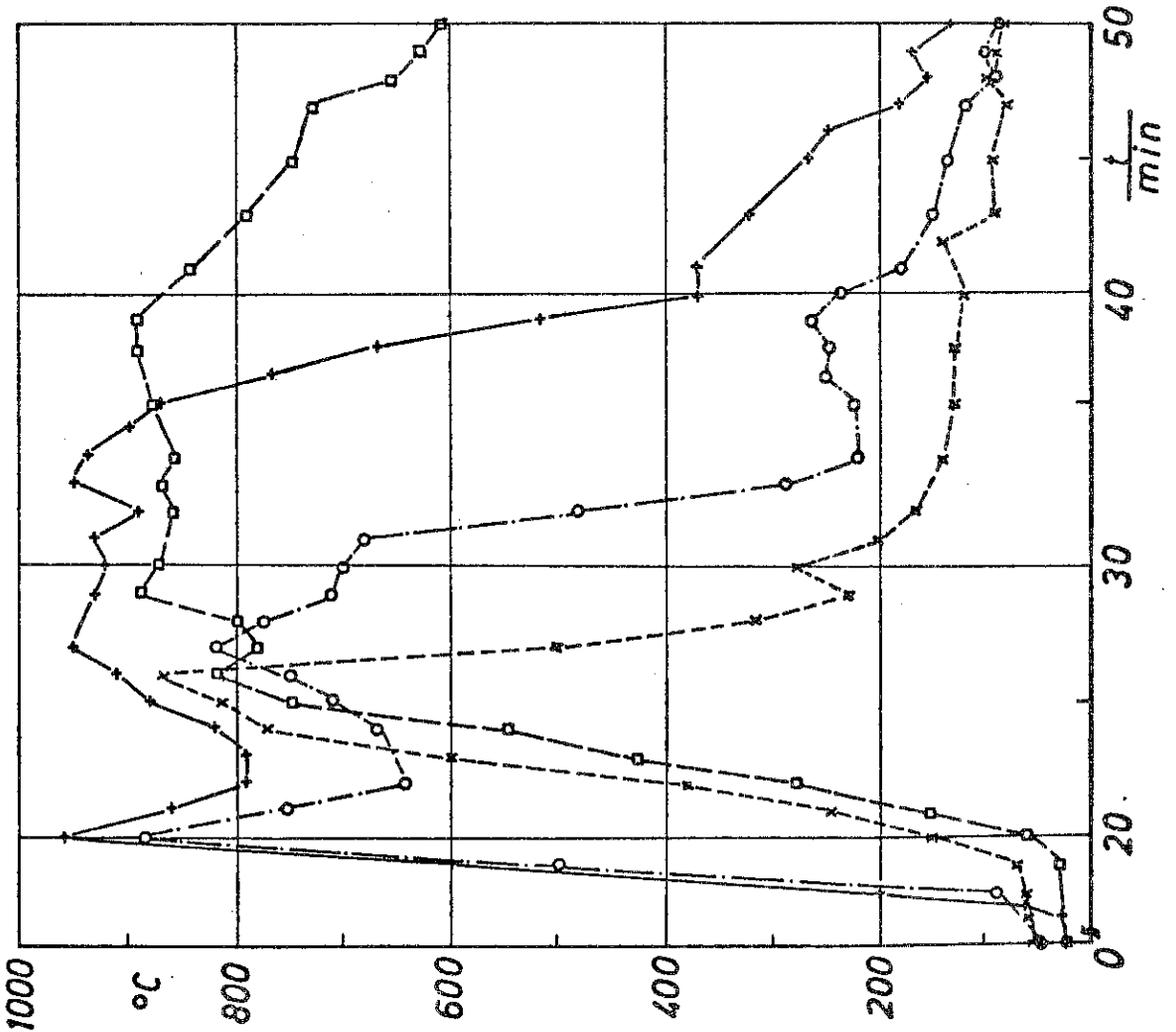
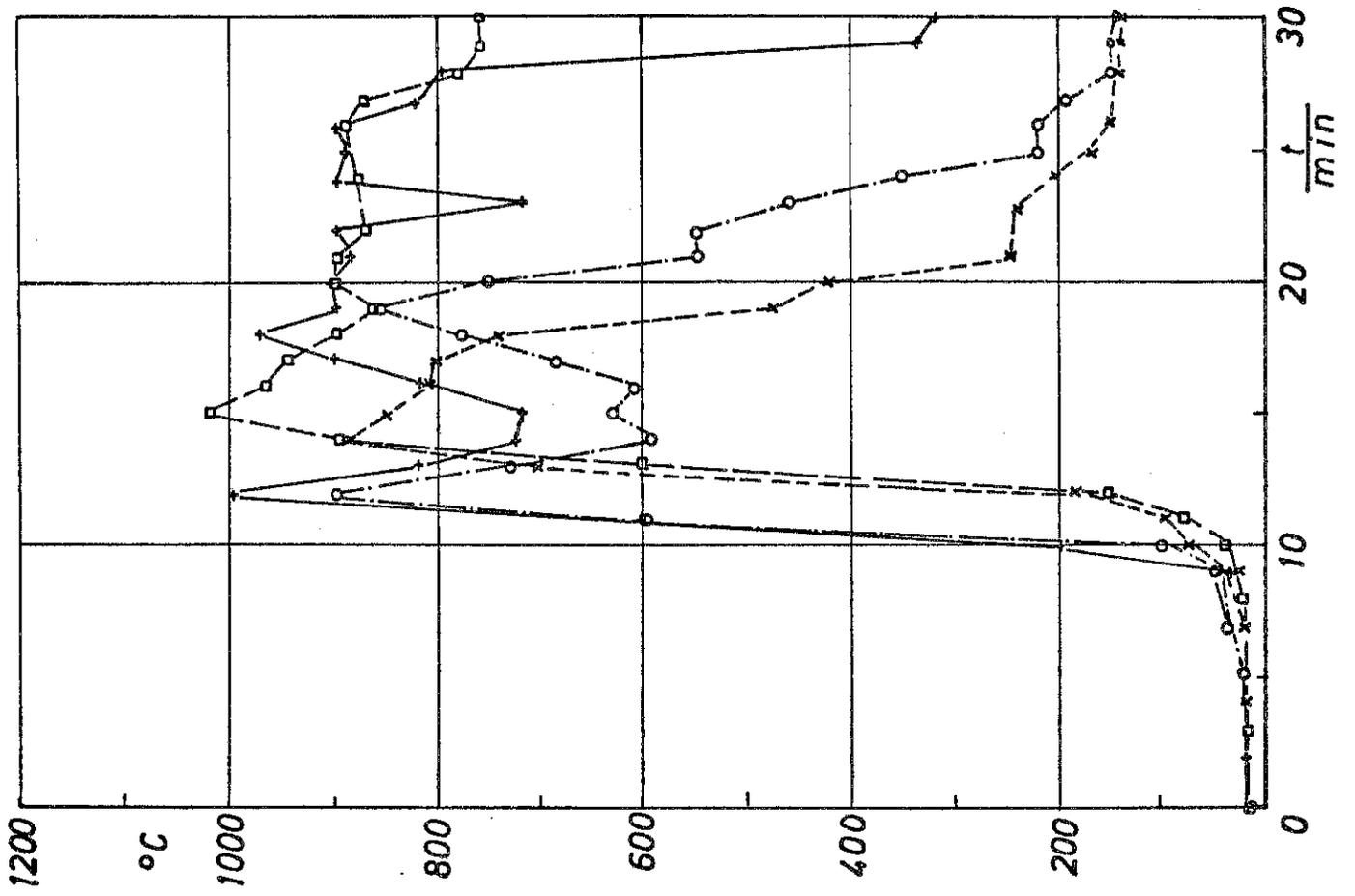


Bild 6-45

○ T 6 ——— □ T 8 ———



Versuch 16 * T 5 - - - -
○ T 6 - - - -
+ T 7 - - - -
□ T 8 - - - -

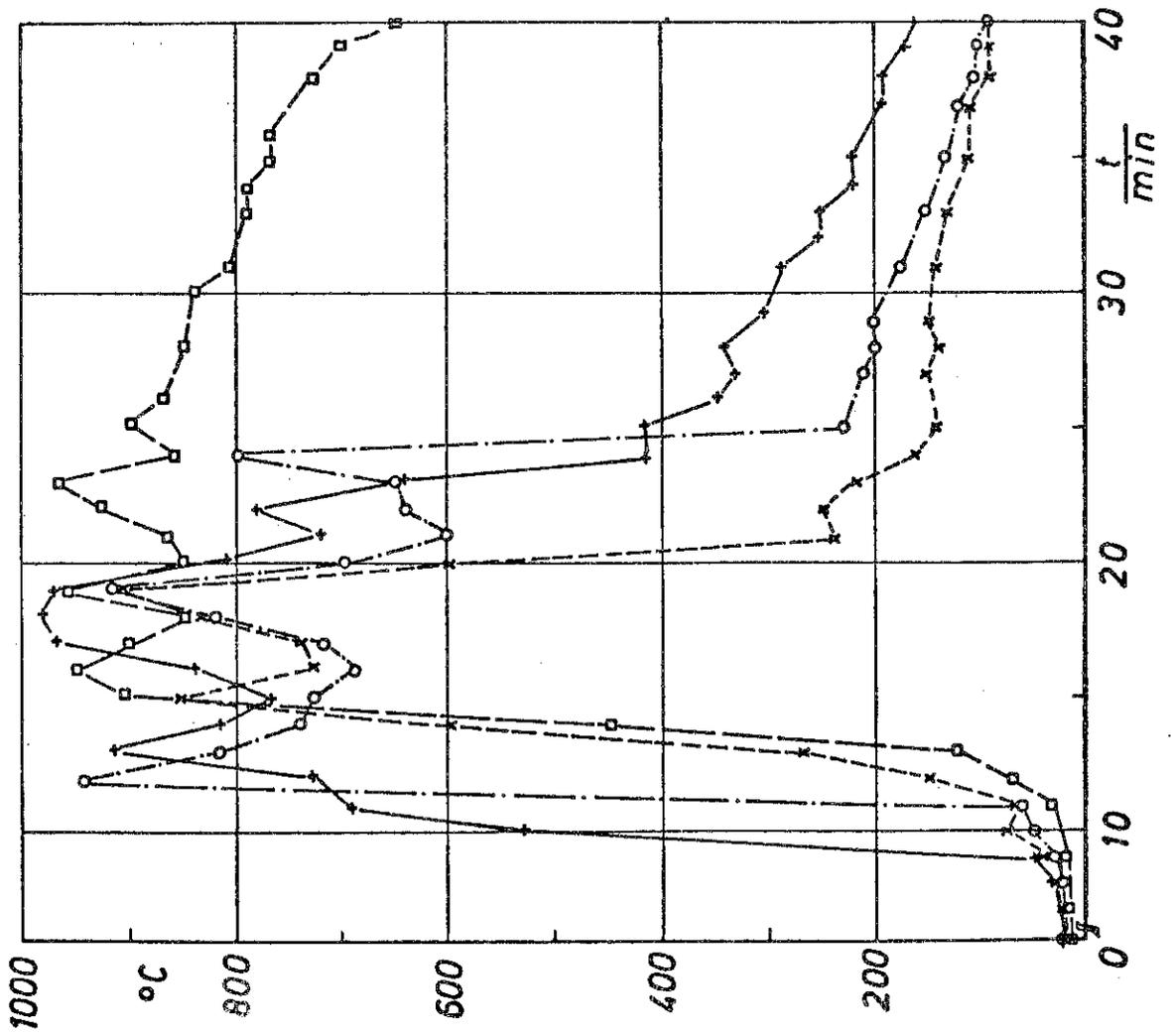
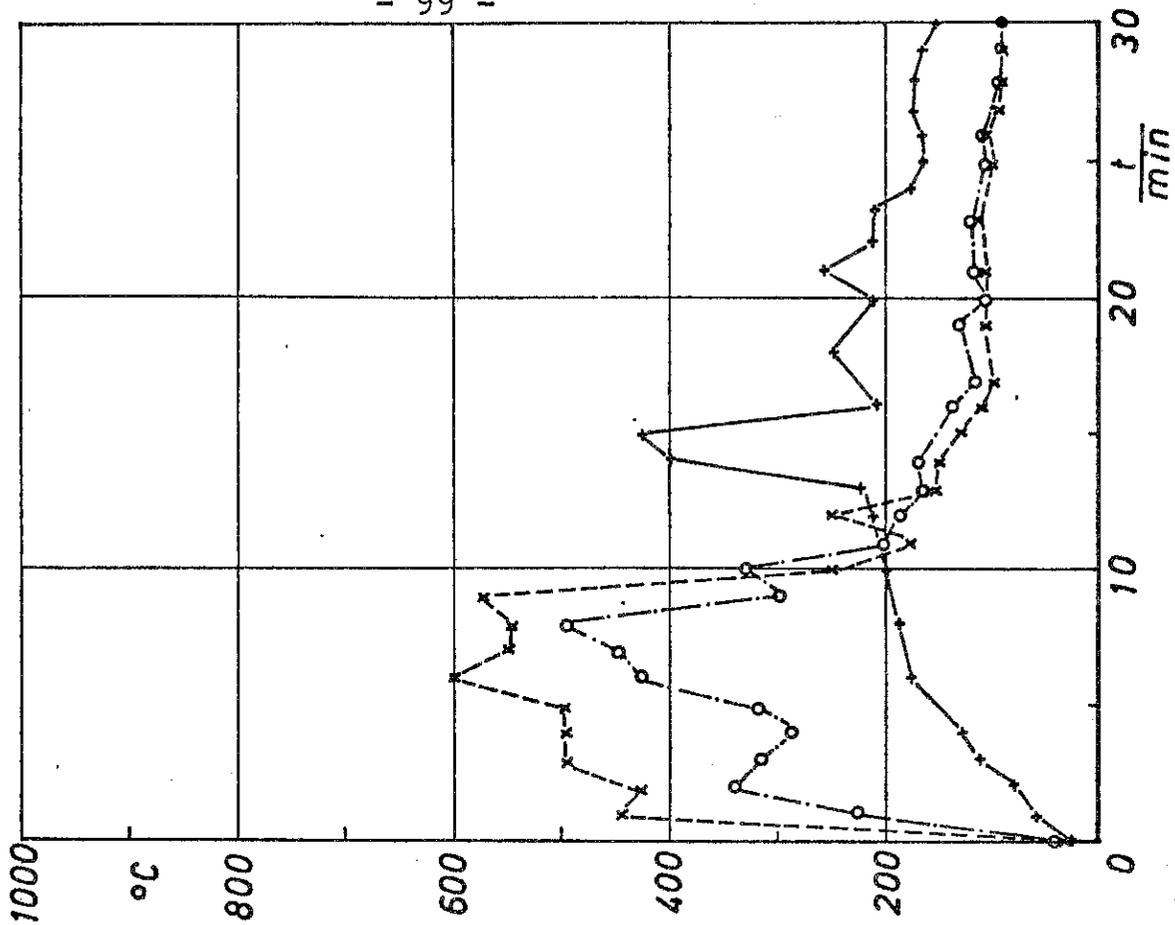


Bild 6-46

Versuch 17 * T 9

o T 10
+ T 11



Versuch 16 * T 9

o T 10
+ T 11

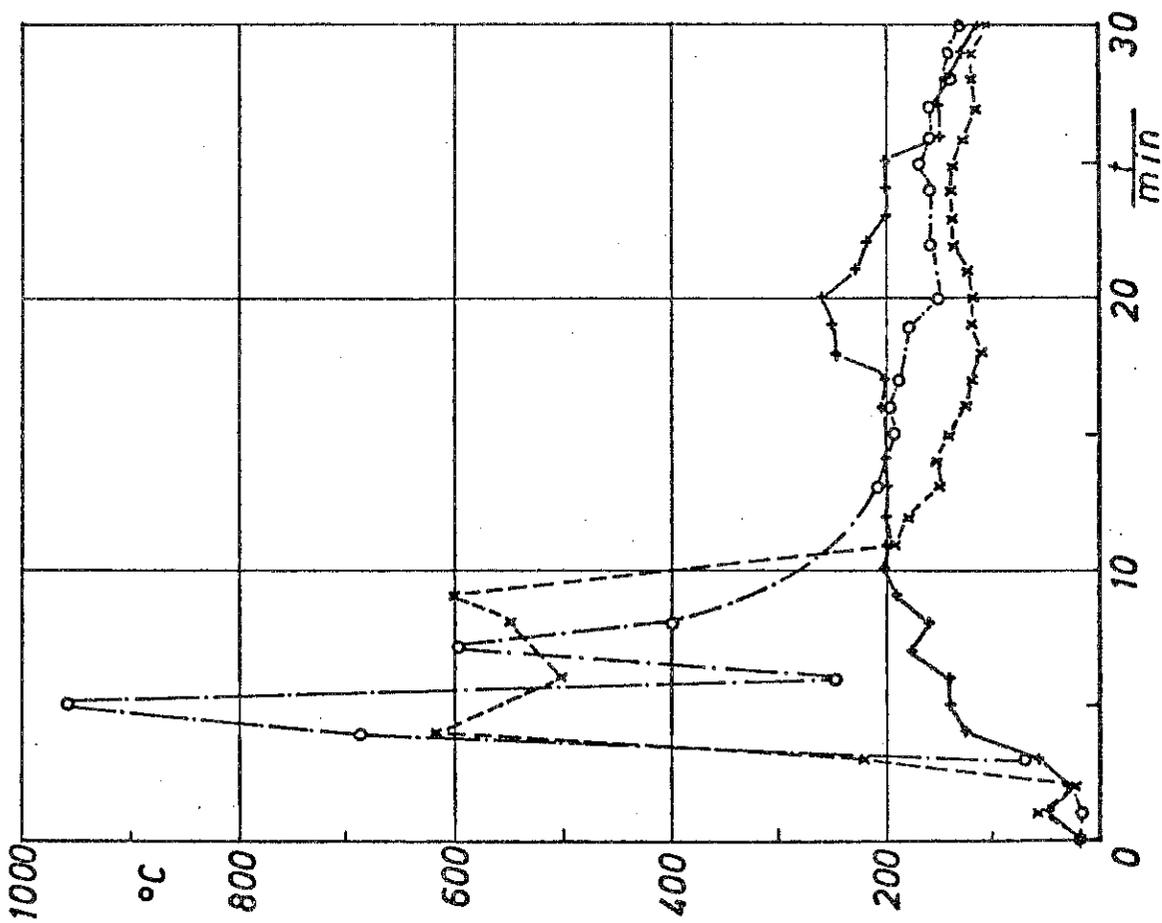
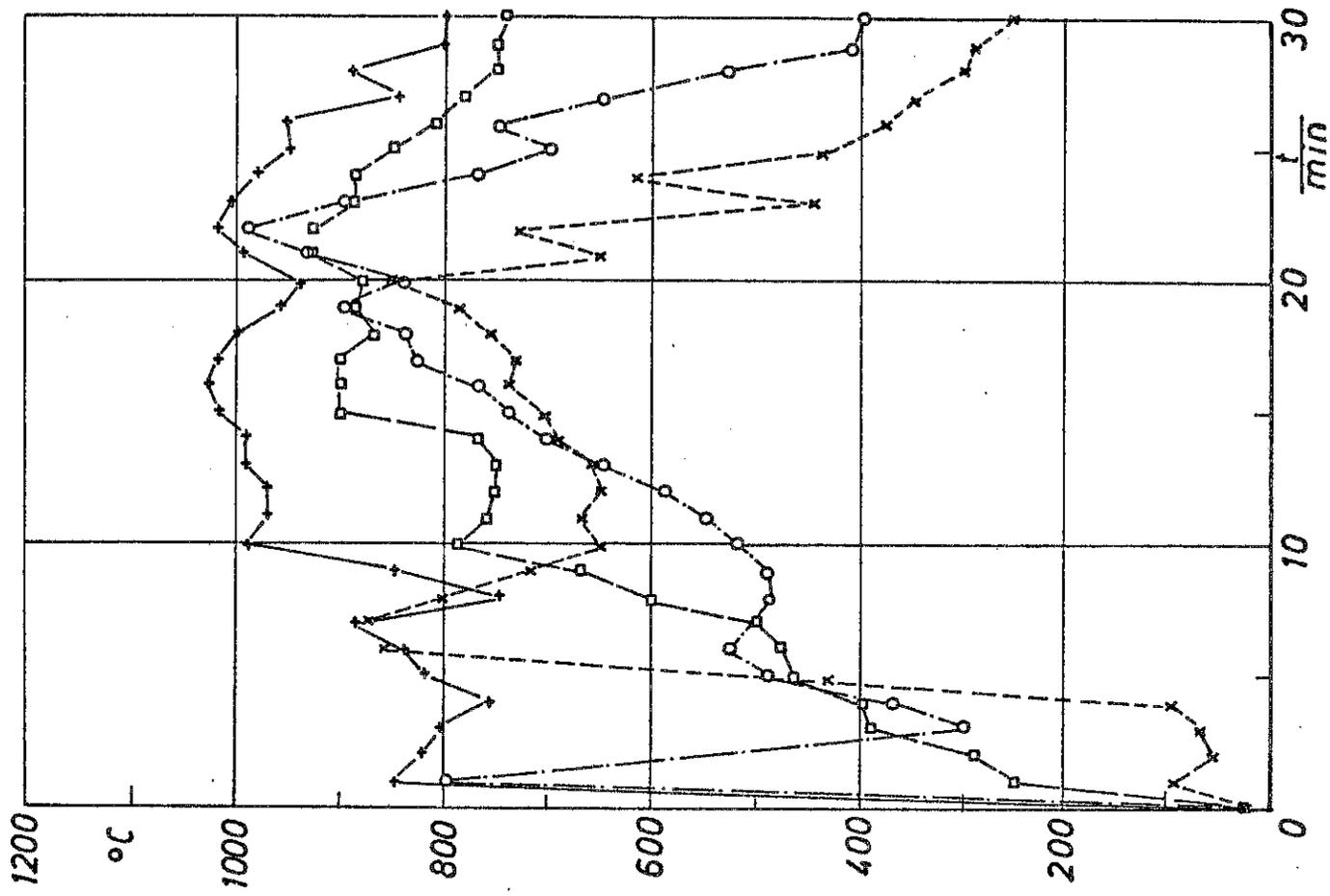


Bild 6-47

+ T 2 — □ T 4 —



versuch 16 + T 1 - - - + T 3 - - -
o T 2 — □ T 4 —

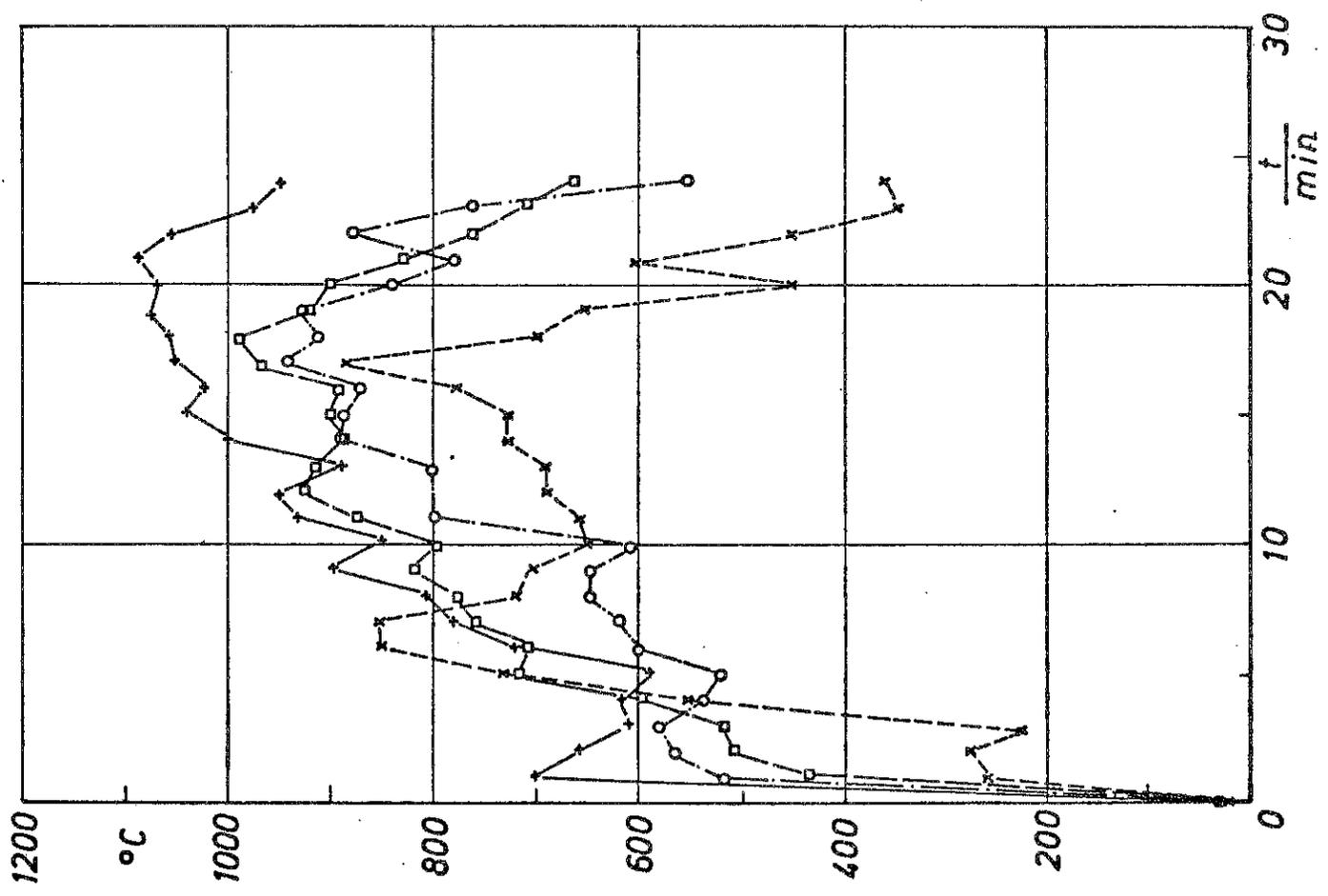
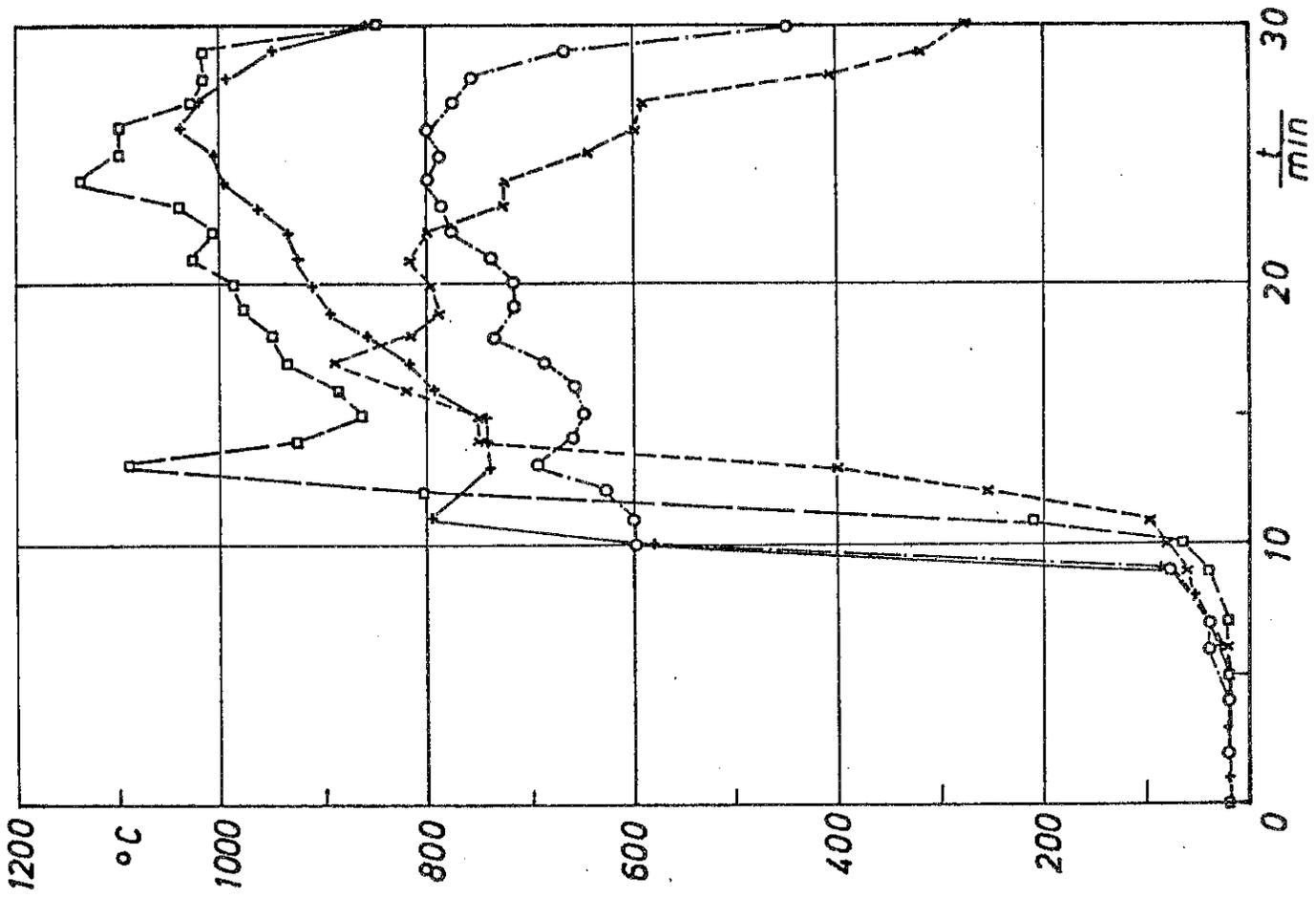


Bild 6-48

o 76 --- o 78 ---



o 76 --- o 78 ---

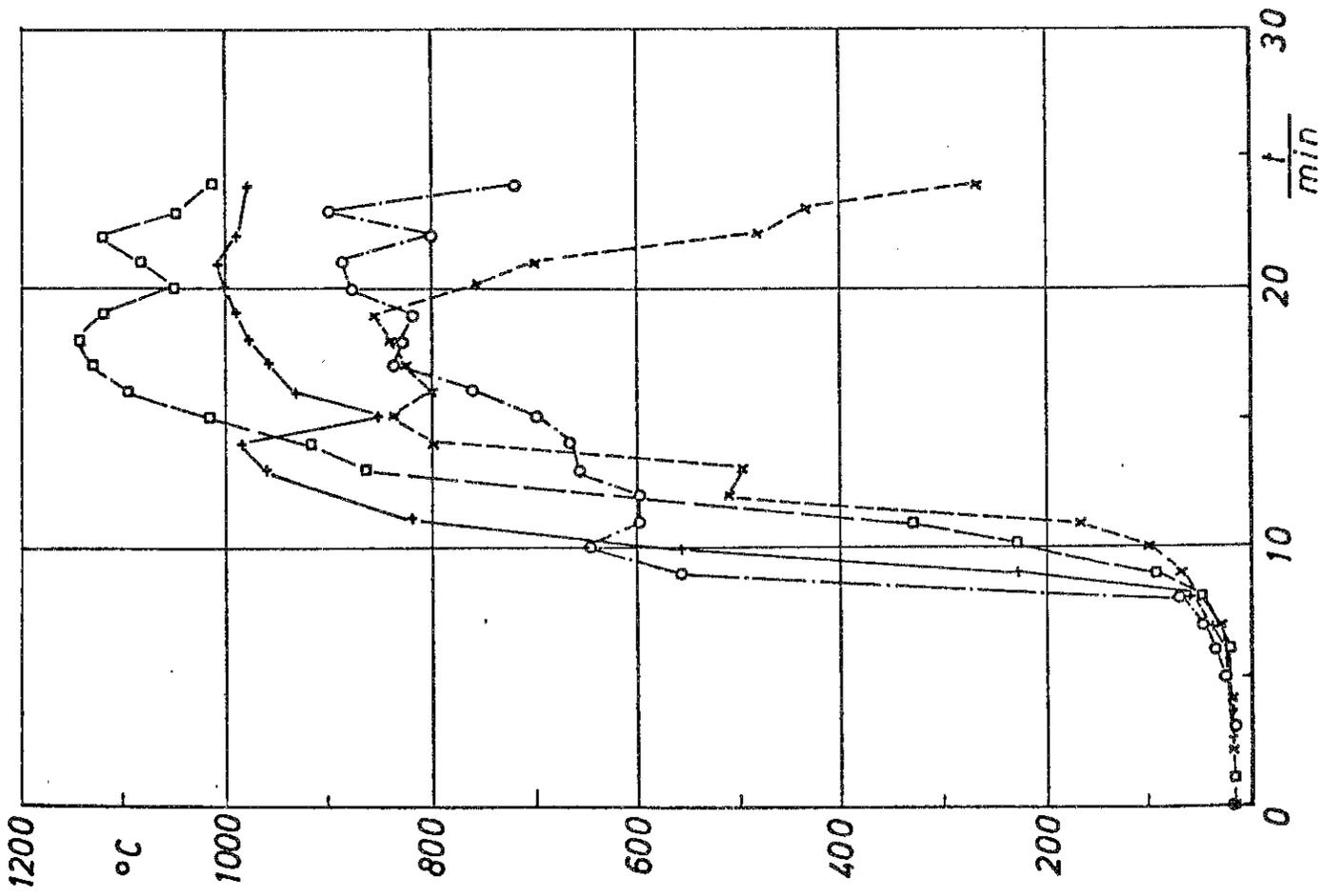
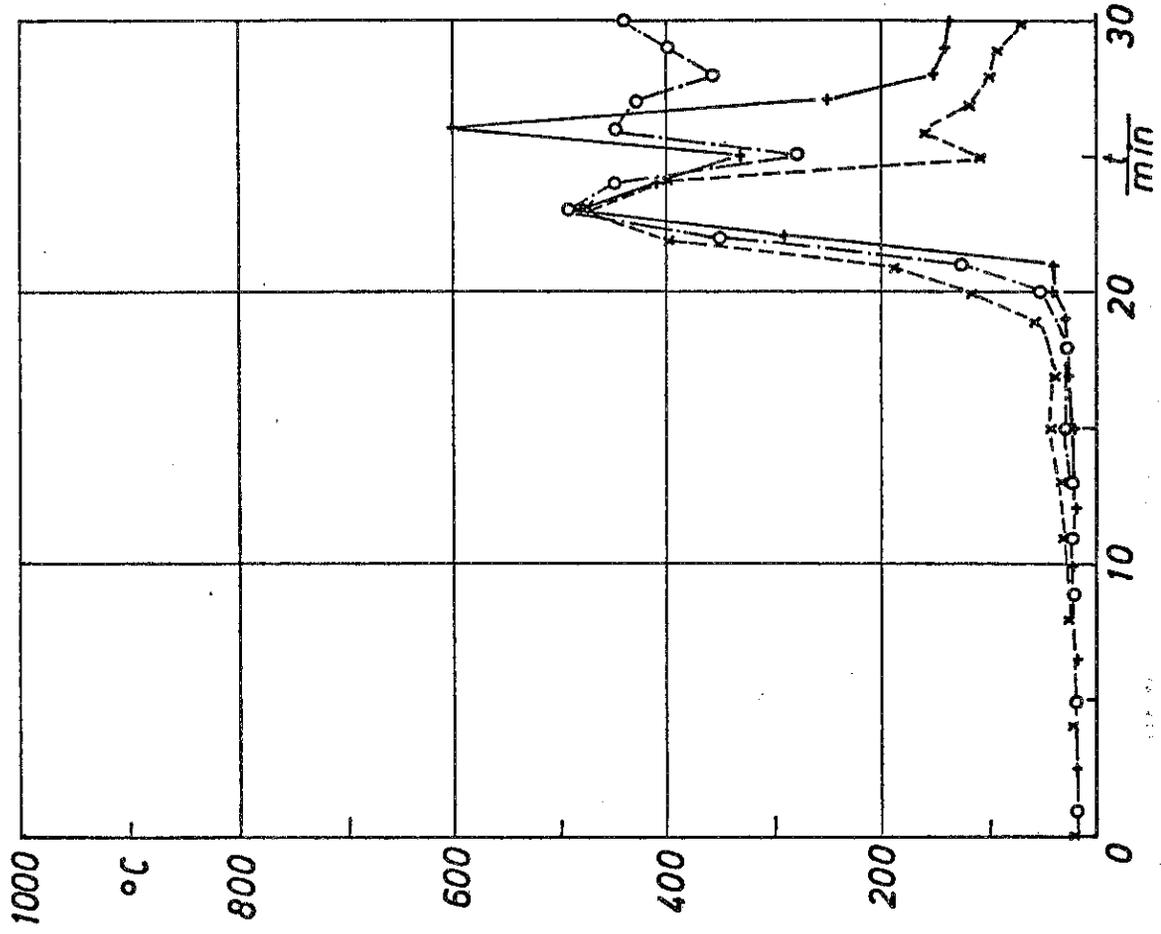


Bild 6-49

Versuch 23
x T 9
o T 10
+ T 11



o T 10
+ T 11

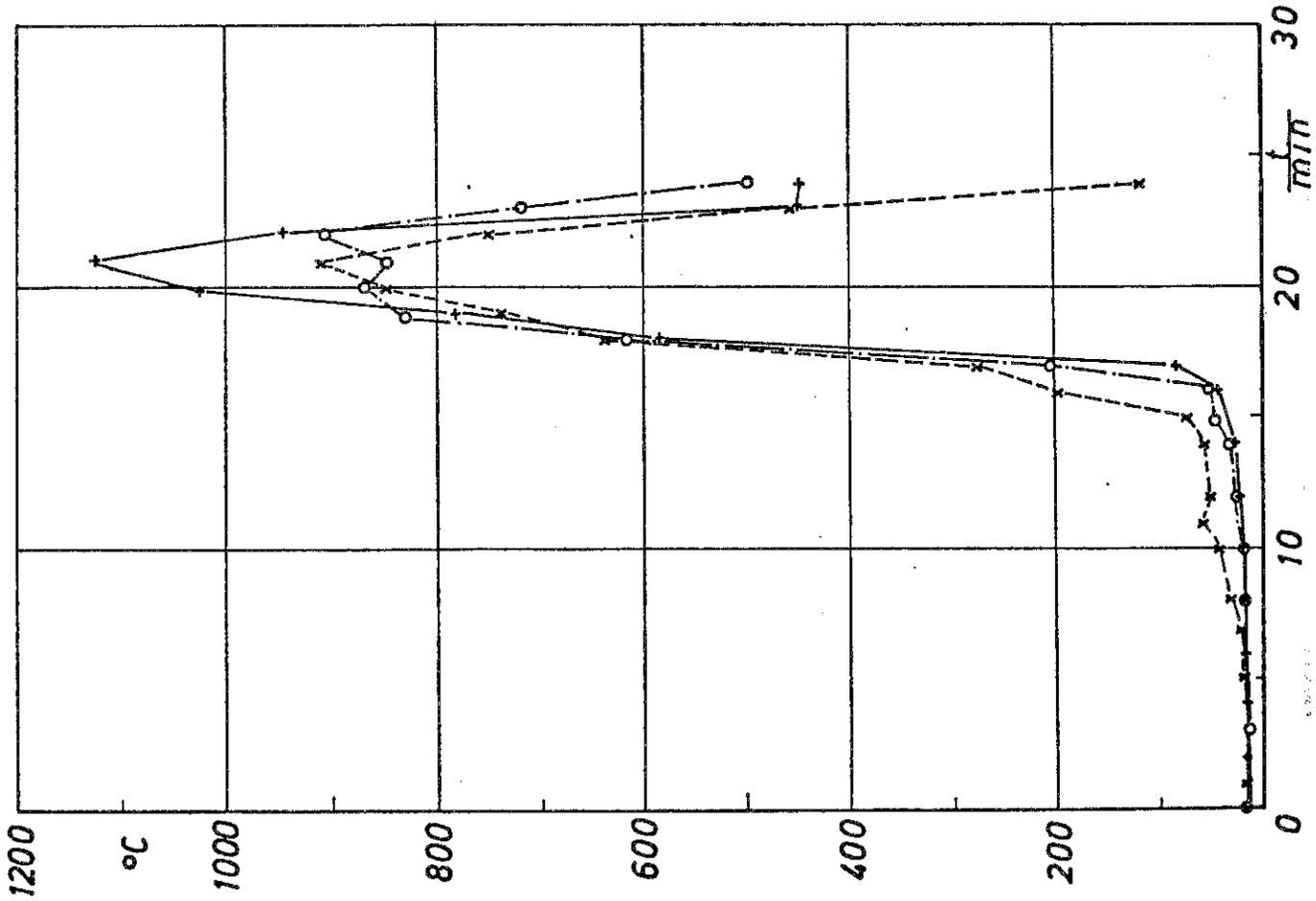
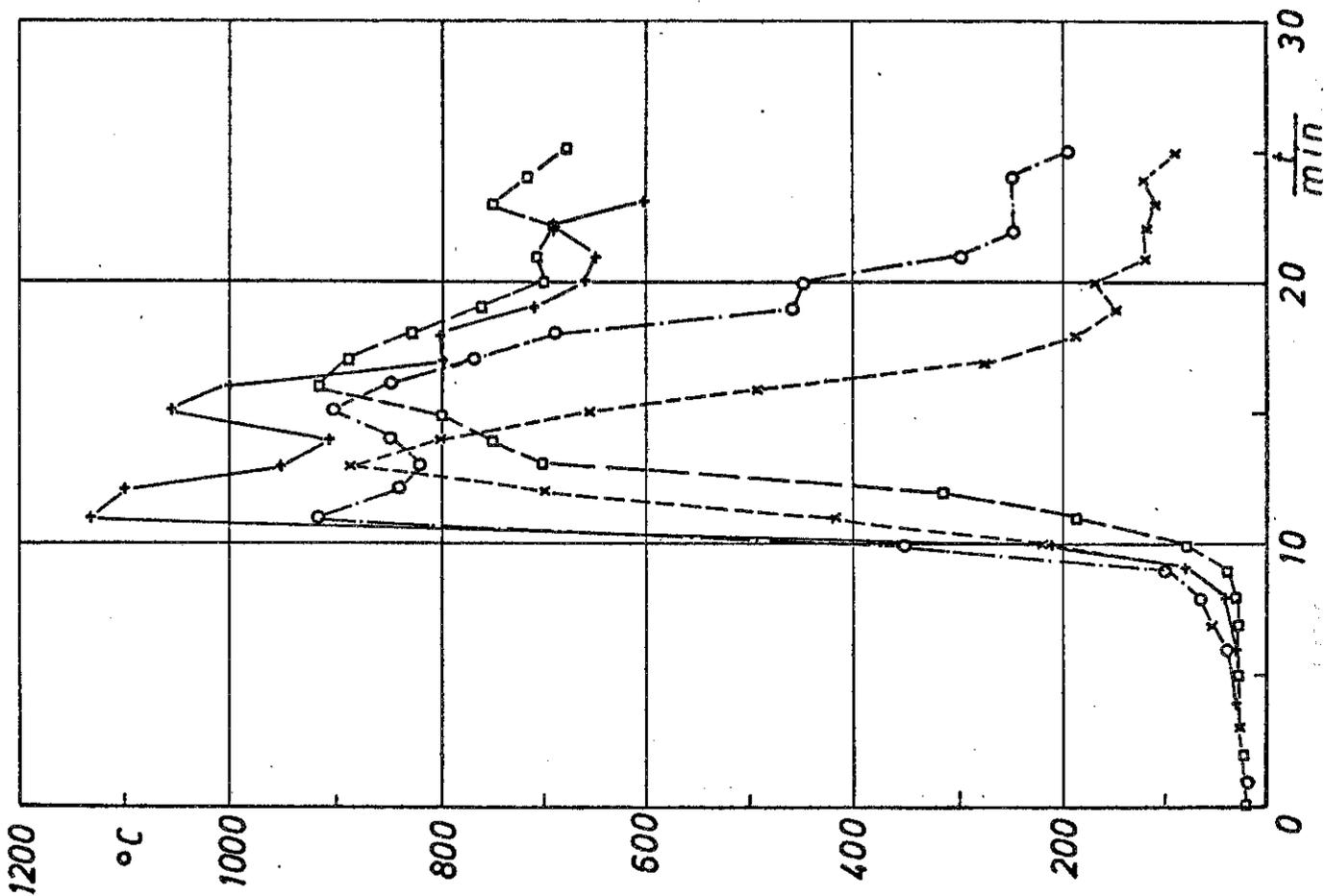


Bild 6-50

○ T 2 --- □ T 4 ---



Versuch 19 * T 1 --- + T 3 ---
○ T 2 --- □ T 4 ---

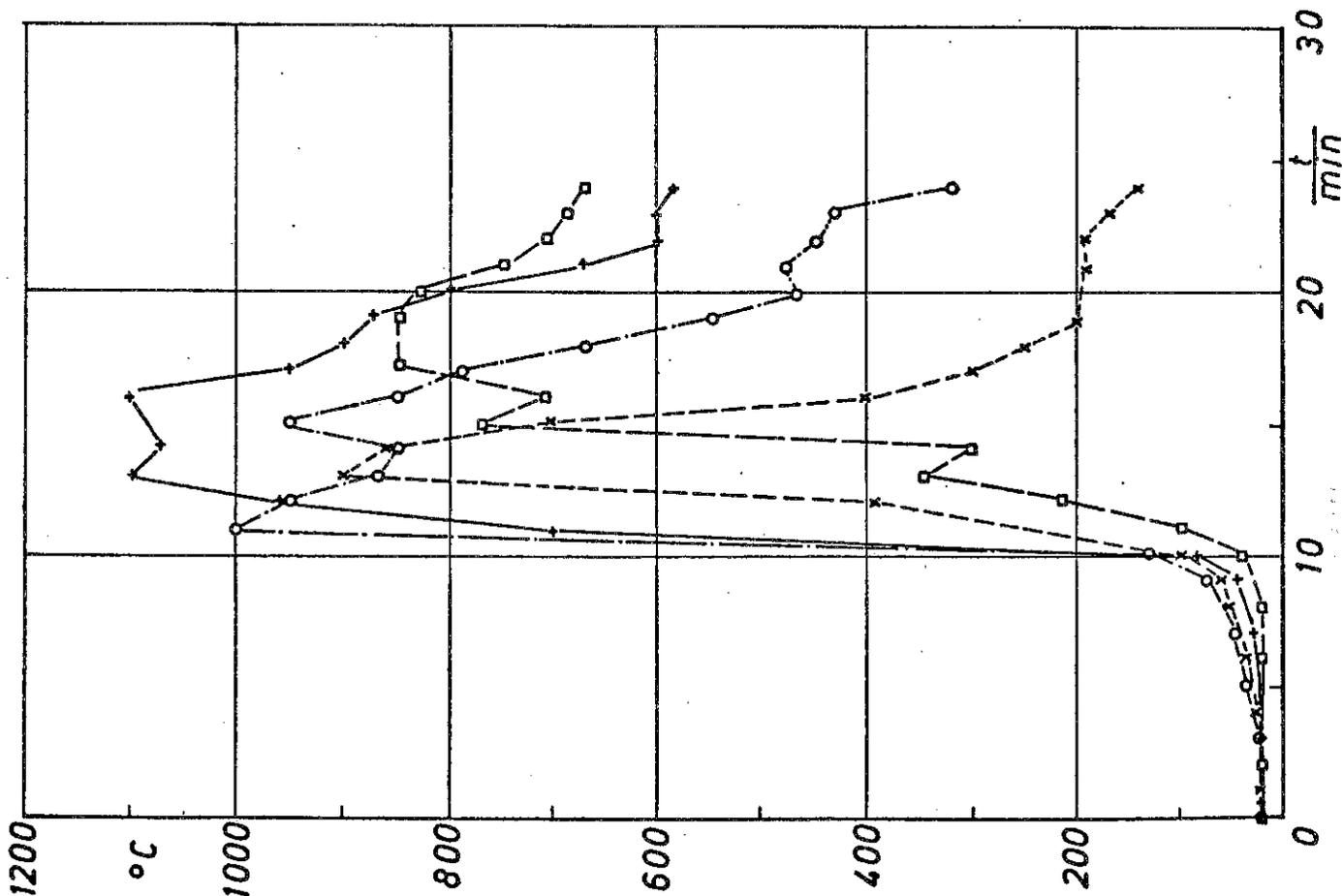


Bild 6-51

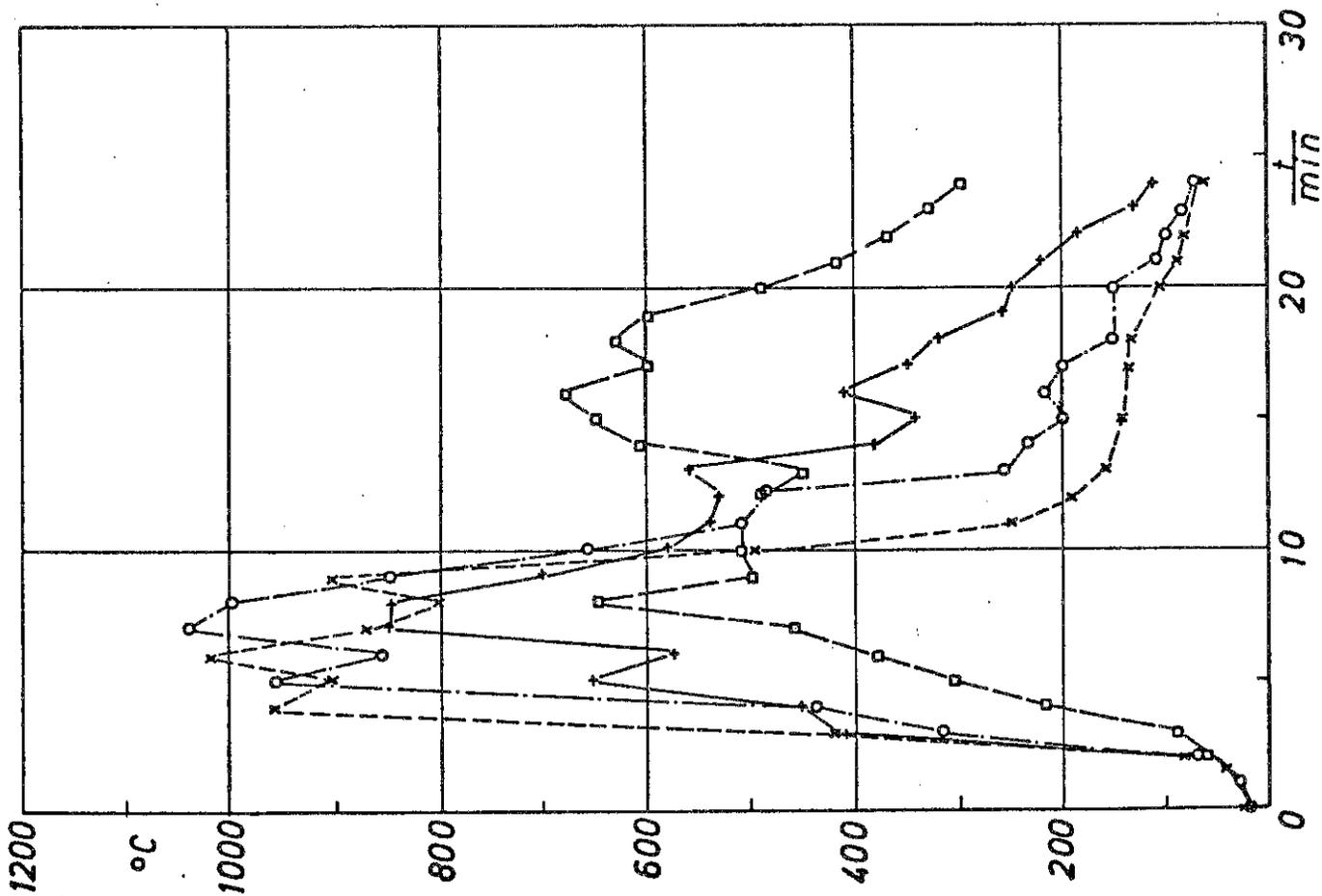
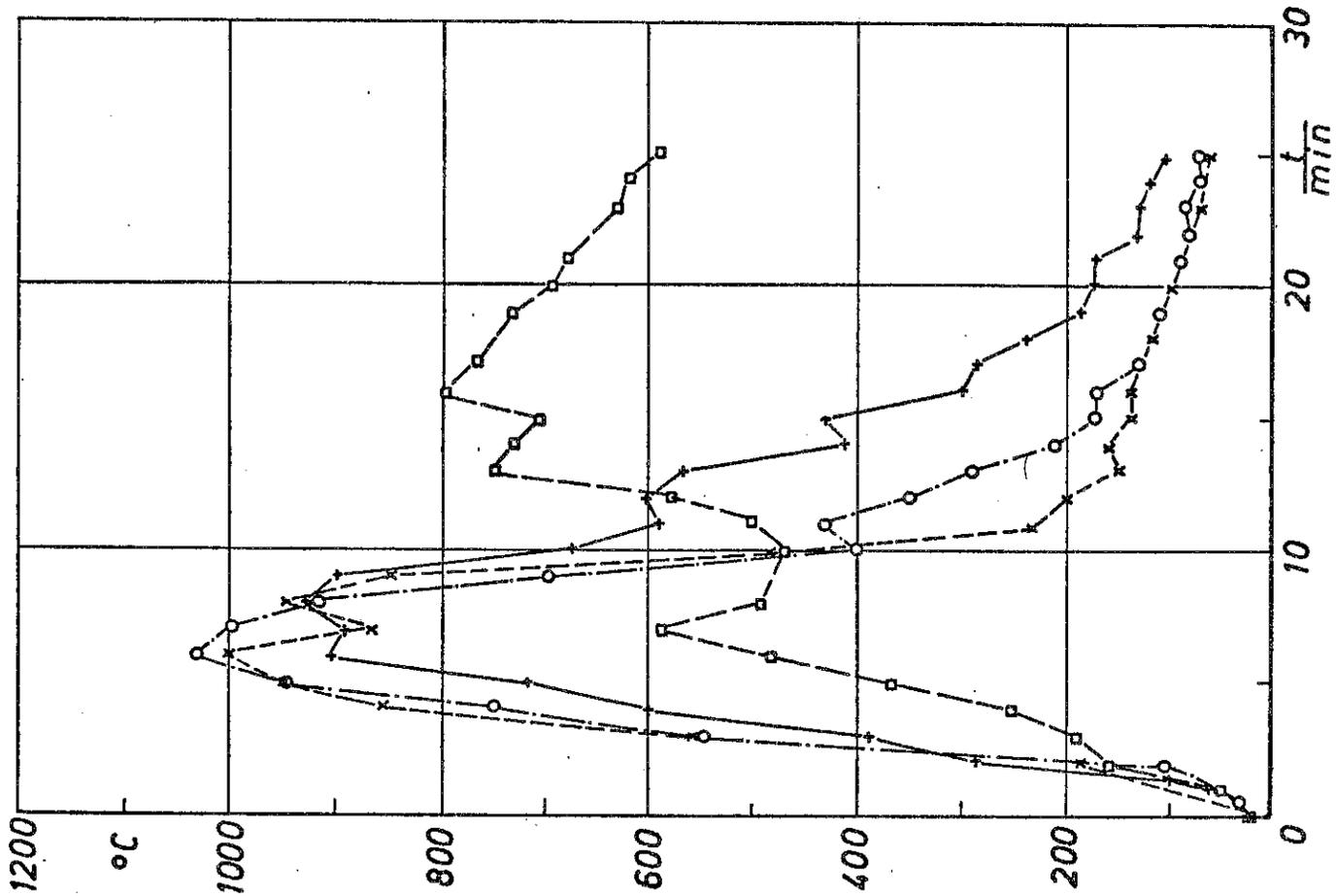
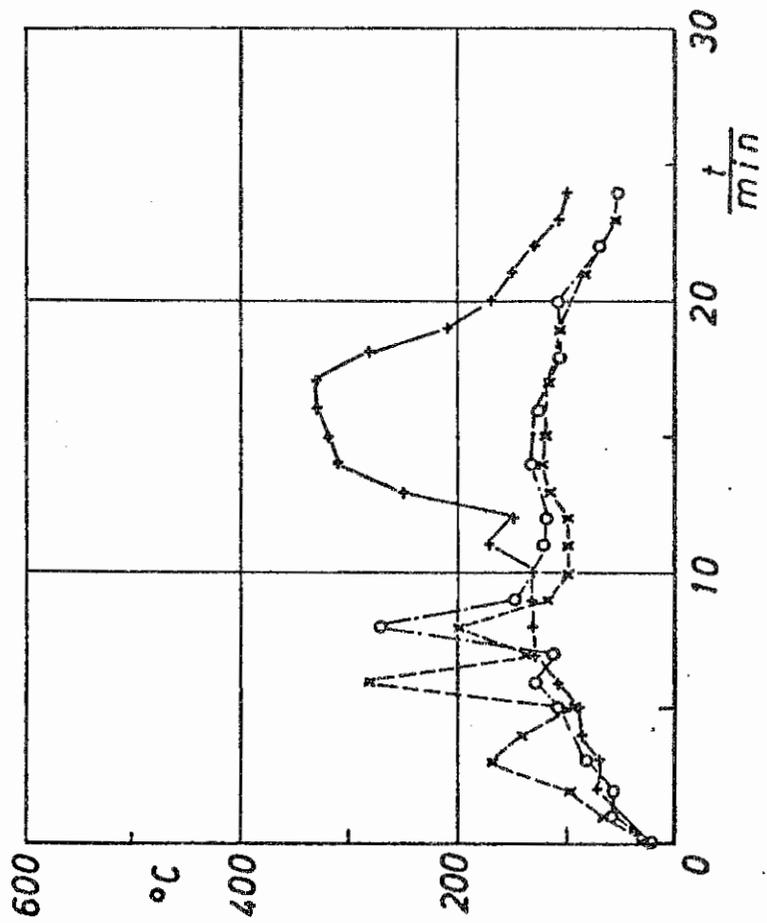


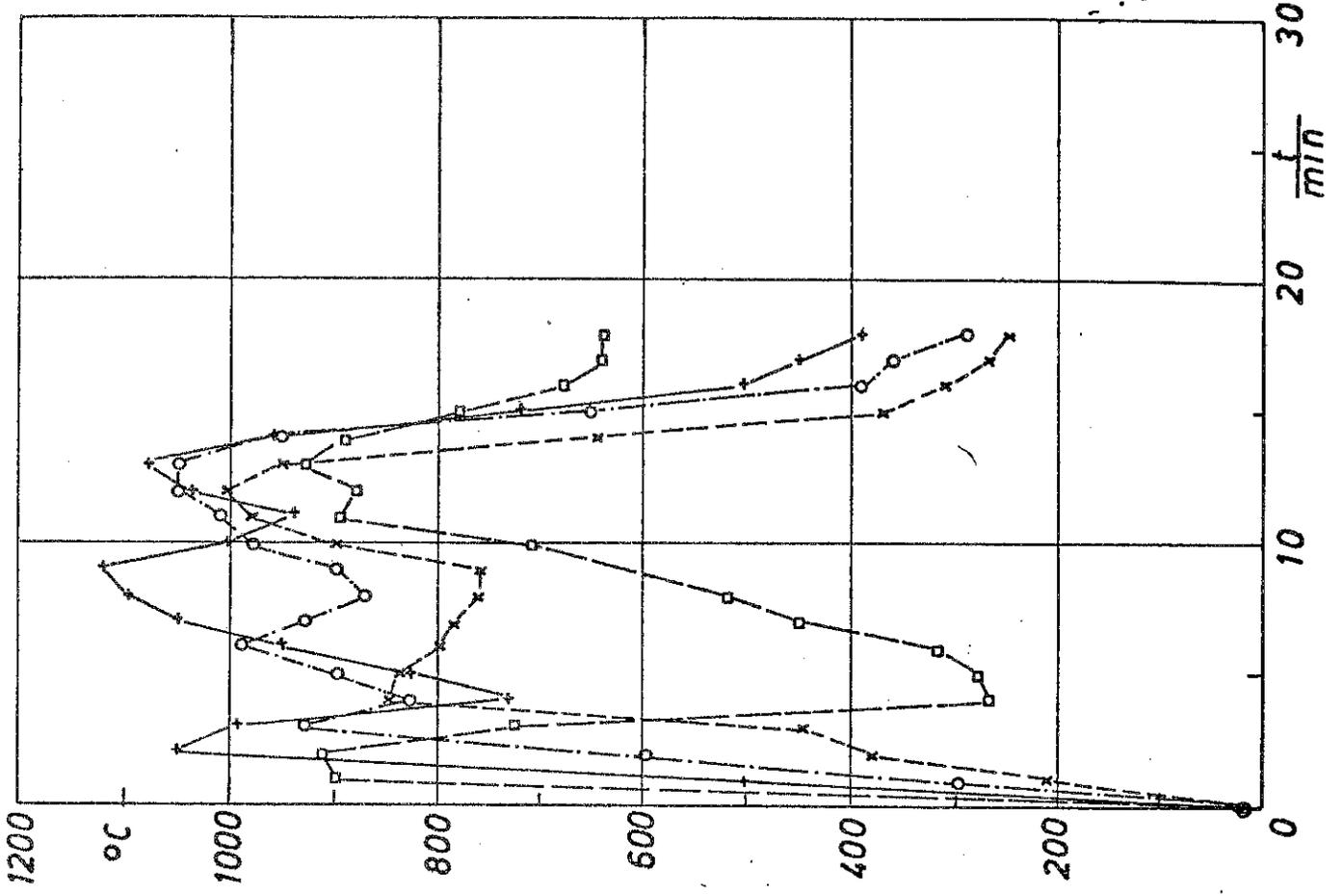
Bild 6-52

Versuch 19 * T 9 ---
o T10 ---
+ T11 ---

Bild 6-53



○ T 2 --- □ T 4 ---



○ T 2 --- □ T 4 ---

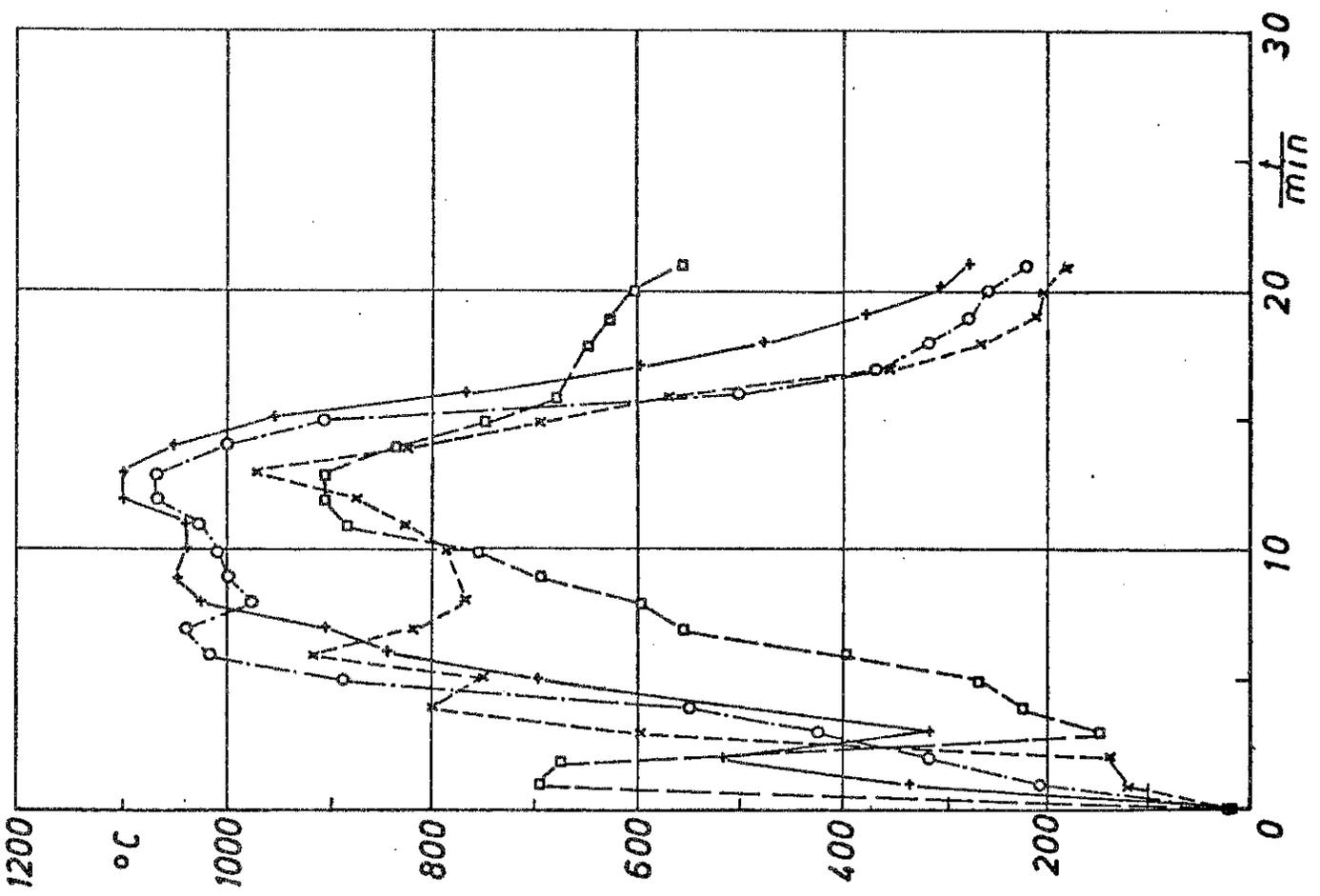
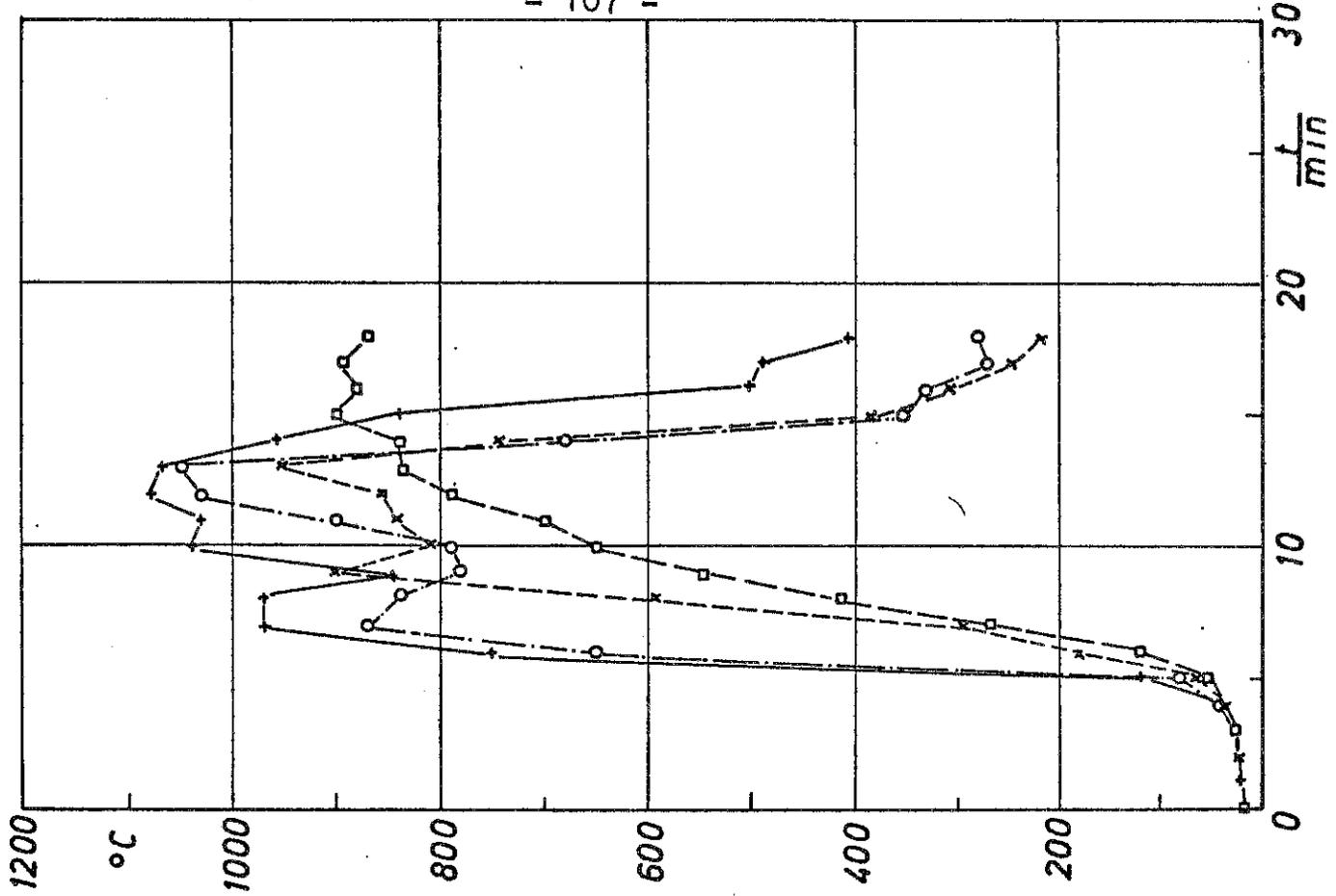


Bild 6-54

Versuch 22 T5 --- T7 ---
T6 --- T8 ---



○ T6 --- □ T8 ---

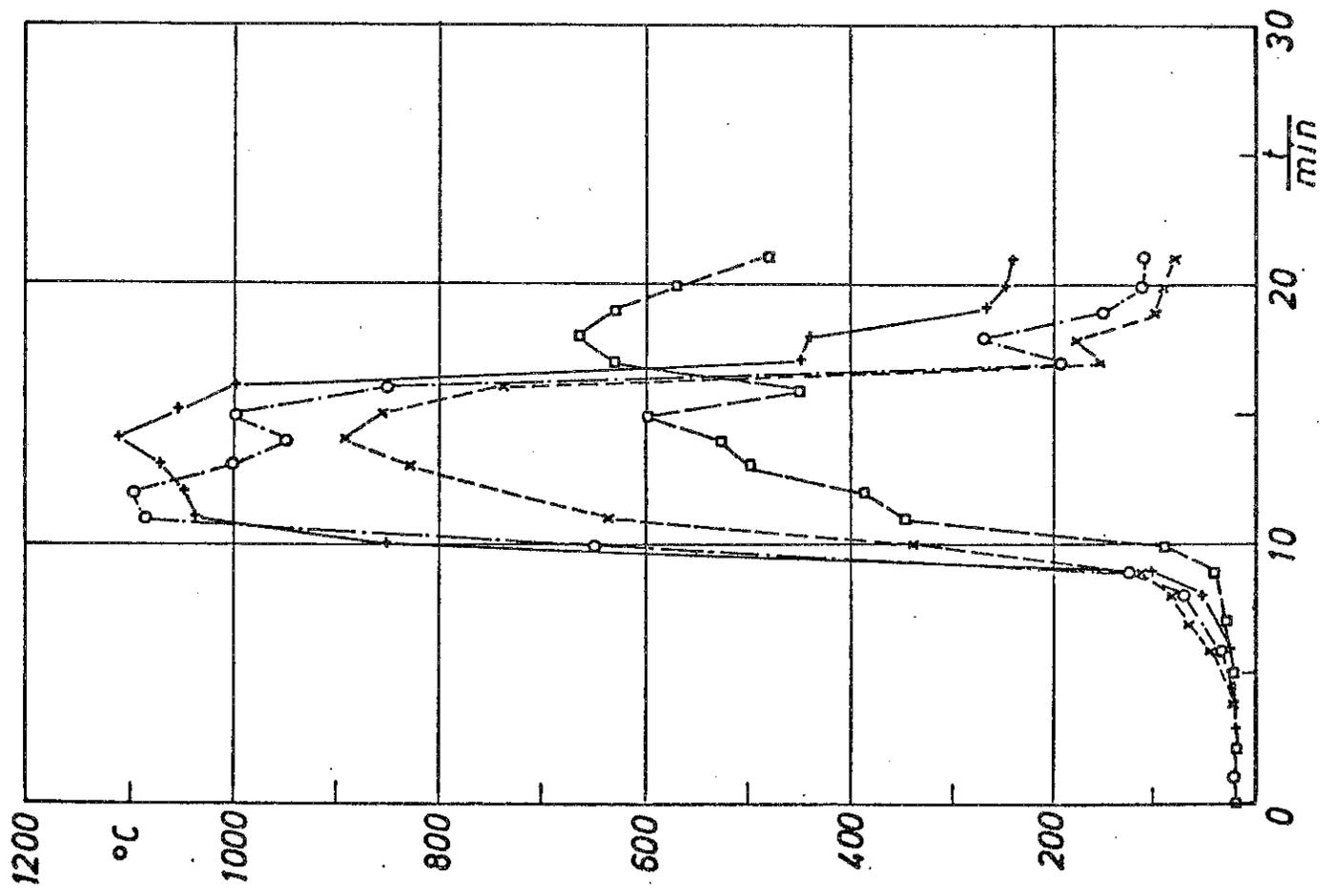
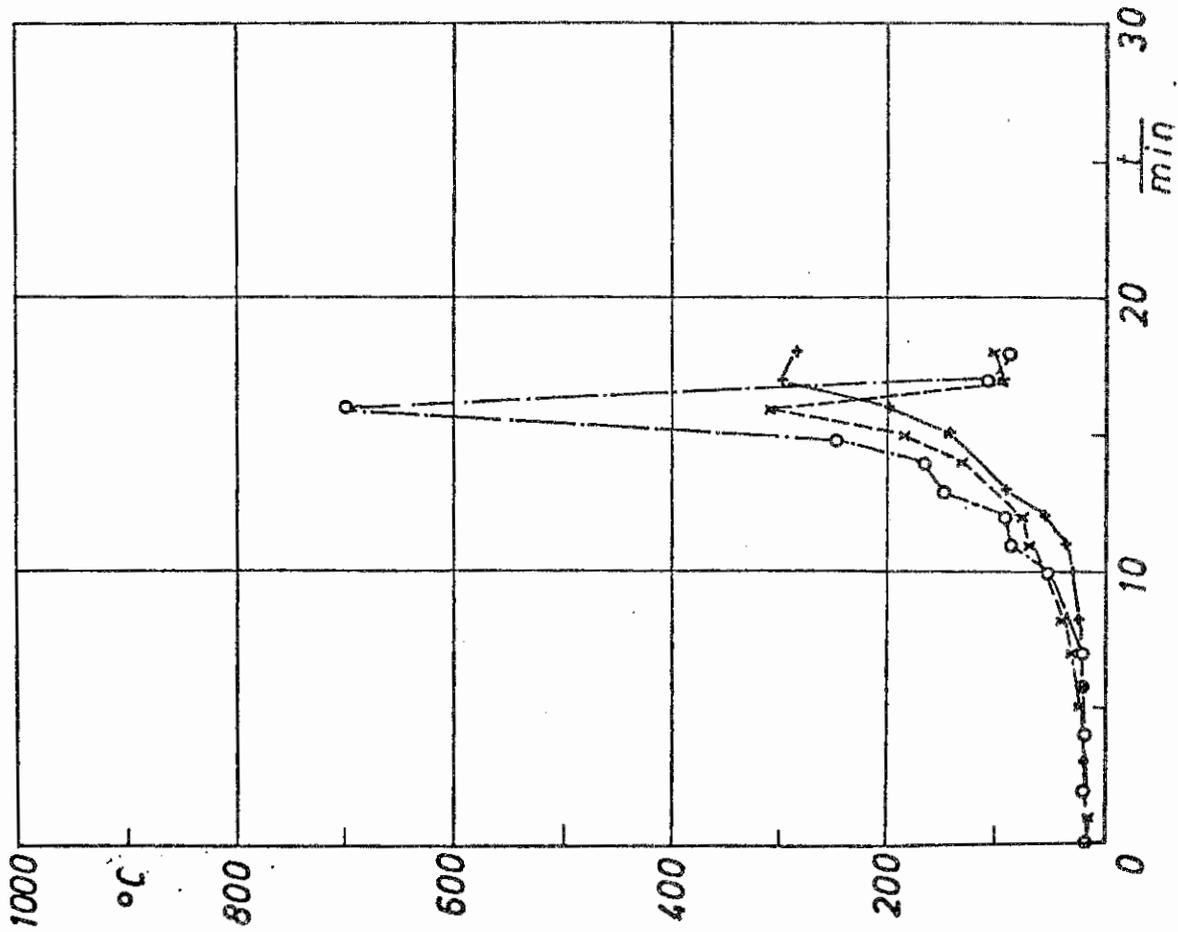


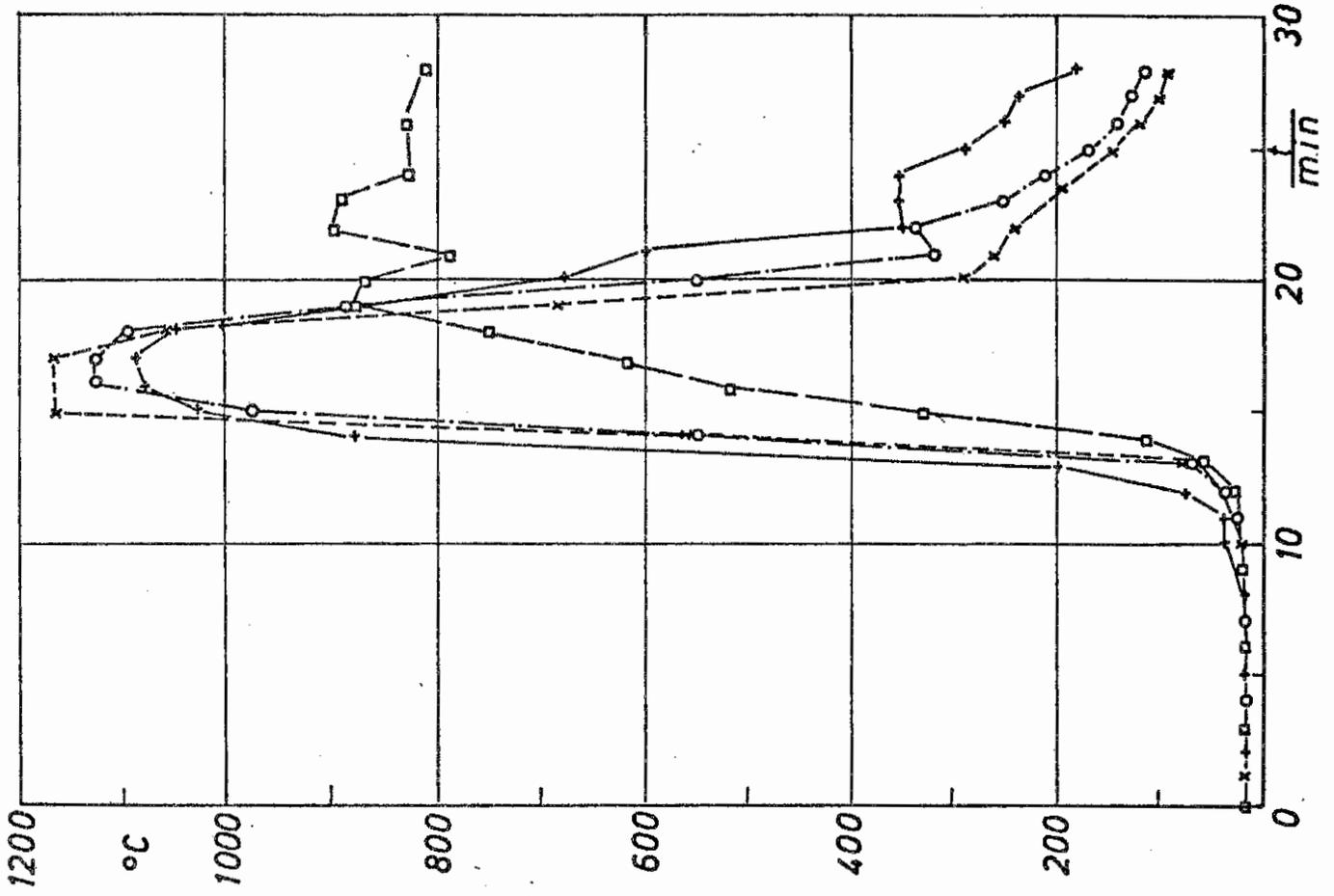
Bild 6-55

Versuch 22
T 9
T 10
T 11

Bild 6-56



o 76 — — — □ 78 — — —



Versuch 14 * 11 * 11 * 13
o 72 — — — □ 74 — — —

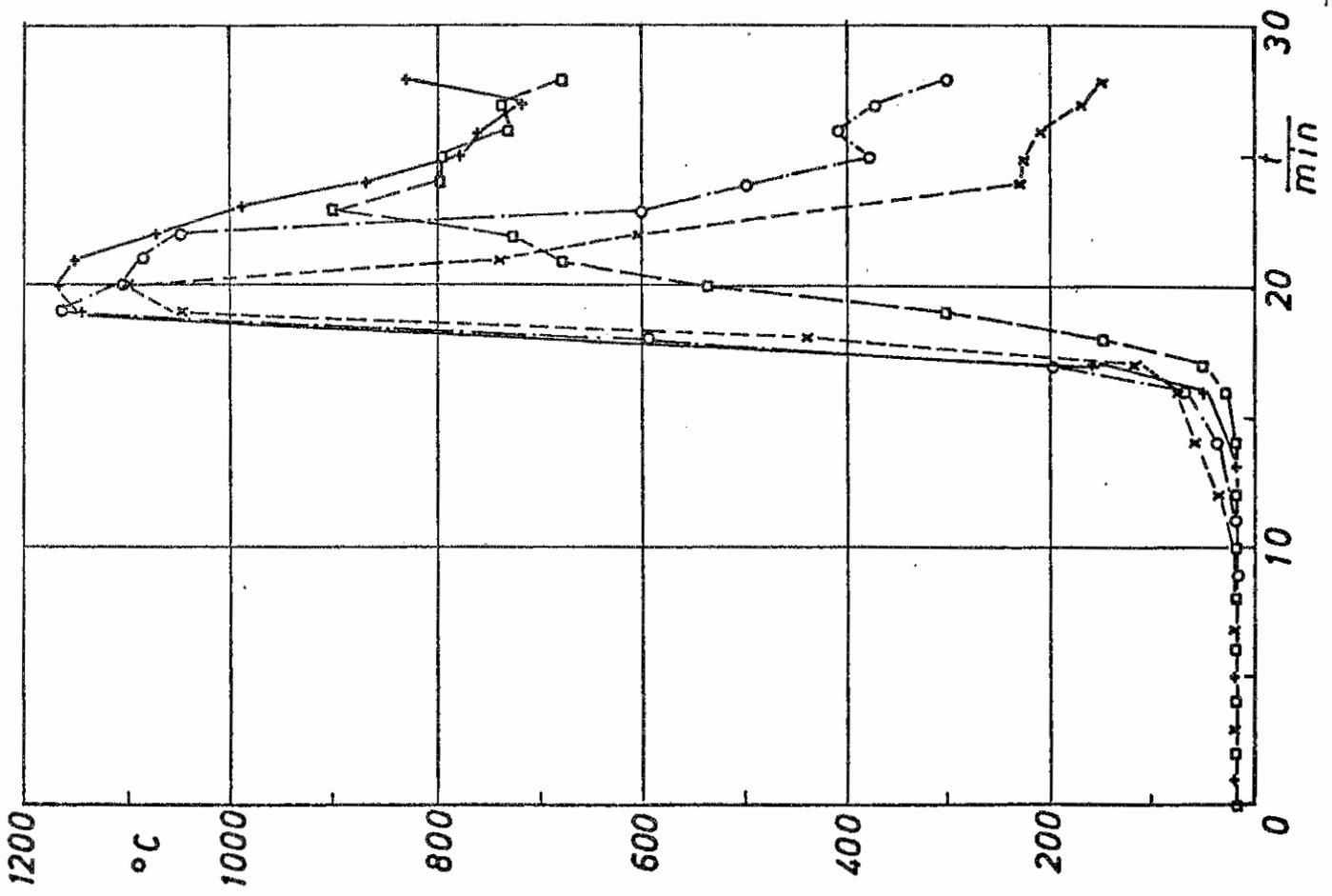


Bild 6-57

Versuch 14 * T 9 ---
o T 10 - - -
+ T 11 —

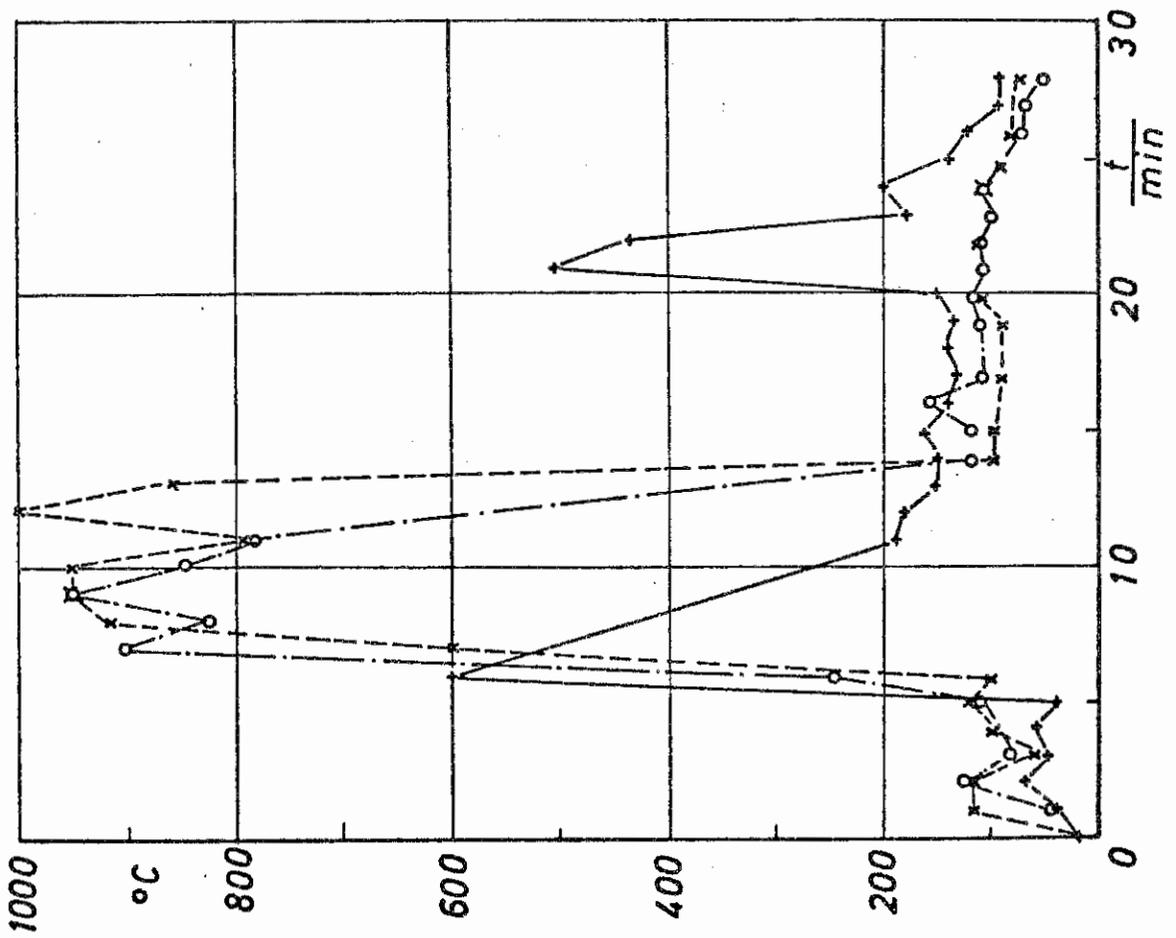


Bild 6-58

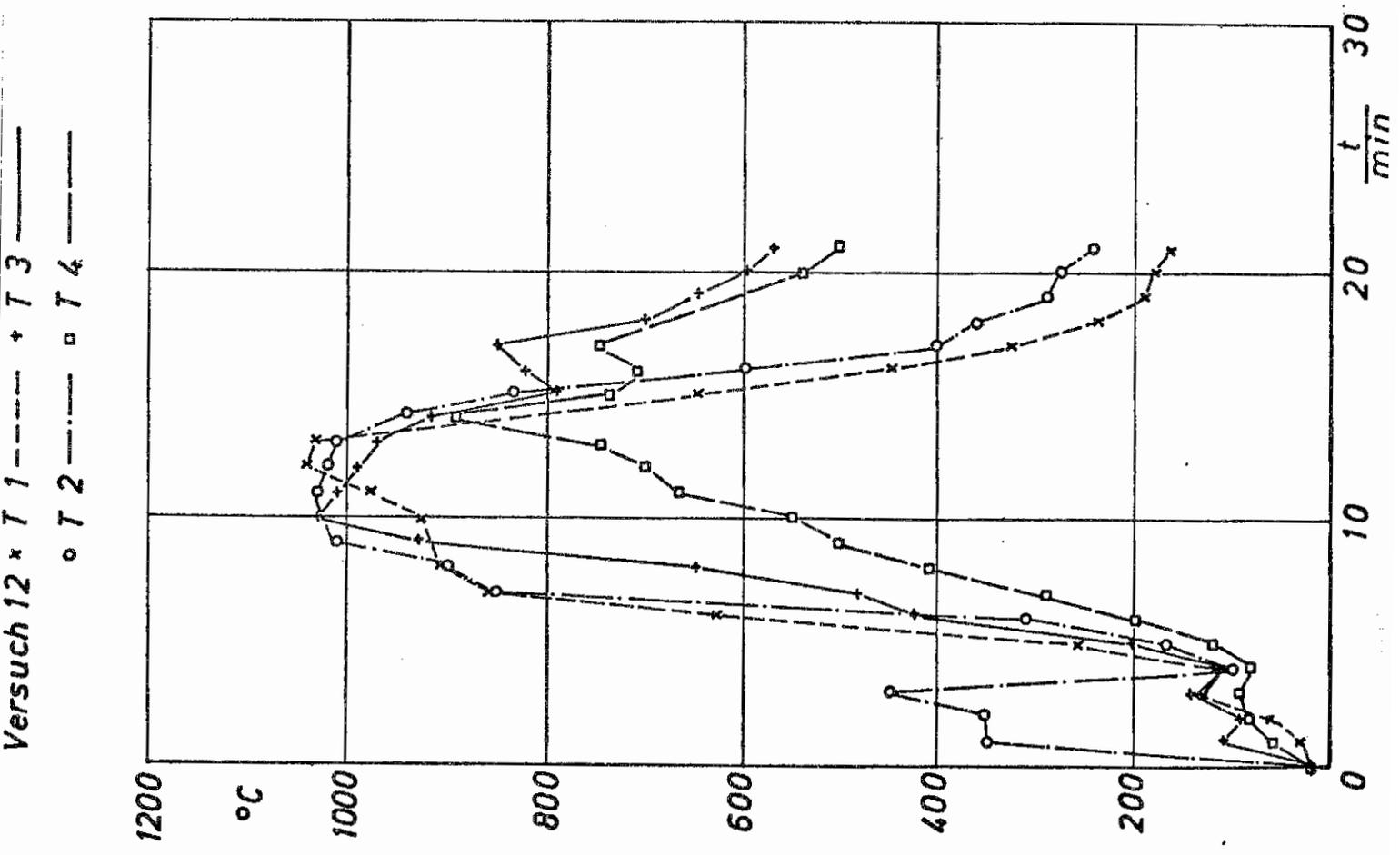
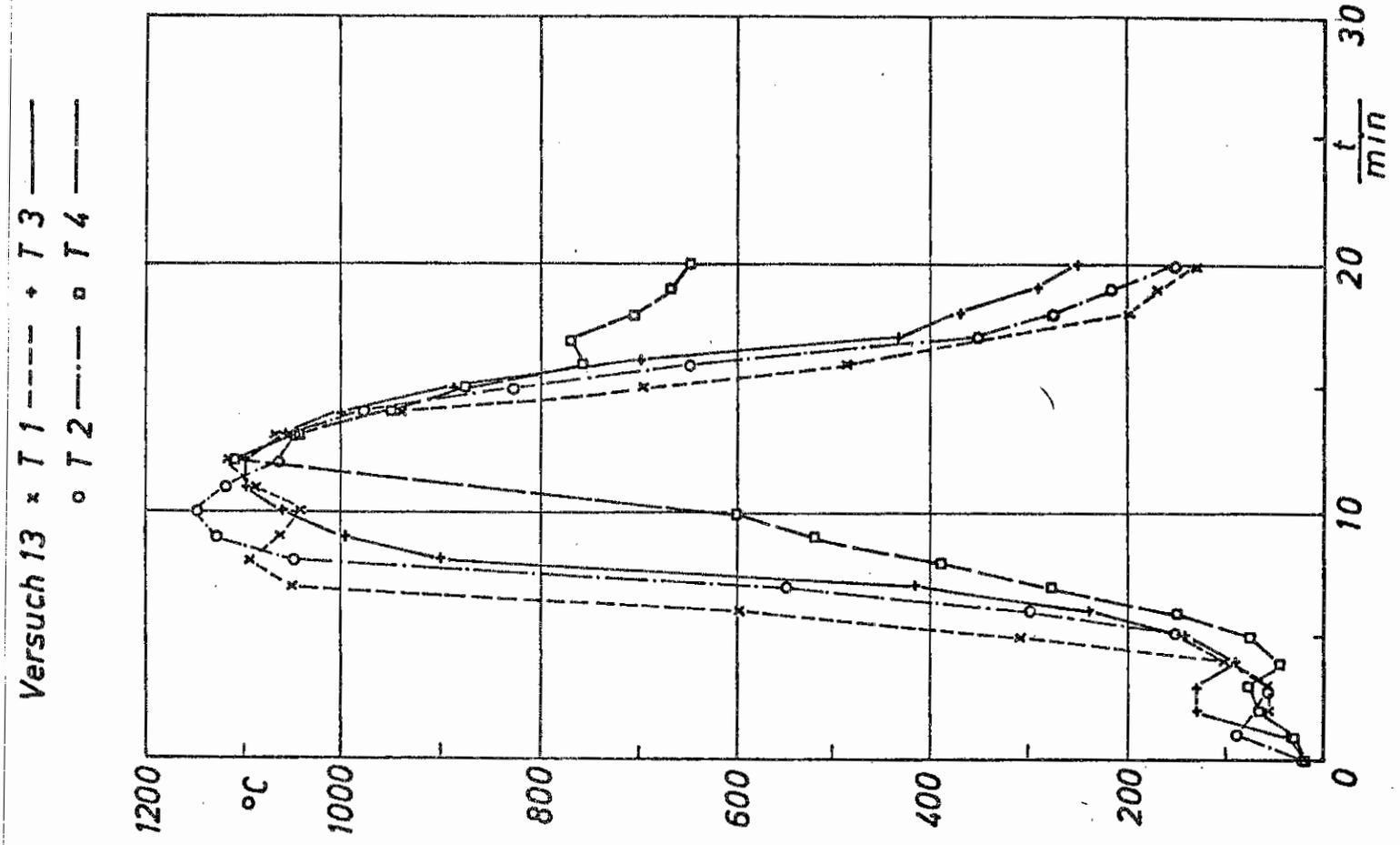
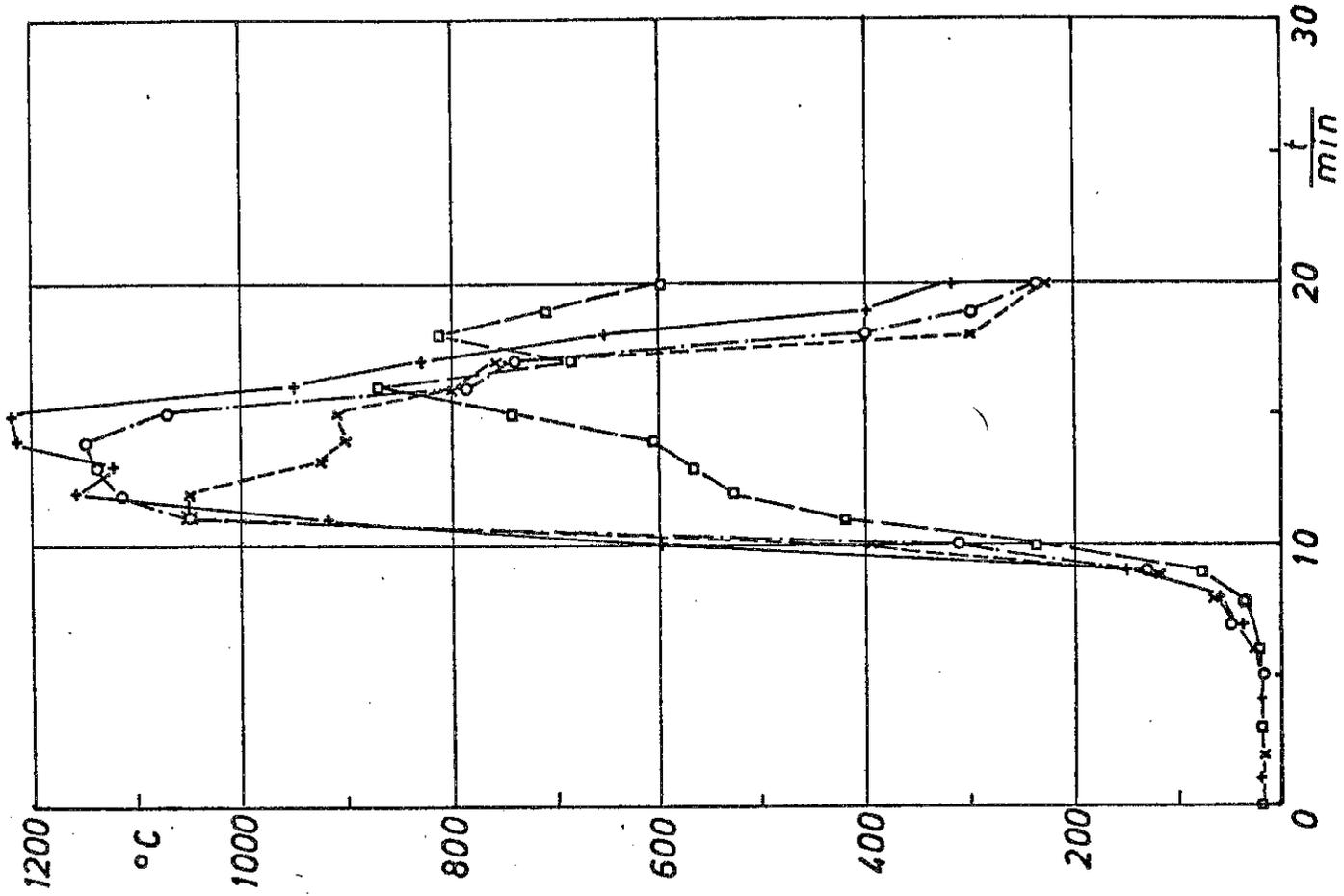


Bild 6-59

Versuch 13 * T 5 ---+ T 7 ---
o T 6 ---□ T 8 ---



Versuch 12 * T 5 ---+ T 7 ---
o T 6 ---□ T 8 ---

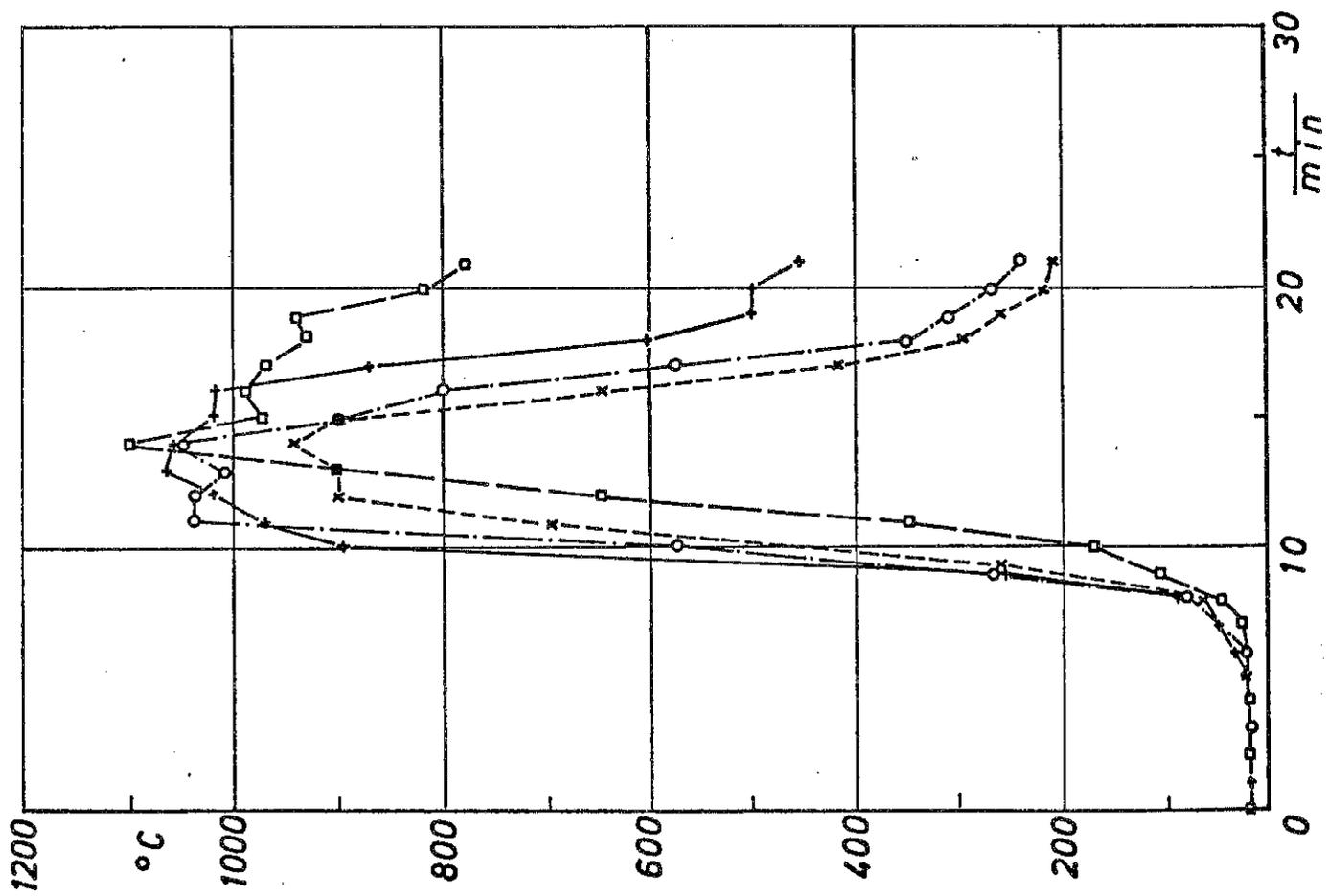
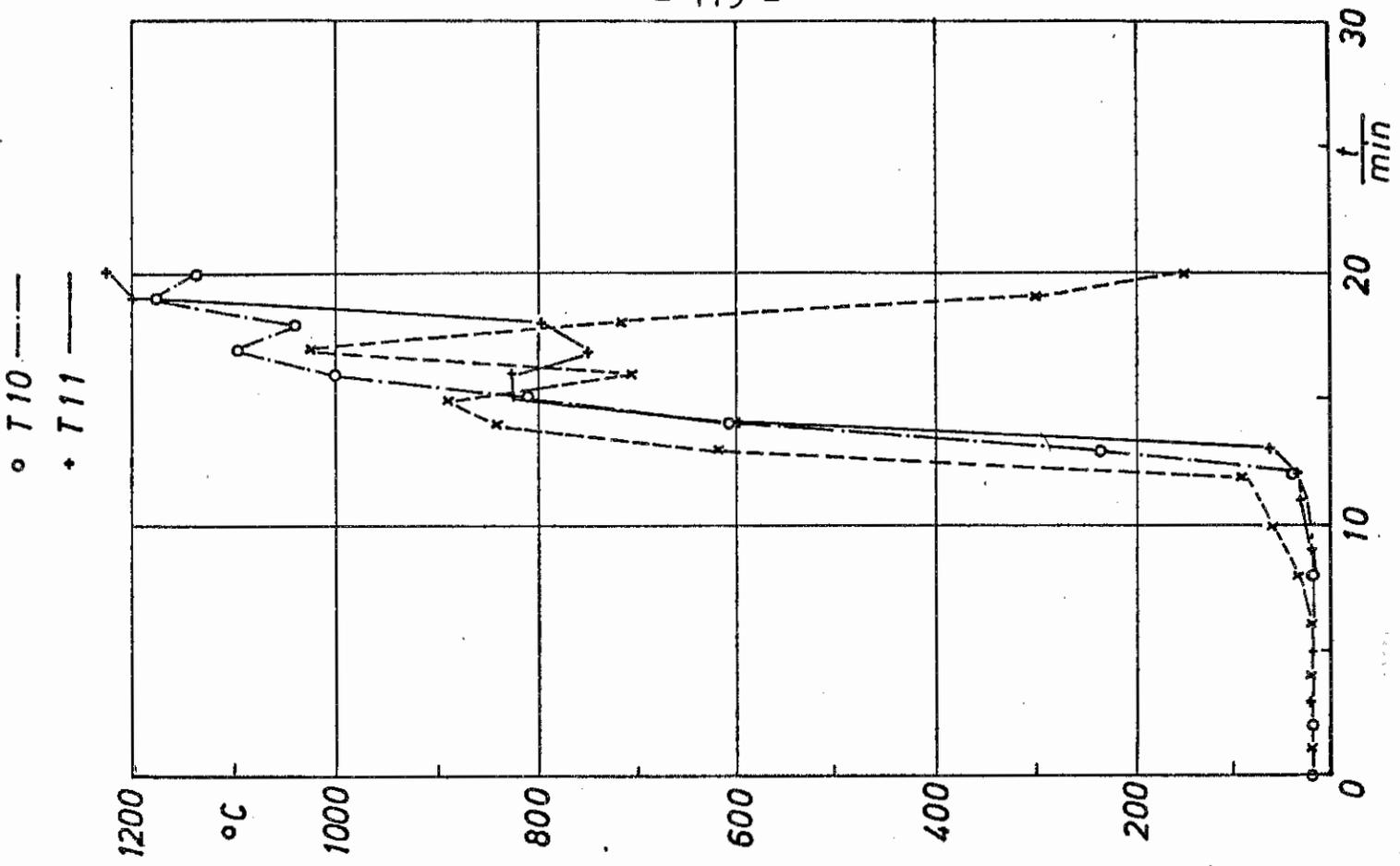


Bild 6-60



Versuch 12 * T 9 ---
○ T10 —
+ T11 —

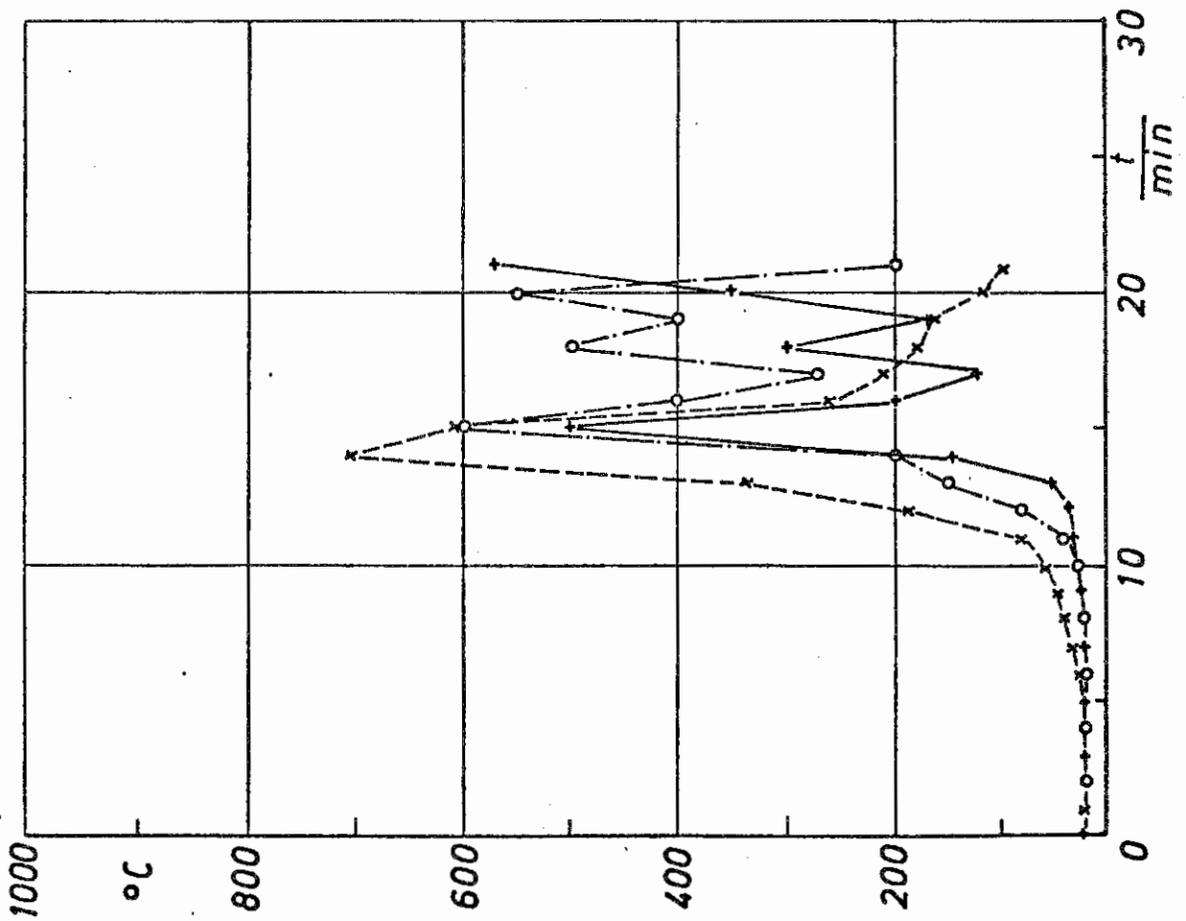


Bild 6-61

Versuch 30 * T 1 ----- + T 3 -----
o T 2 ----- □ T 4 -----

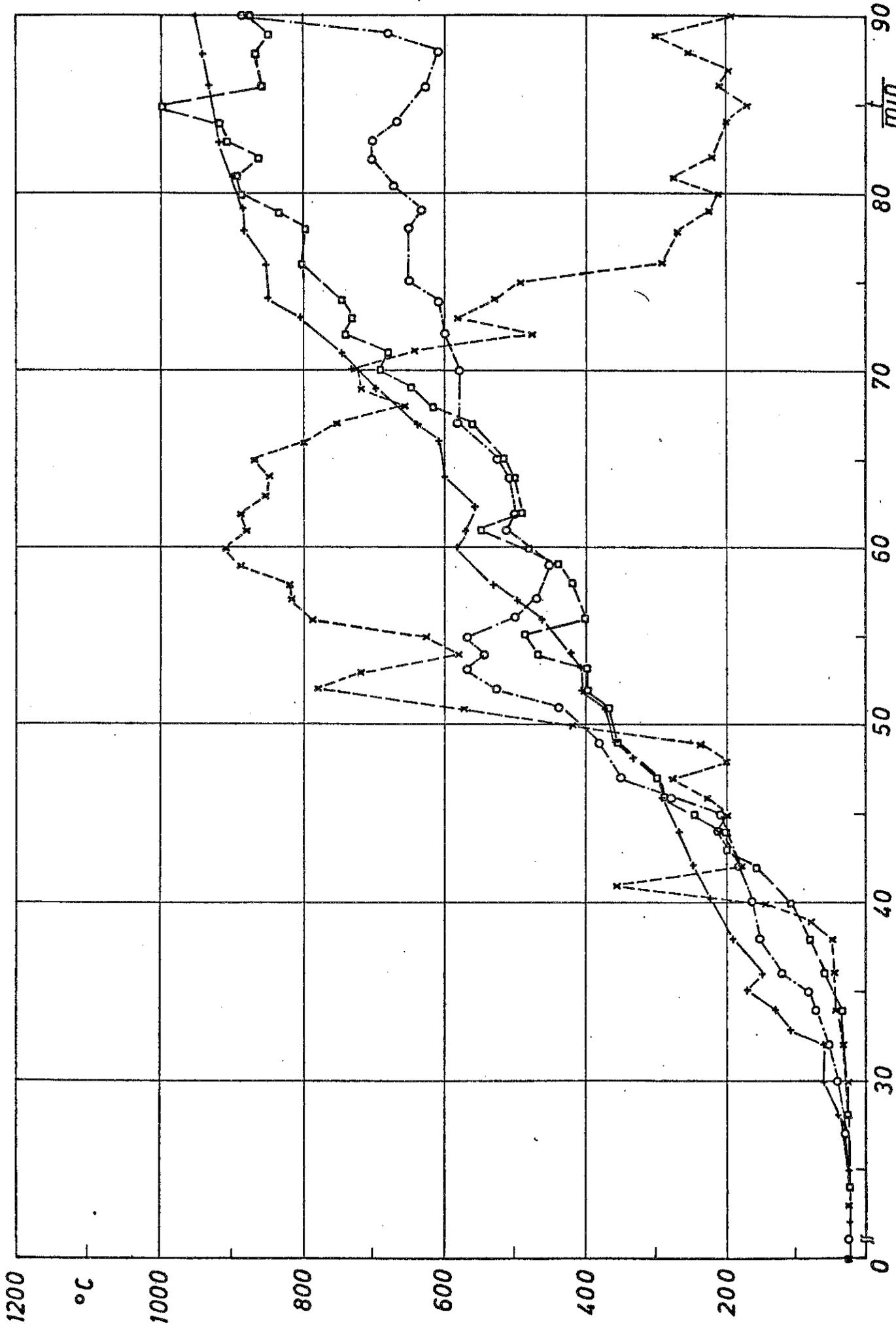


Bild 6-62

Versuch 31
* T 1
o T 2
□ T 3
x T 4

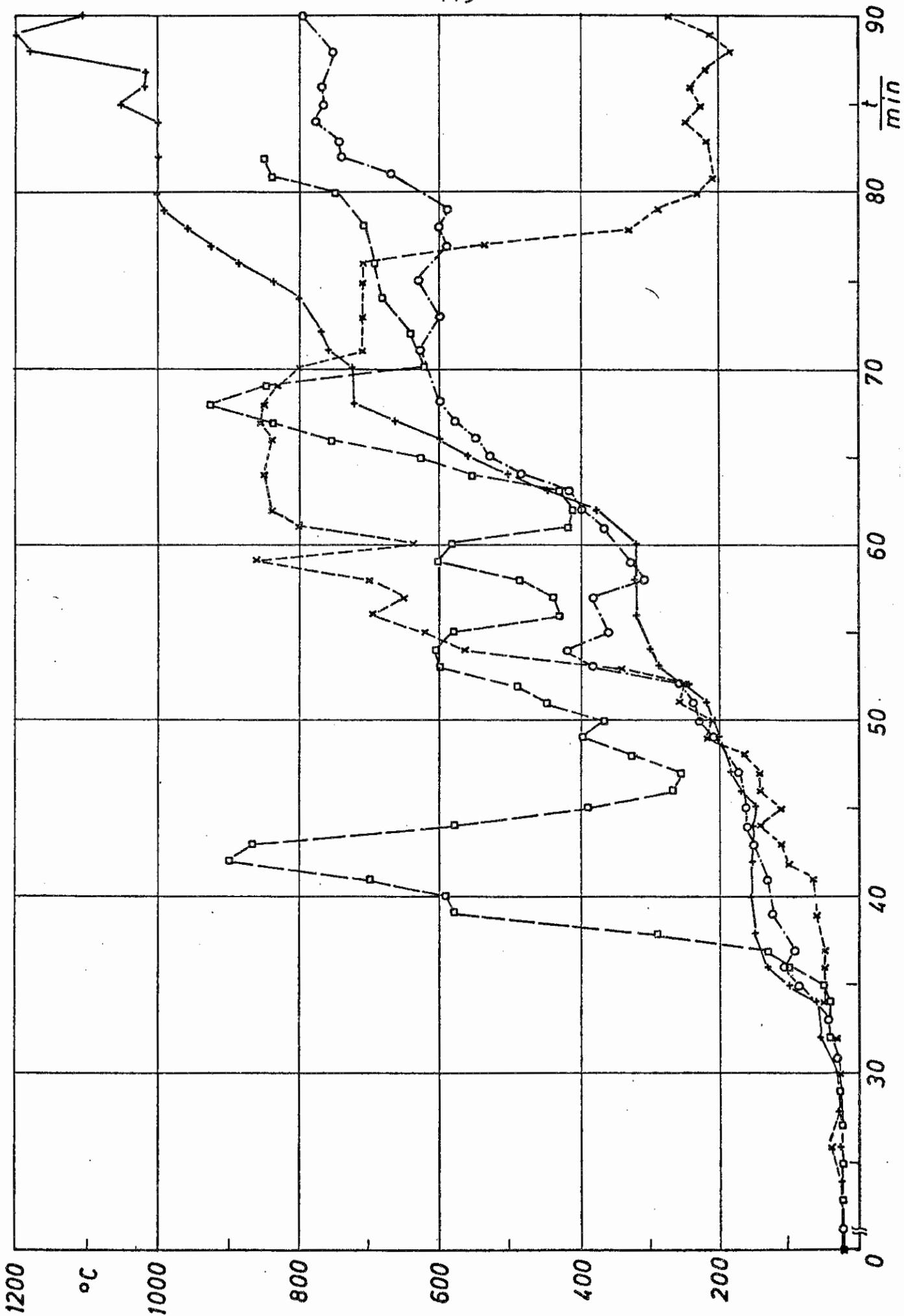


Bild 6-63

versuch 30
076
078

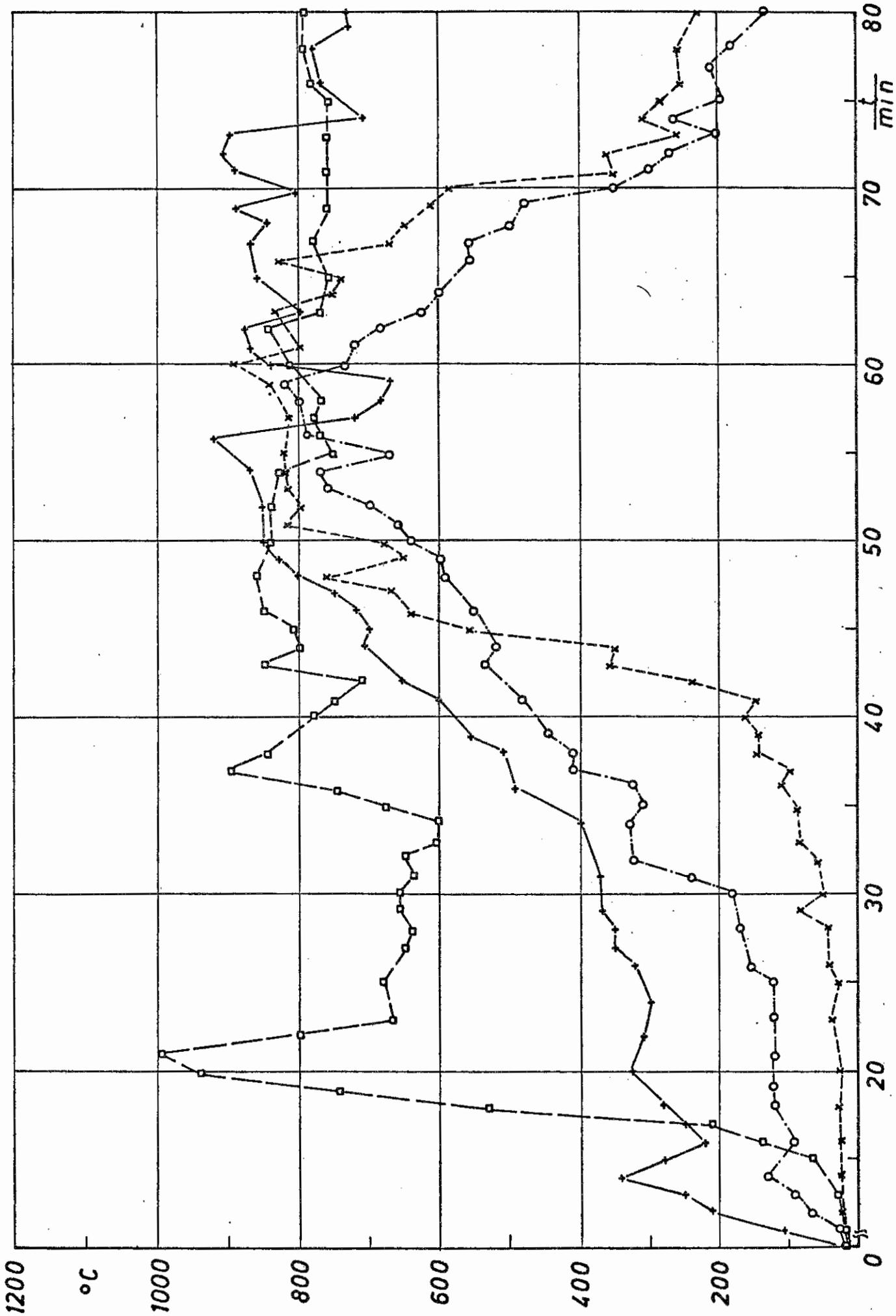


Bild 6-64

versuch 31 x 1 5 ----- x 1 7 -----
o 7 6 ----- o 7 8 -----

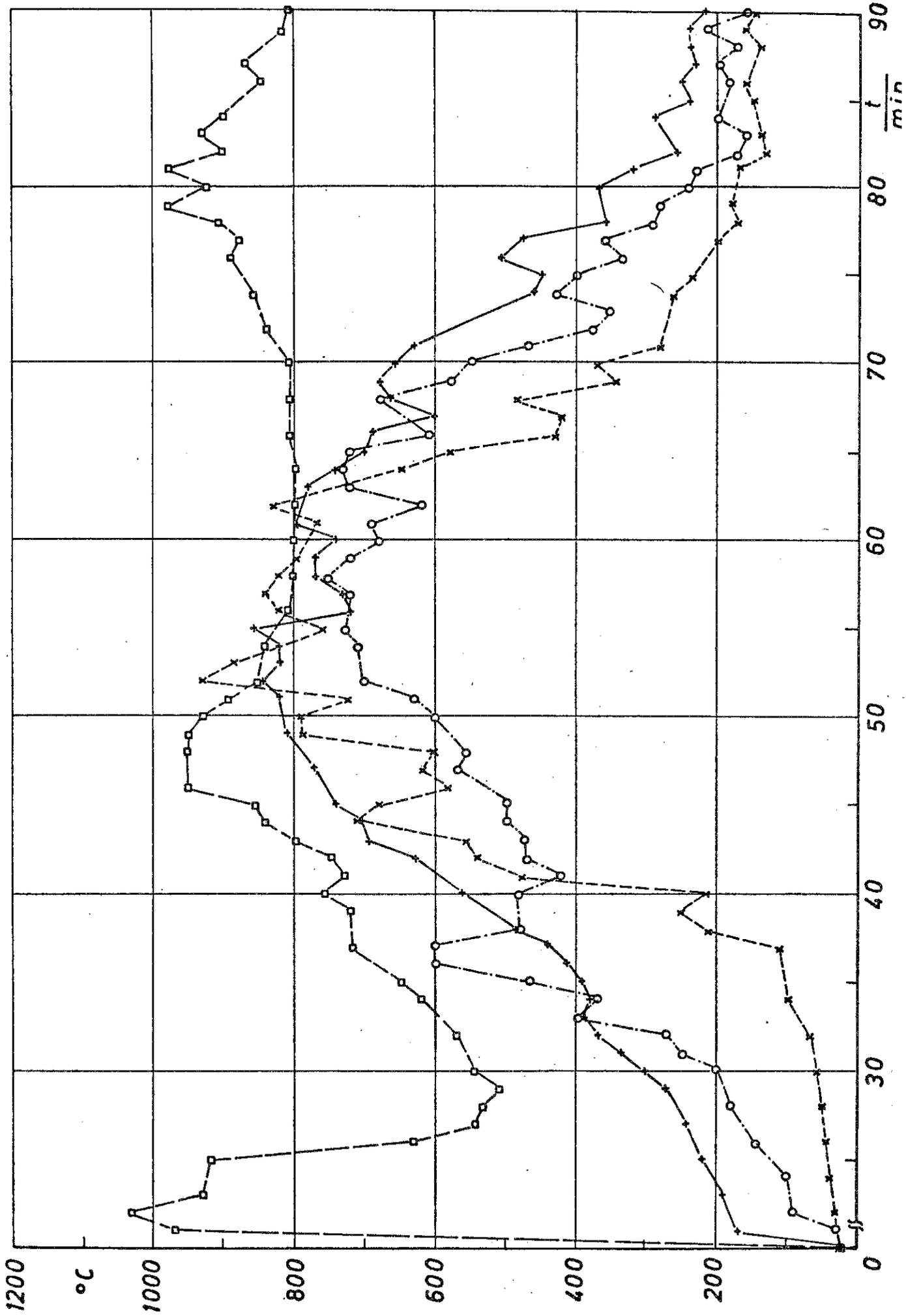


Bild 6-65

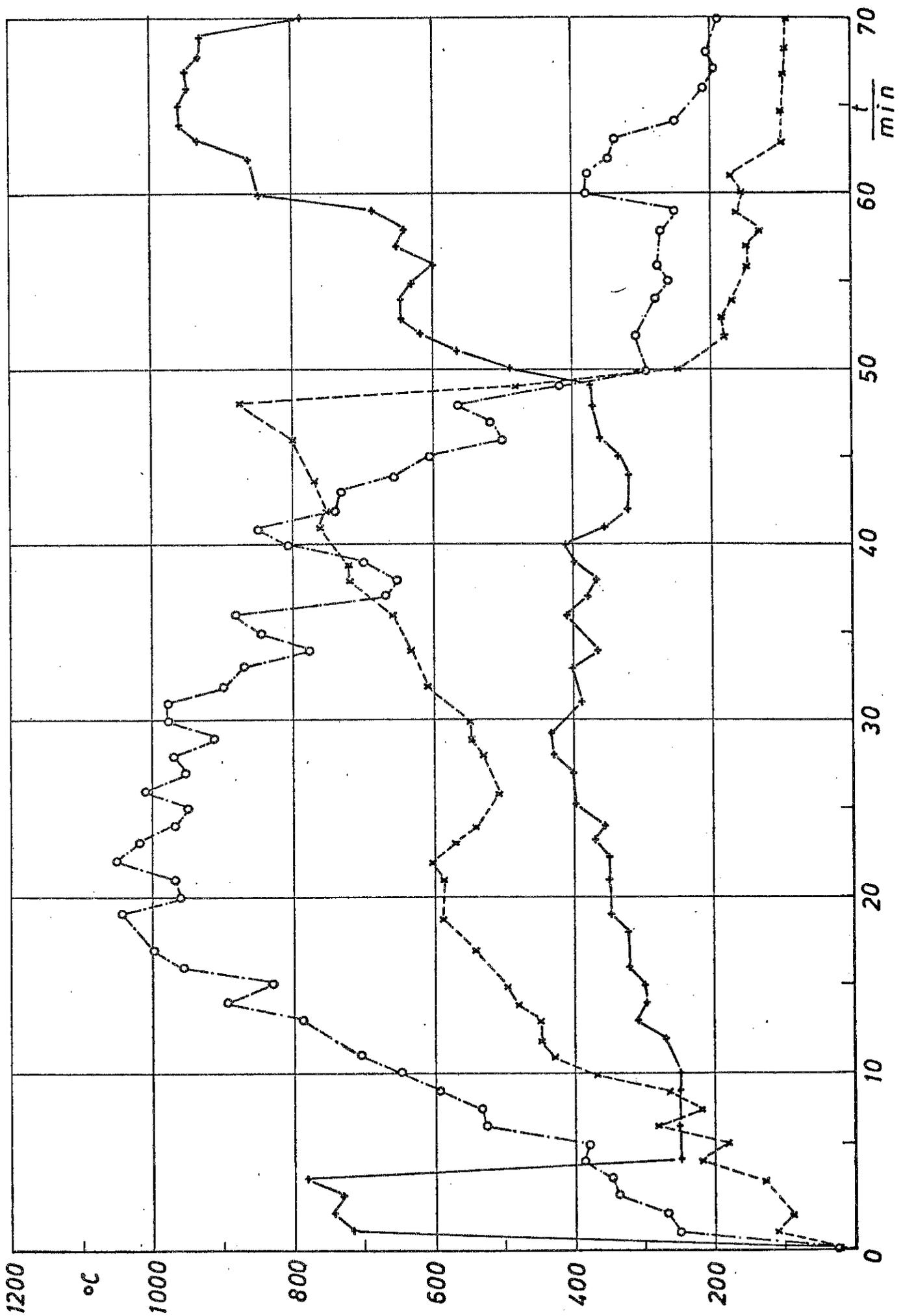


Bild 6-66

Versuch 31 * T 9 -----
o T 10 -----
• T 11 -----

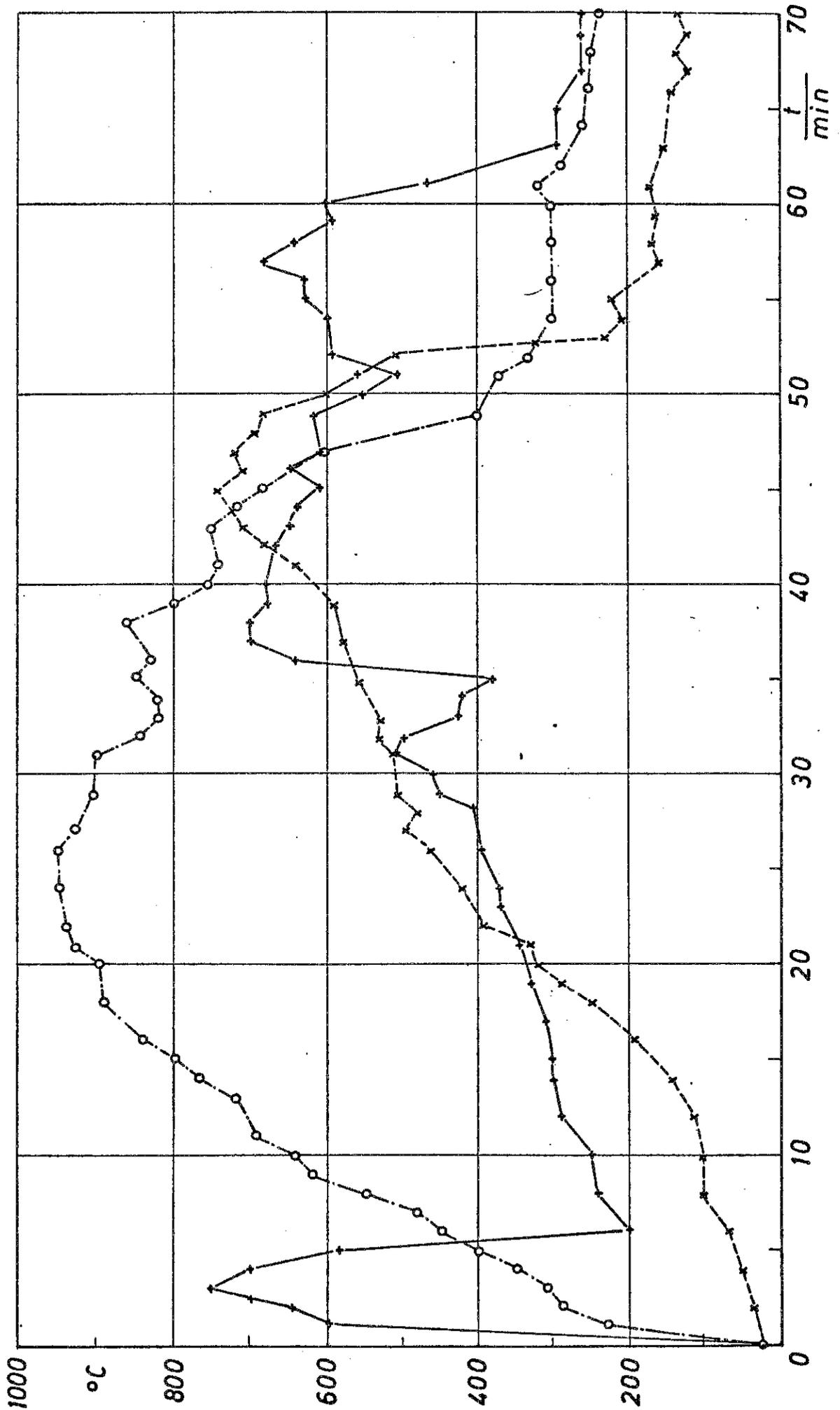


Bild 6-67

o T 2 --- □ T 4 ---

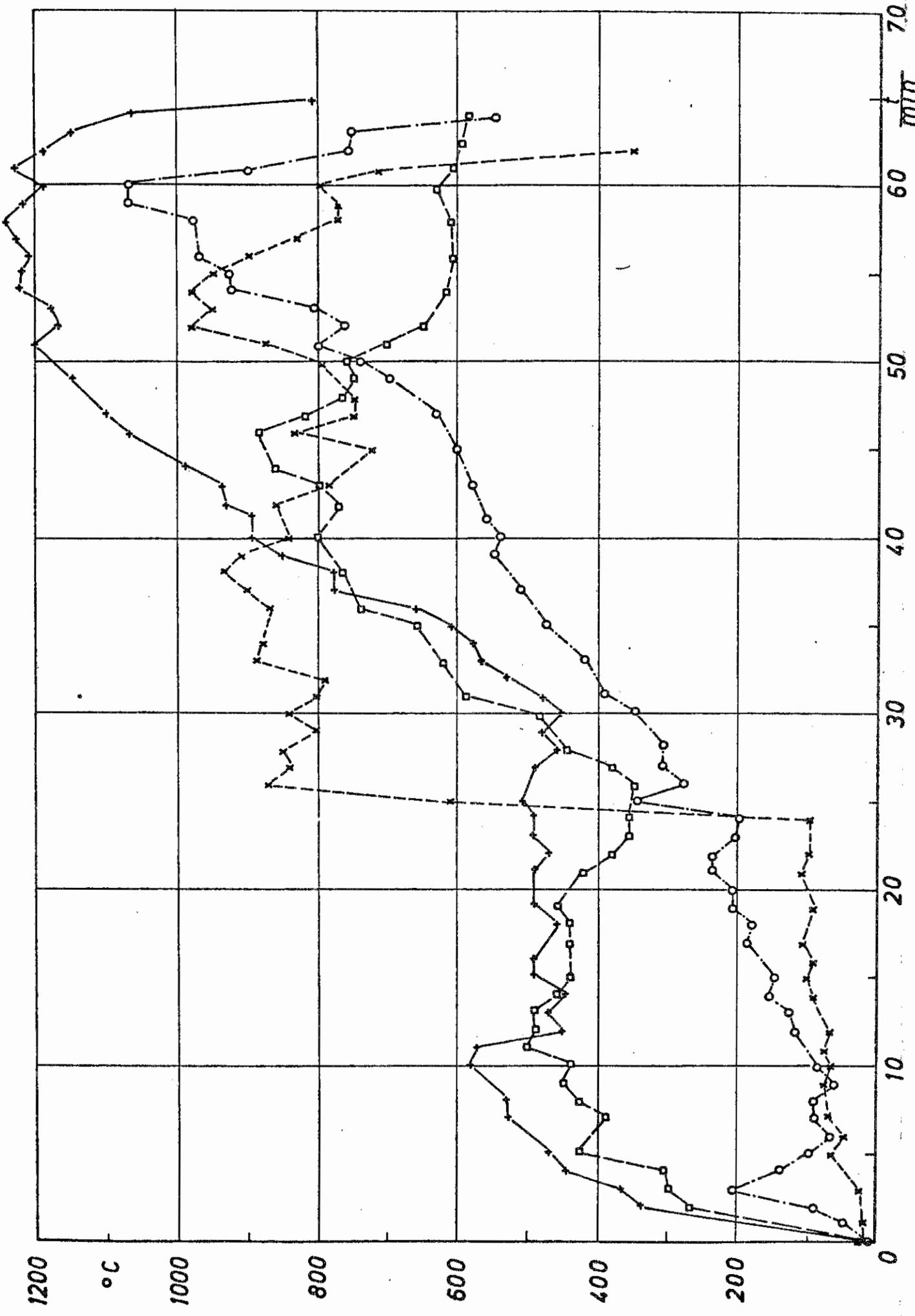


Bild 6-68

versuch 35
x / / - - - - - + T 3
o T 2 - - - - - □ T 4

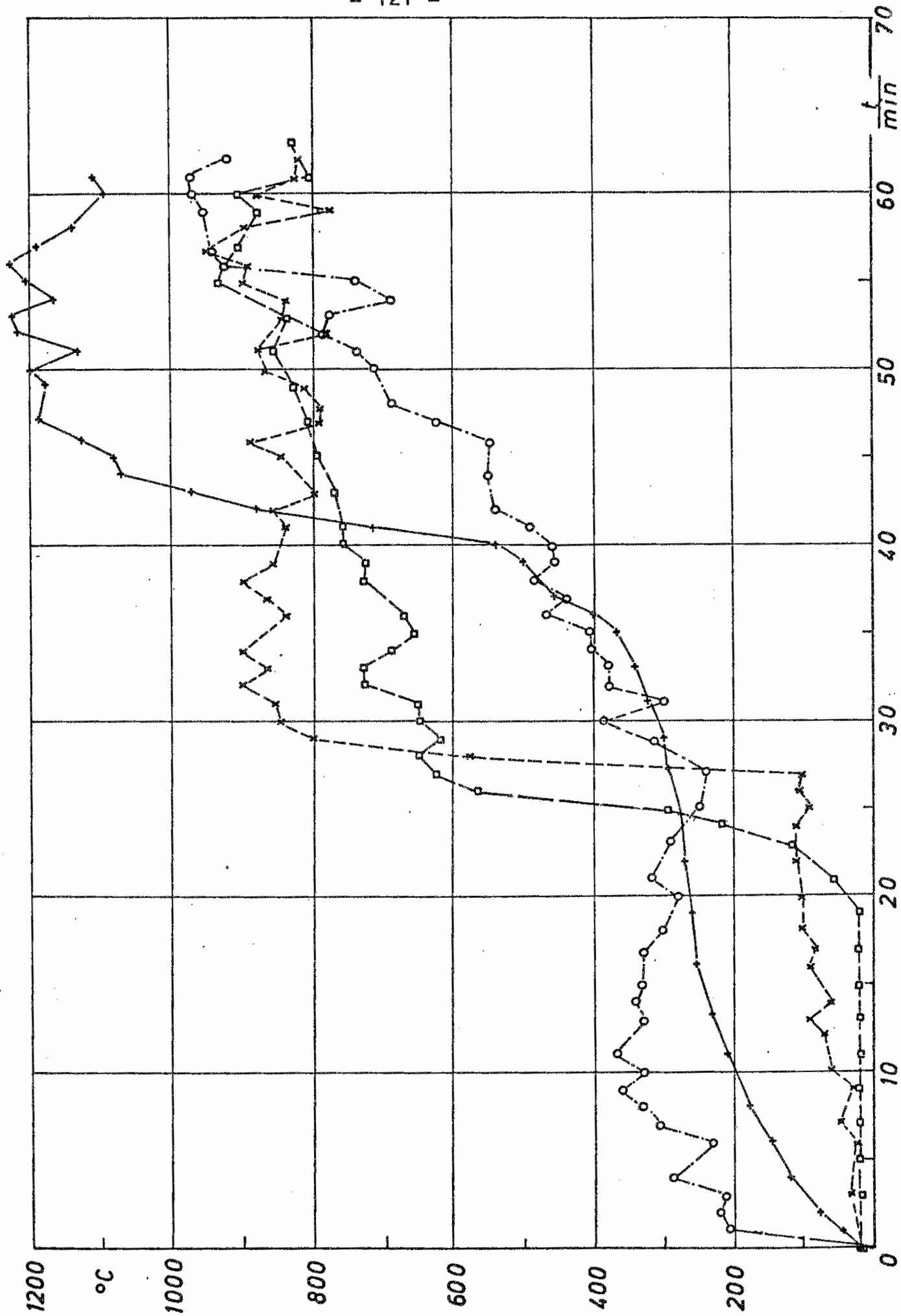


Bild 6-69

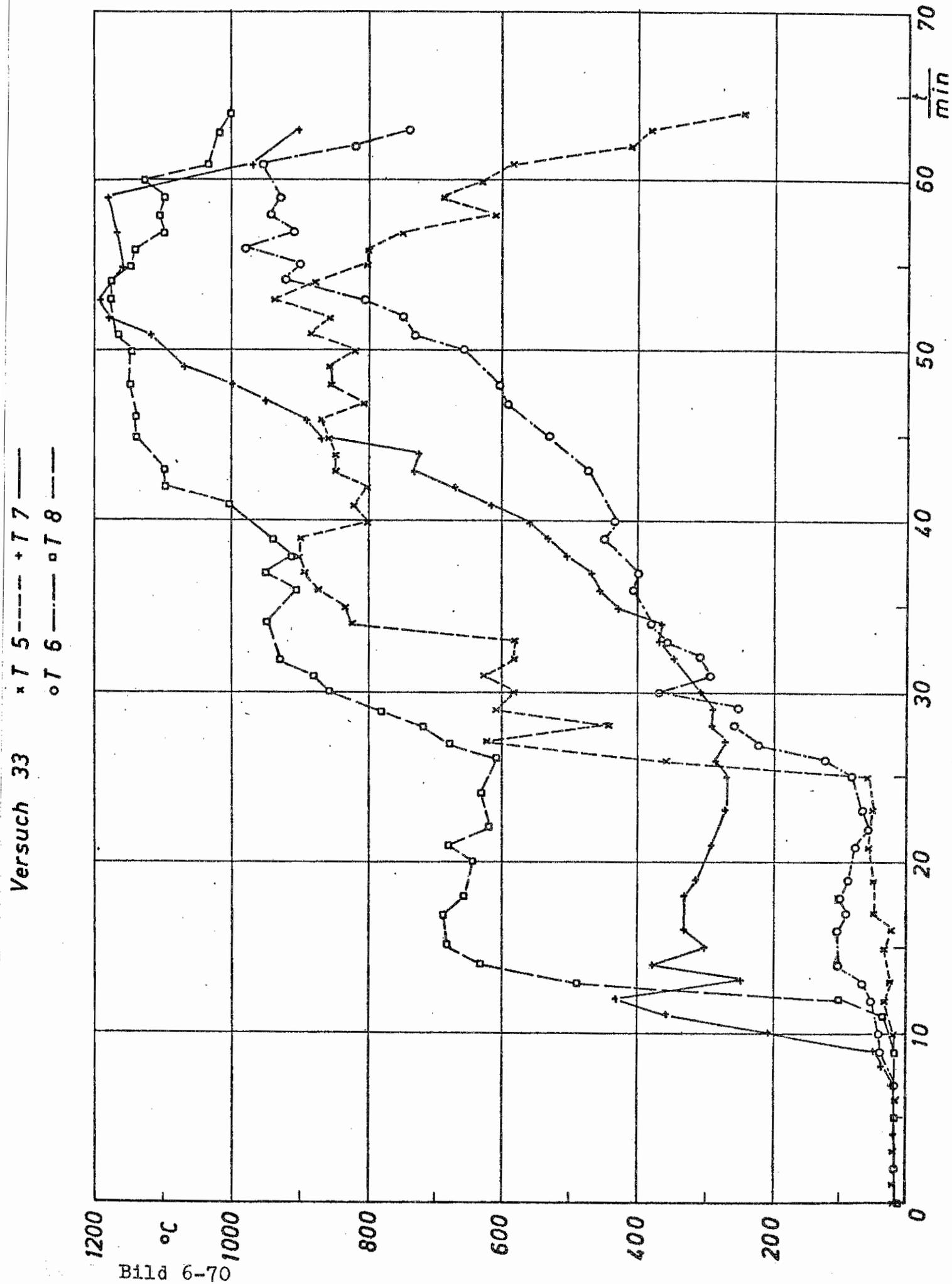


Bild 6-70

Versuch 35 * T 5 --- + T 7 ---
o T 6 --- □ T 8 ---

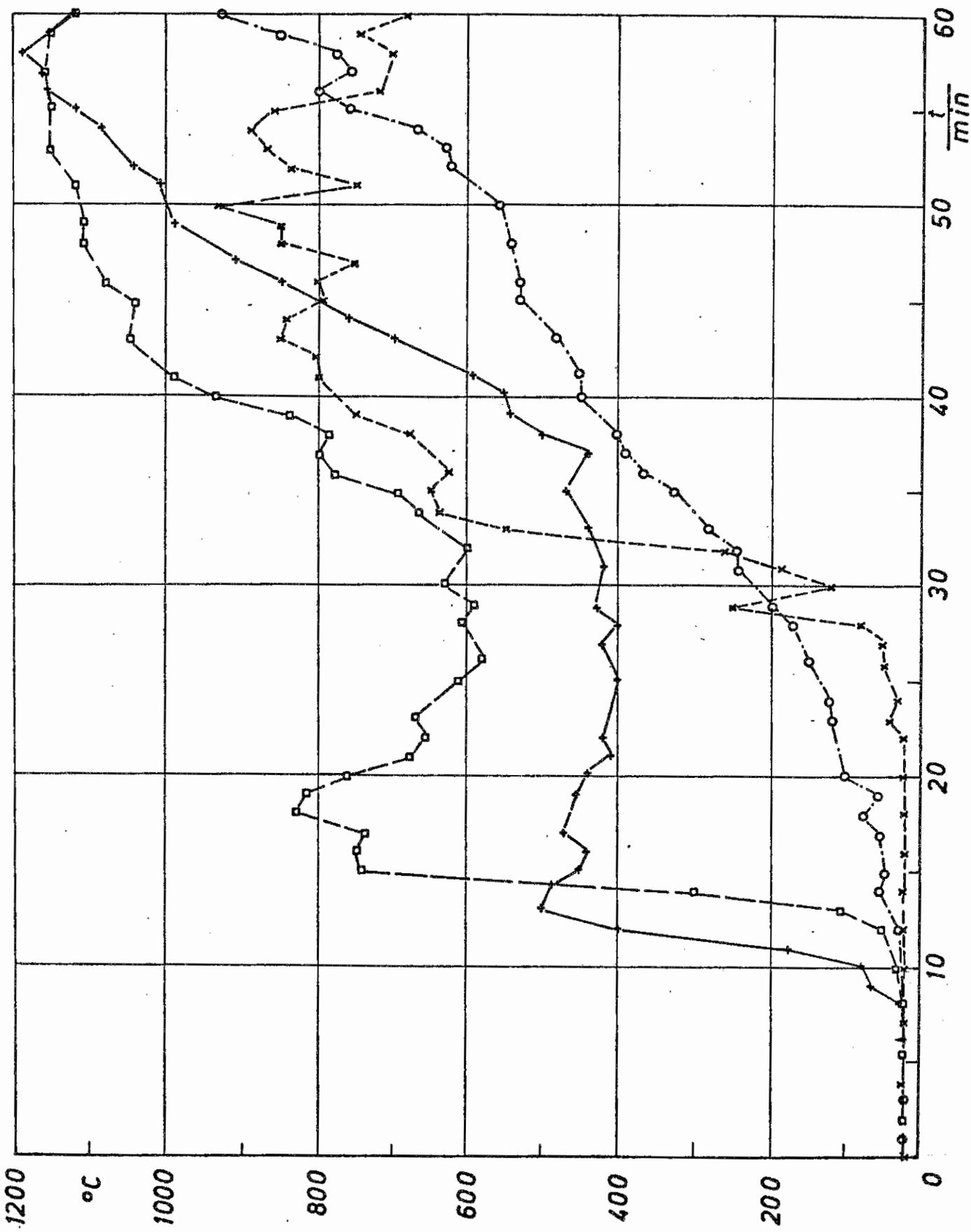
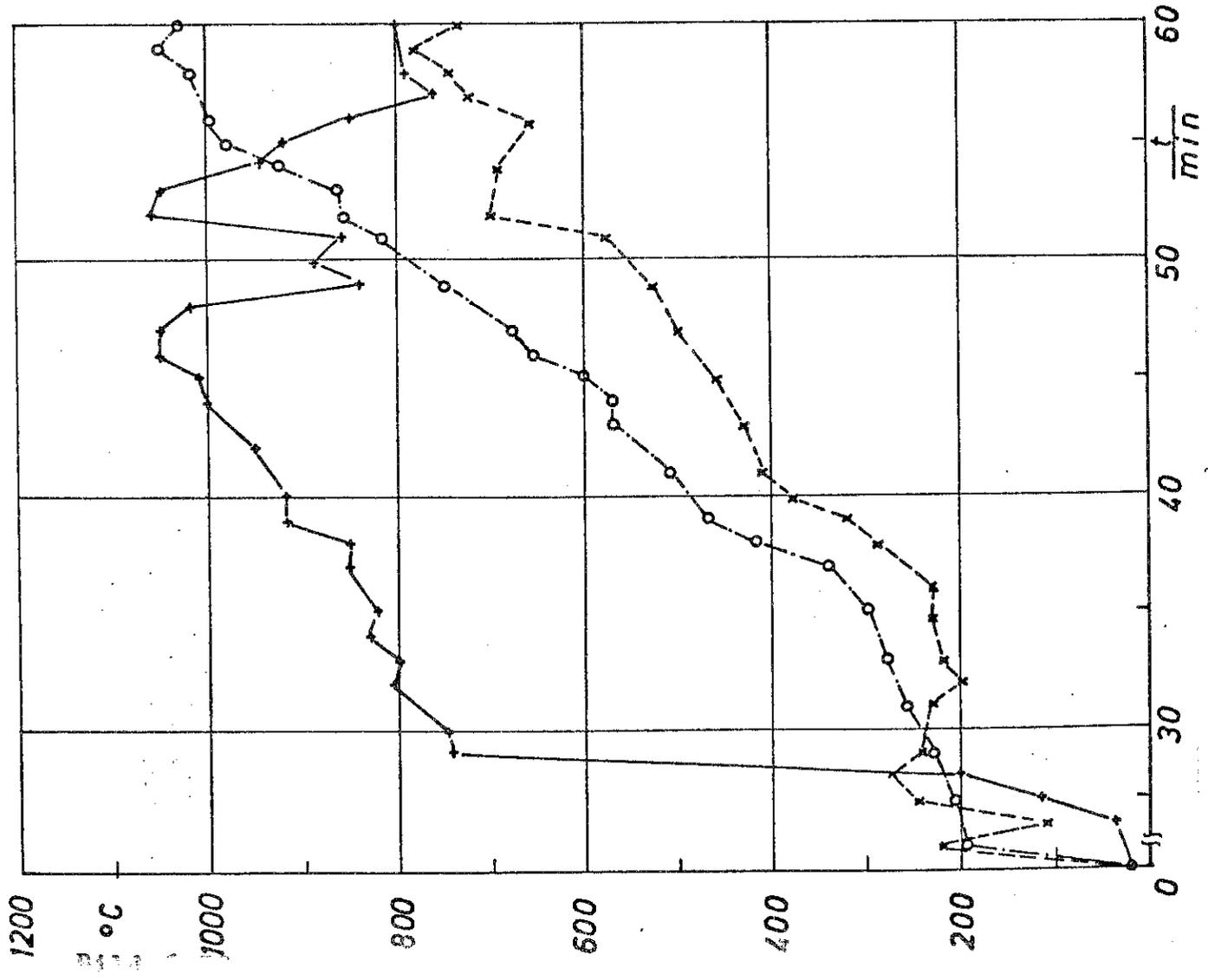


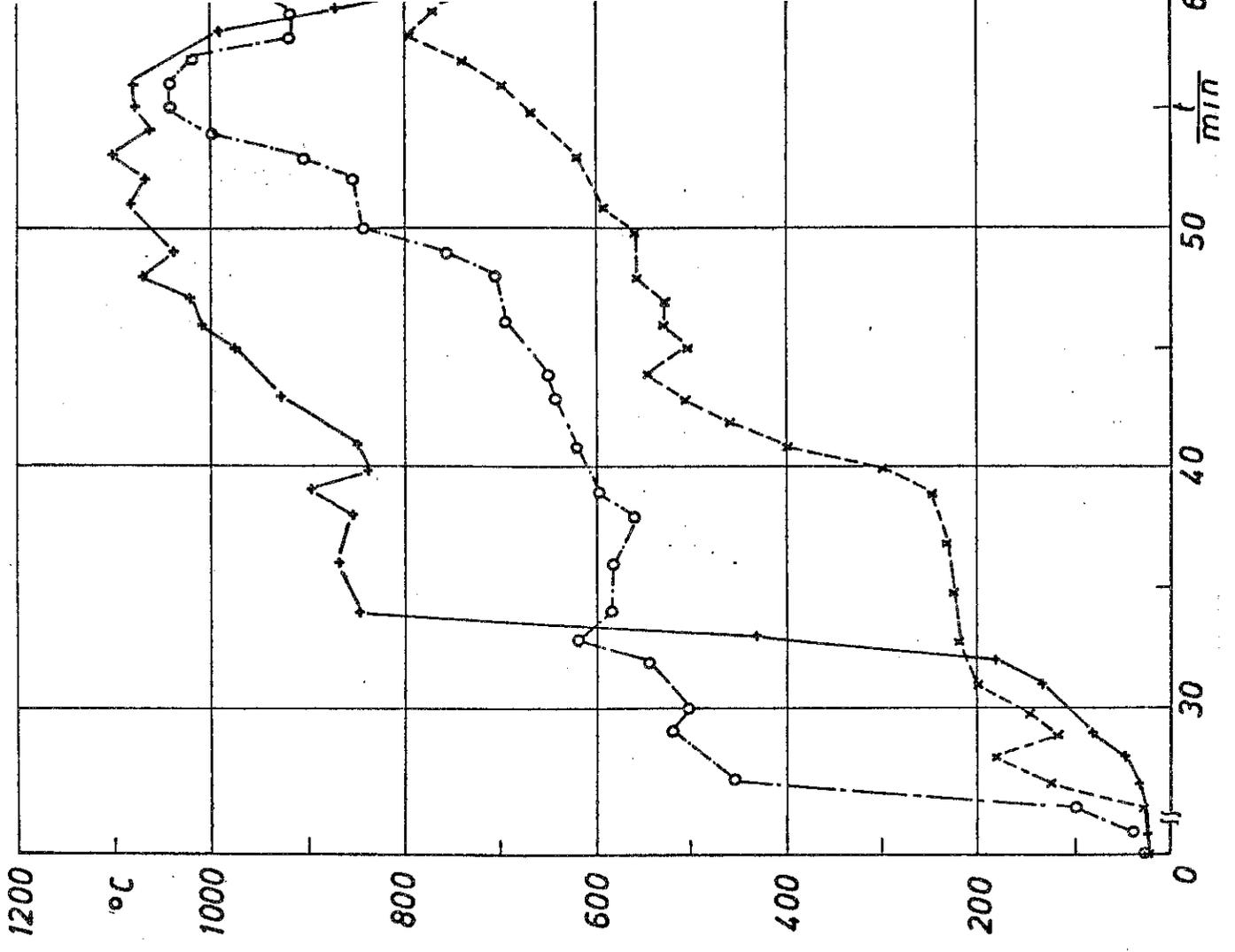
Bild 6-71

versuch 33

○ T10
+ T11



○ T10
+ T11



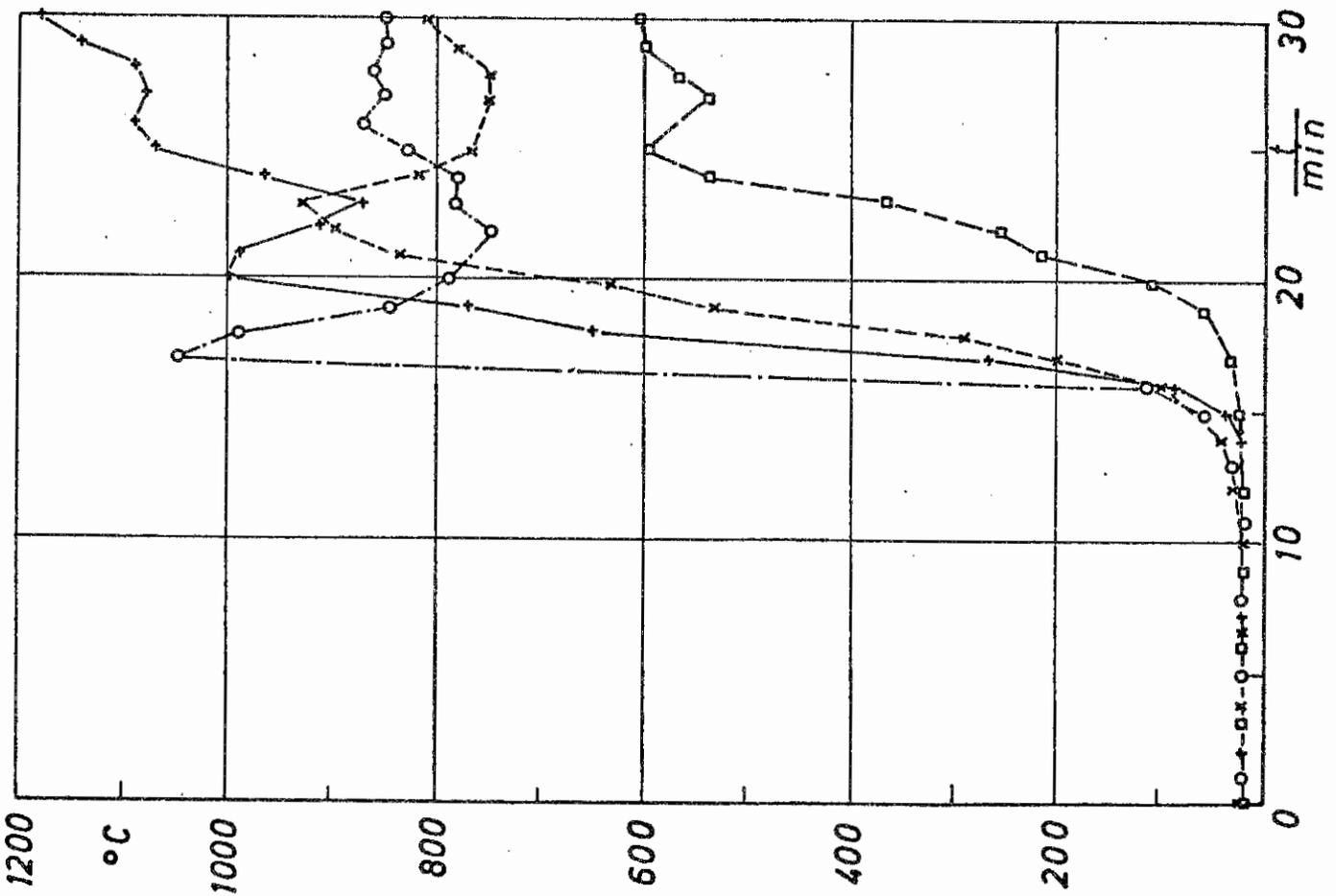
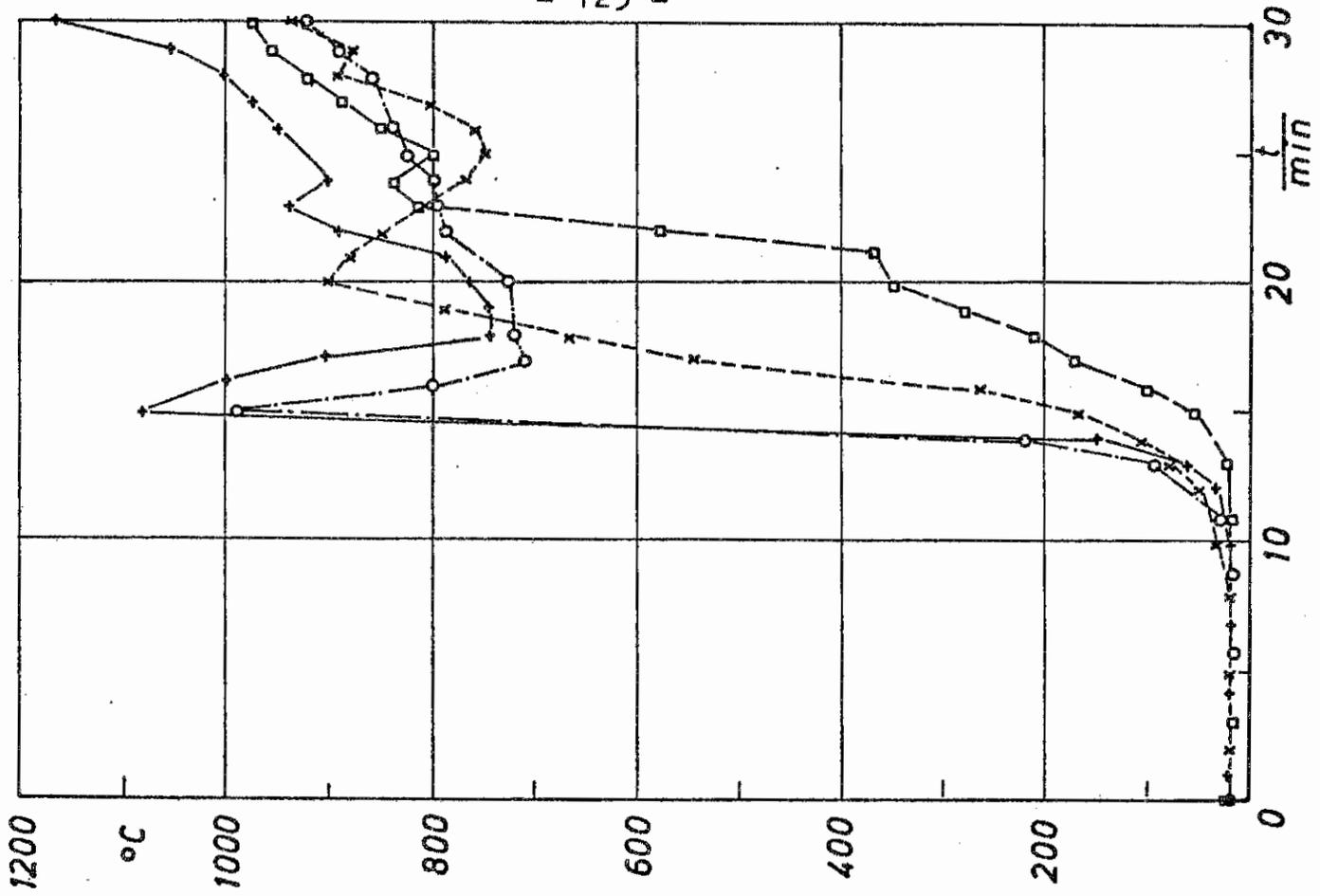
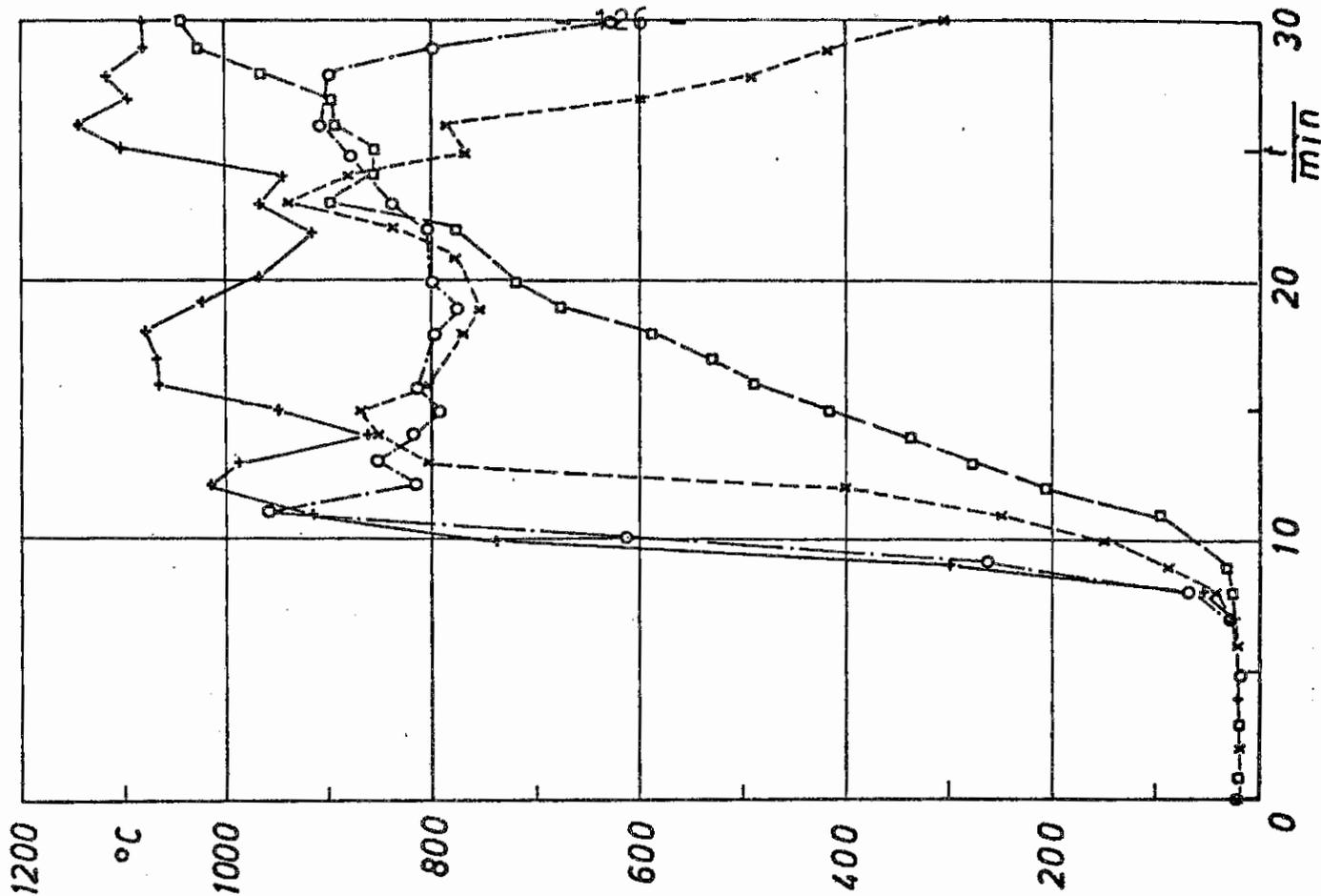


Bild 6-73

Versuch 29 x T 5 --- + T 7 —
 o T 6 — □ T 8 —



Versuch 28 x T 5 --- + T 7 —
 o T 6 — □ T 8 —

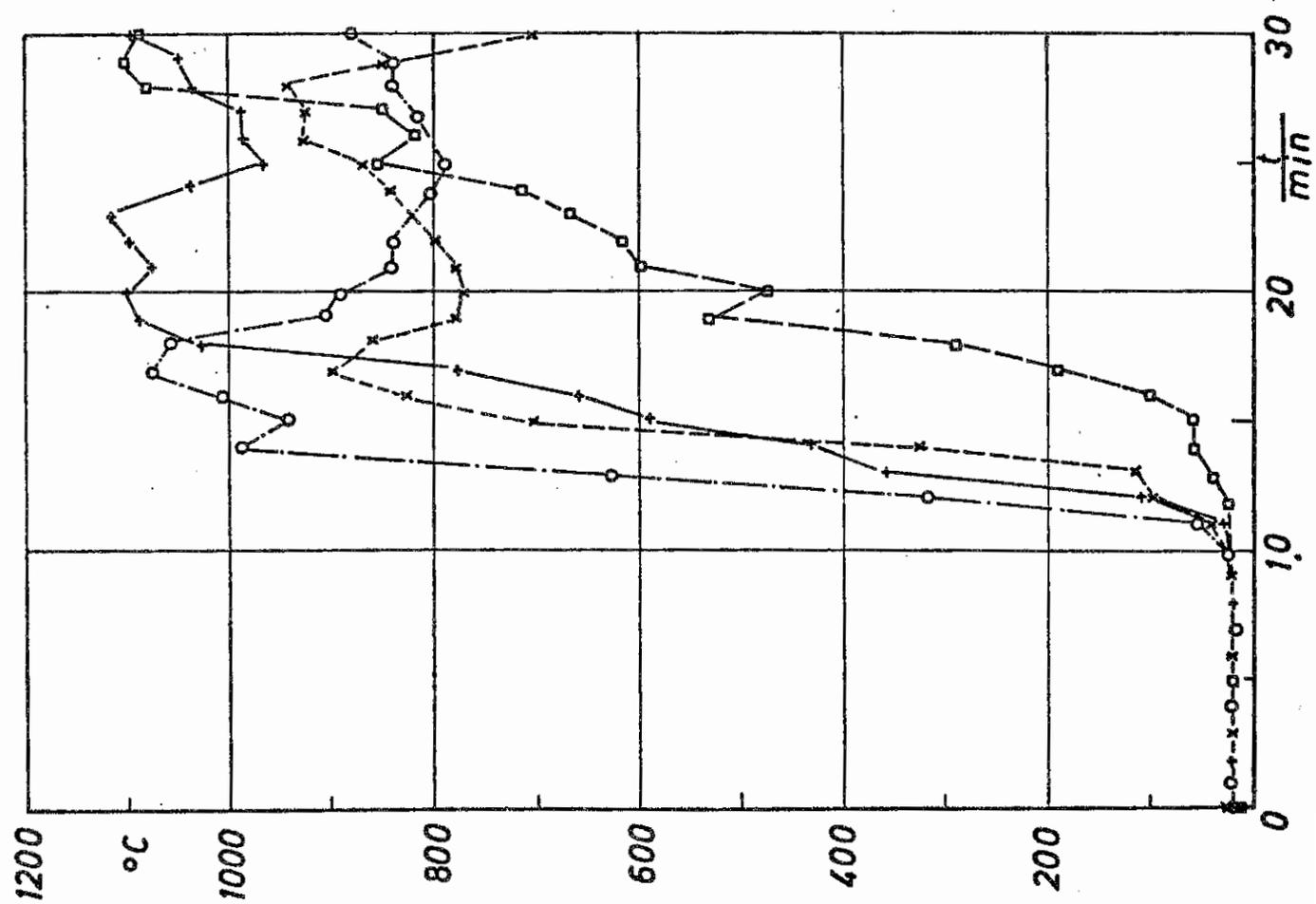


Bild 6-74

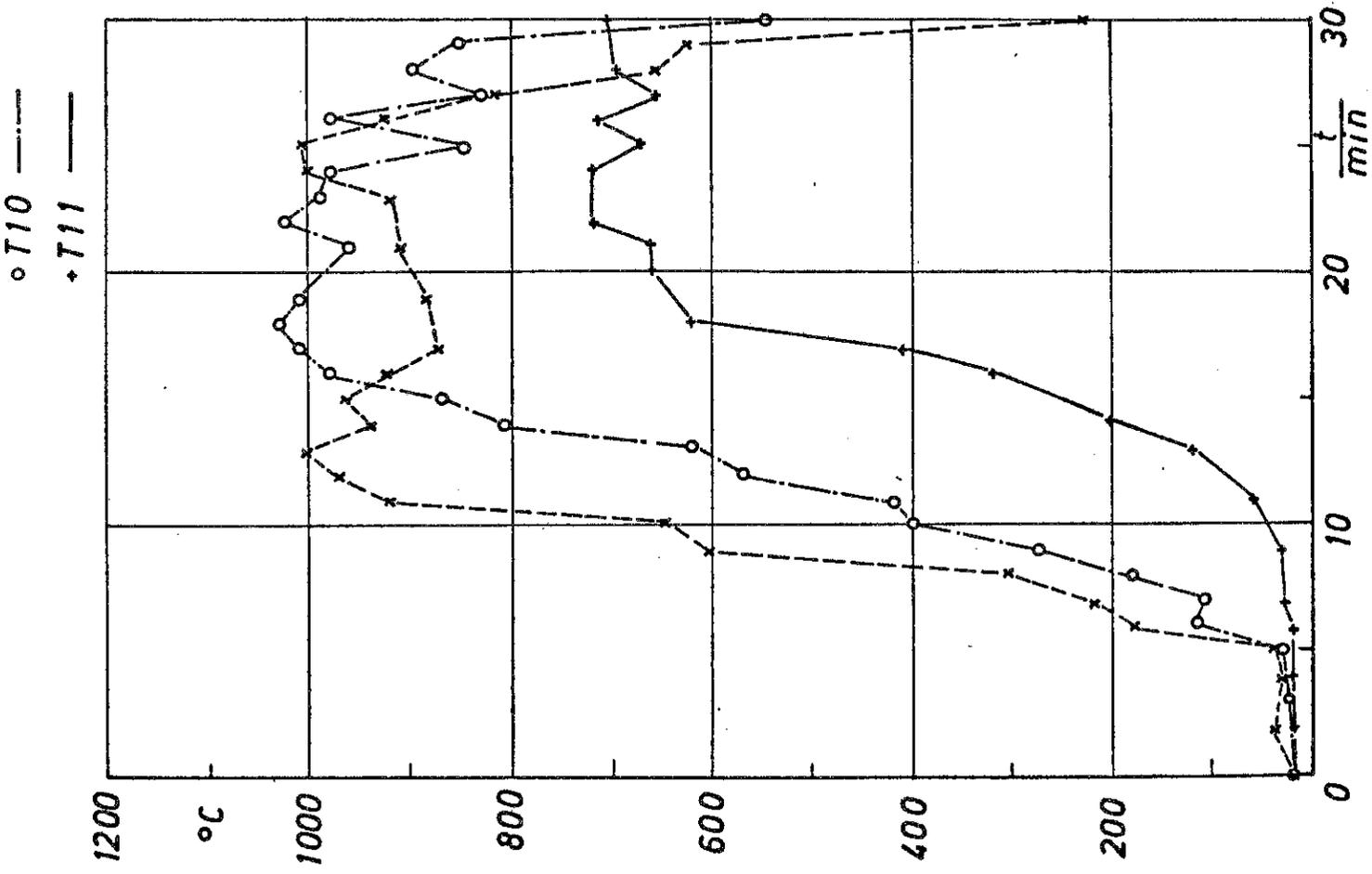
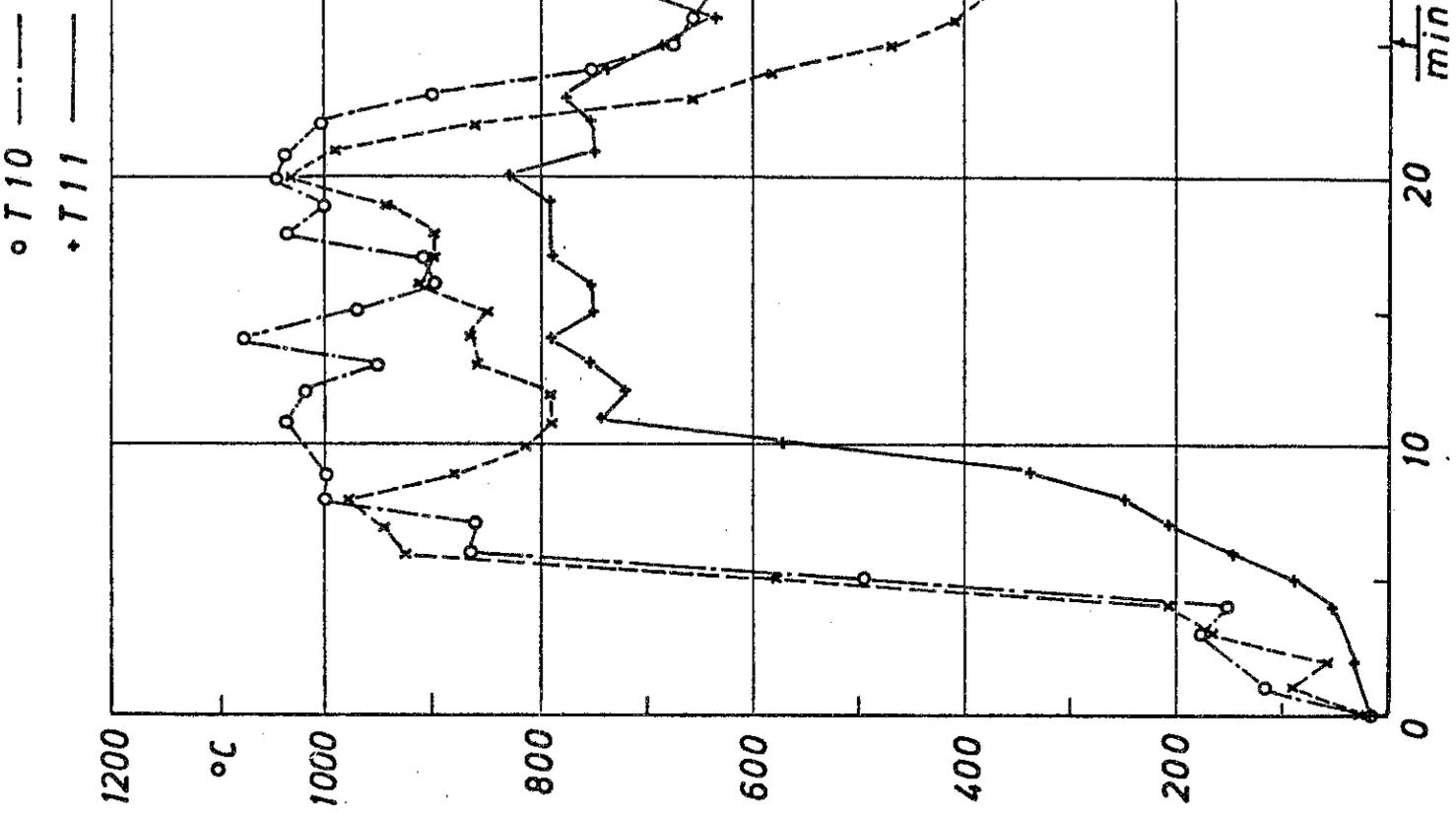
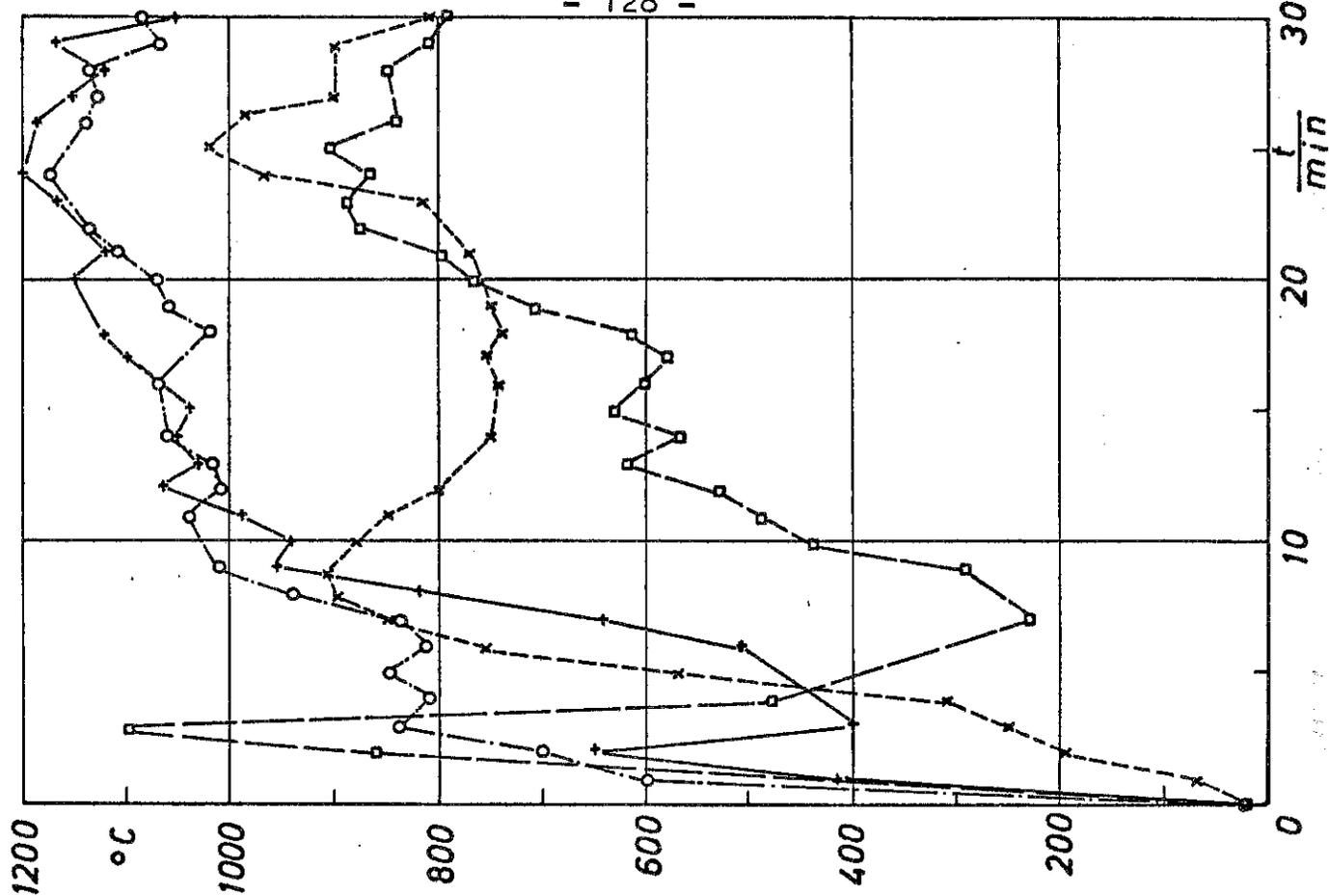


Bild 6-75

○ T 2 --- □ T 4 ---



○ T 2 --- □ T 4 ---

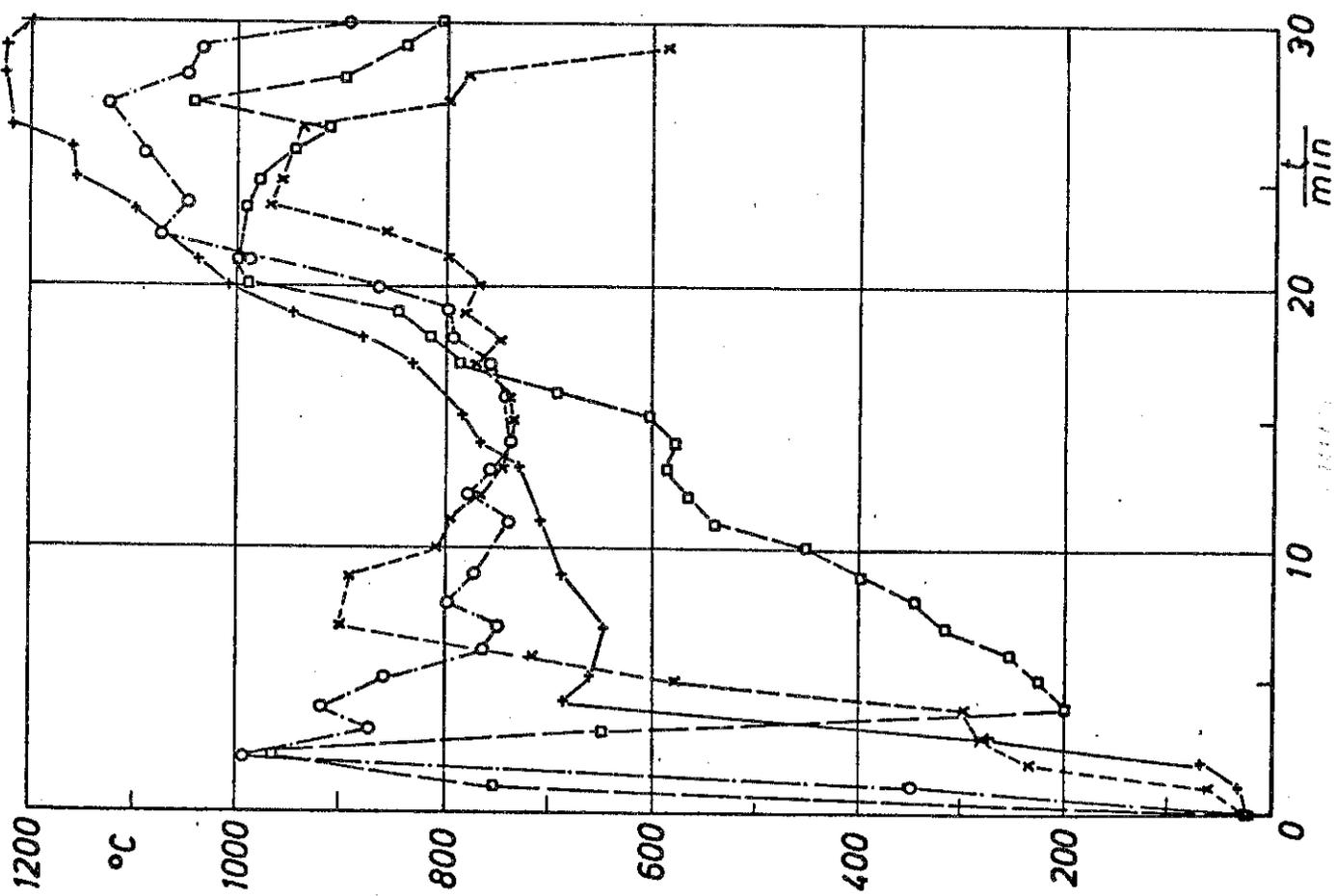
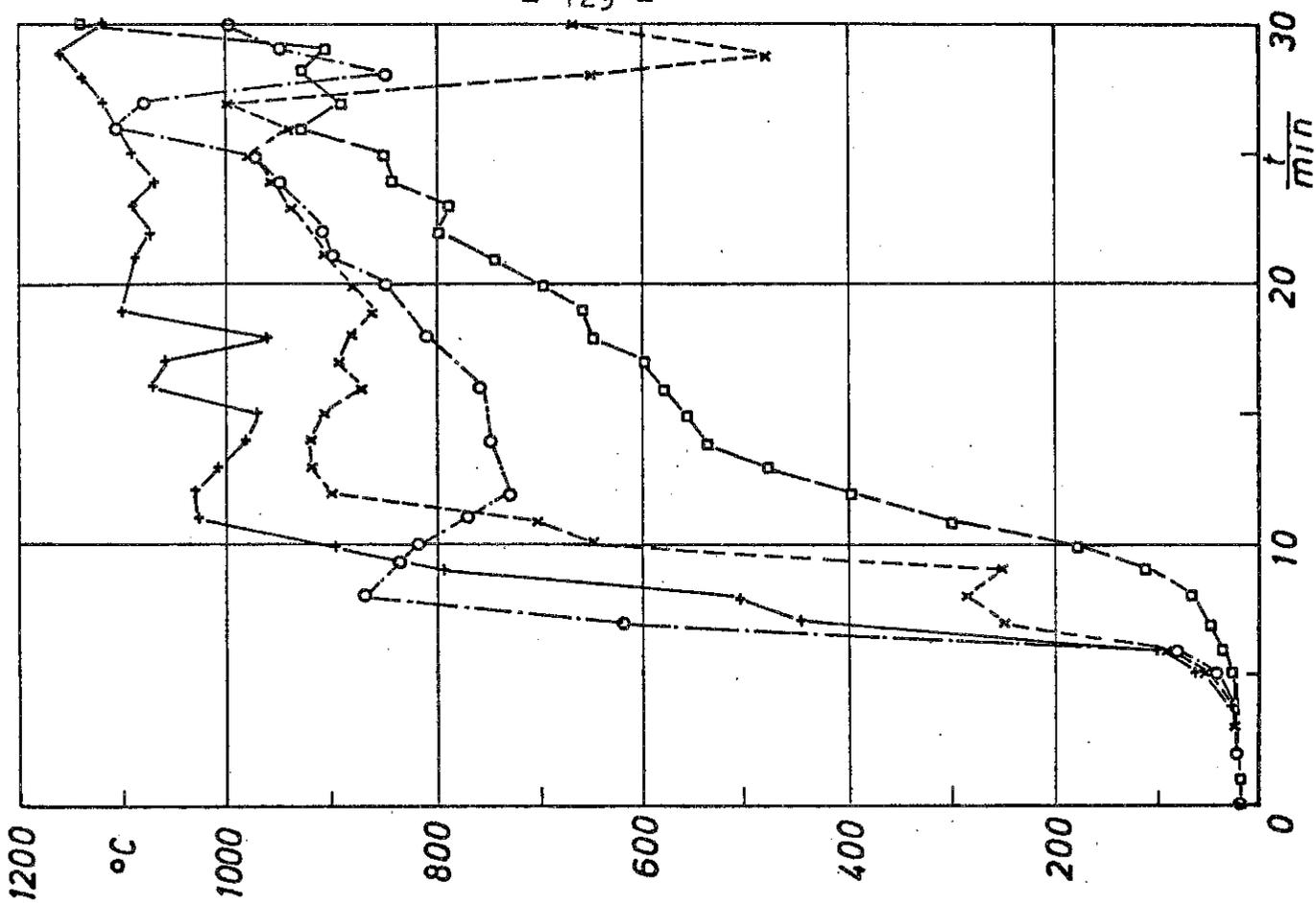


Bild 6-76

Versuch 27 x T 5 ----- + T 7
o T 6 ----- □ T 8



o T 6 ----- □ T 8

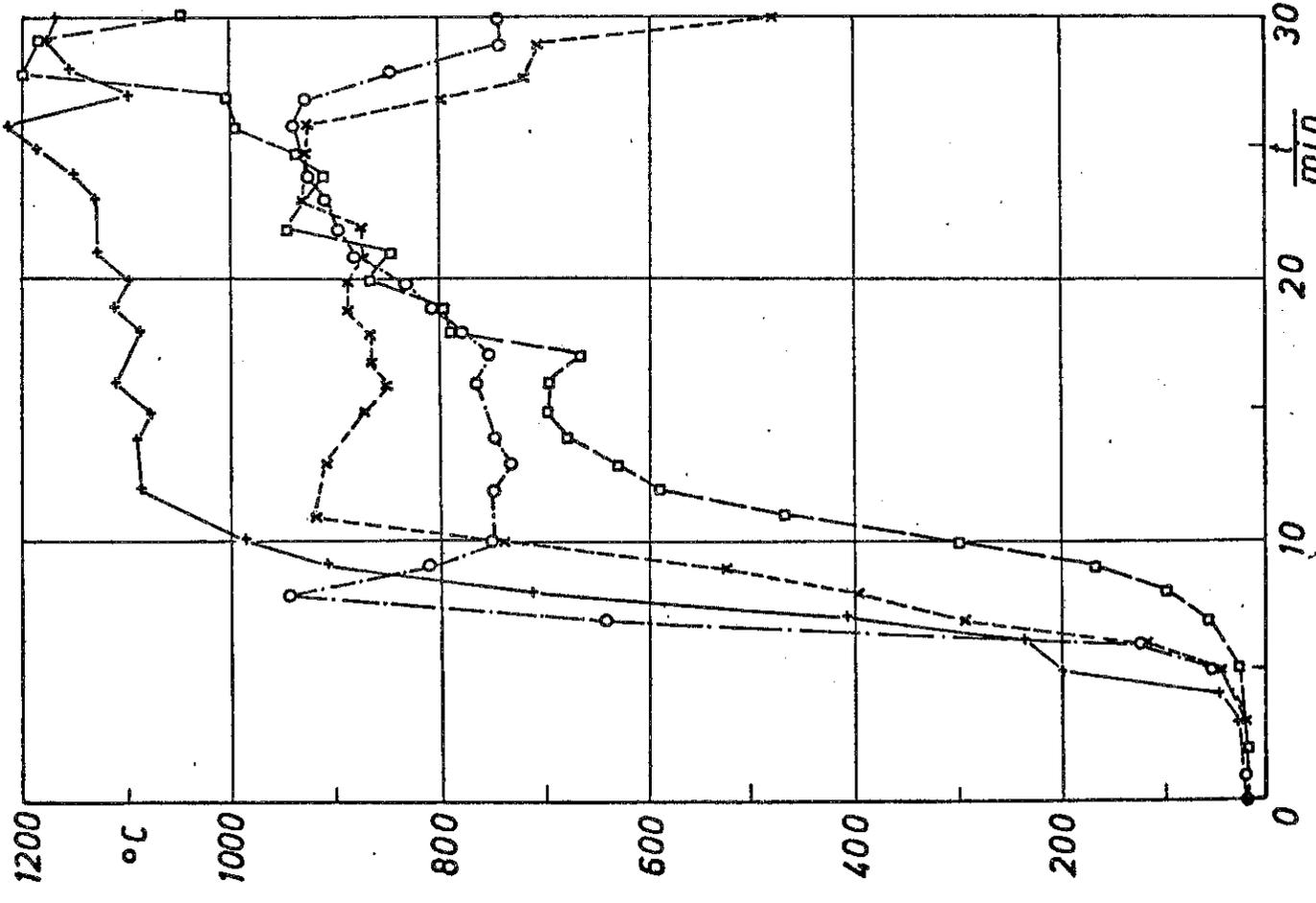
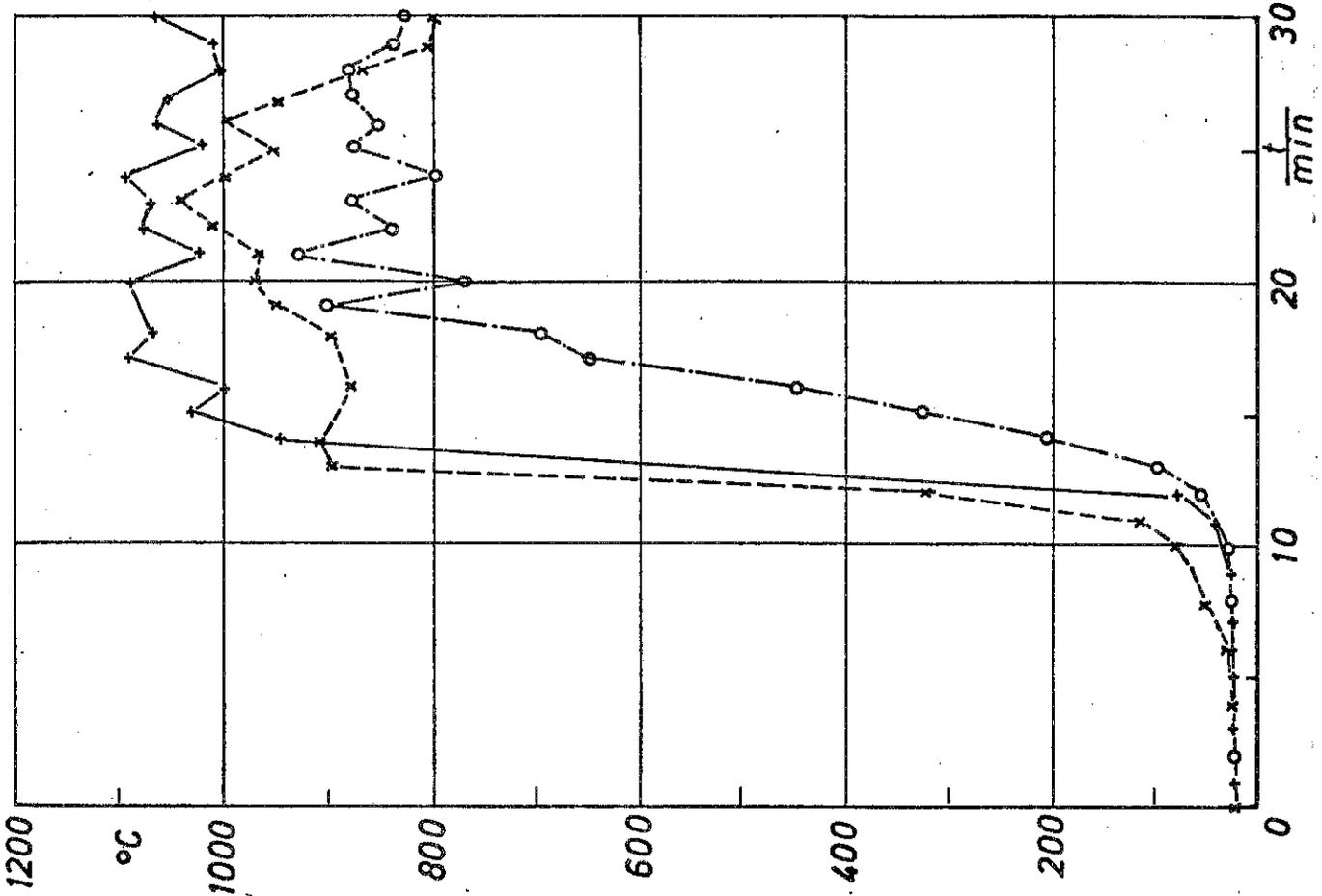


Bild 6-77

○ T10 ---
+ T11 —



versuch 20 7 9

○ T10 ---
+ T11 —

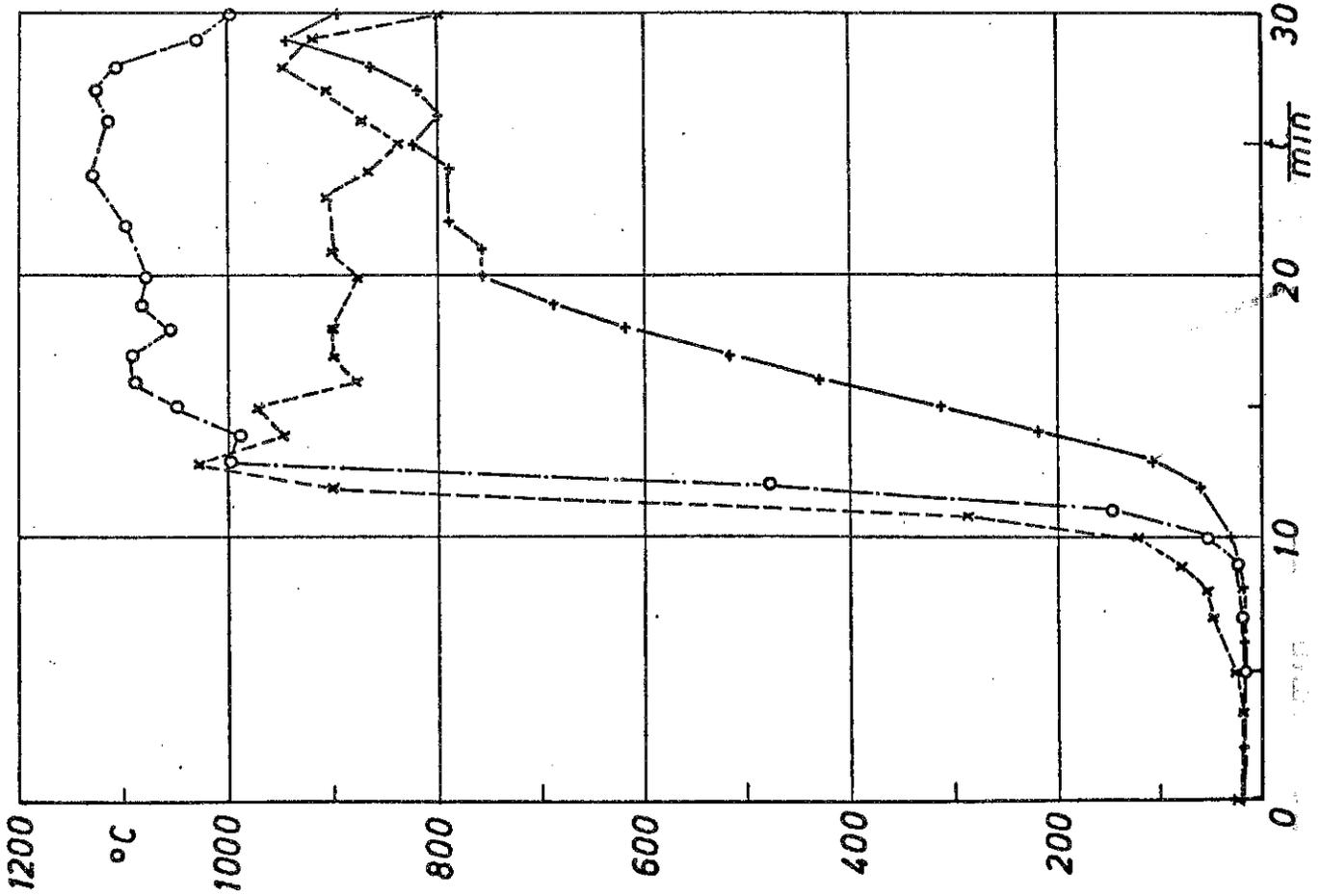


Bild 6-78

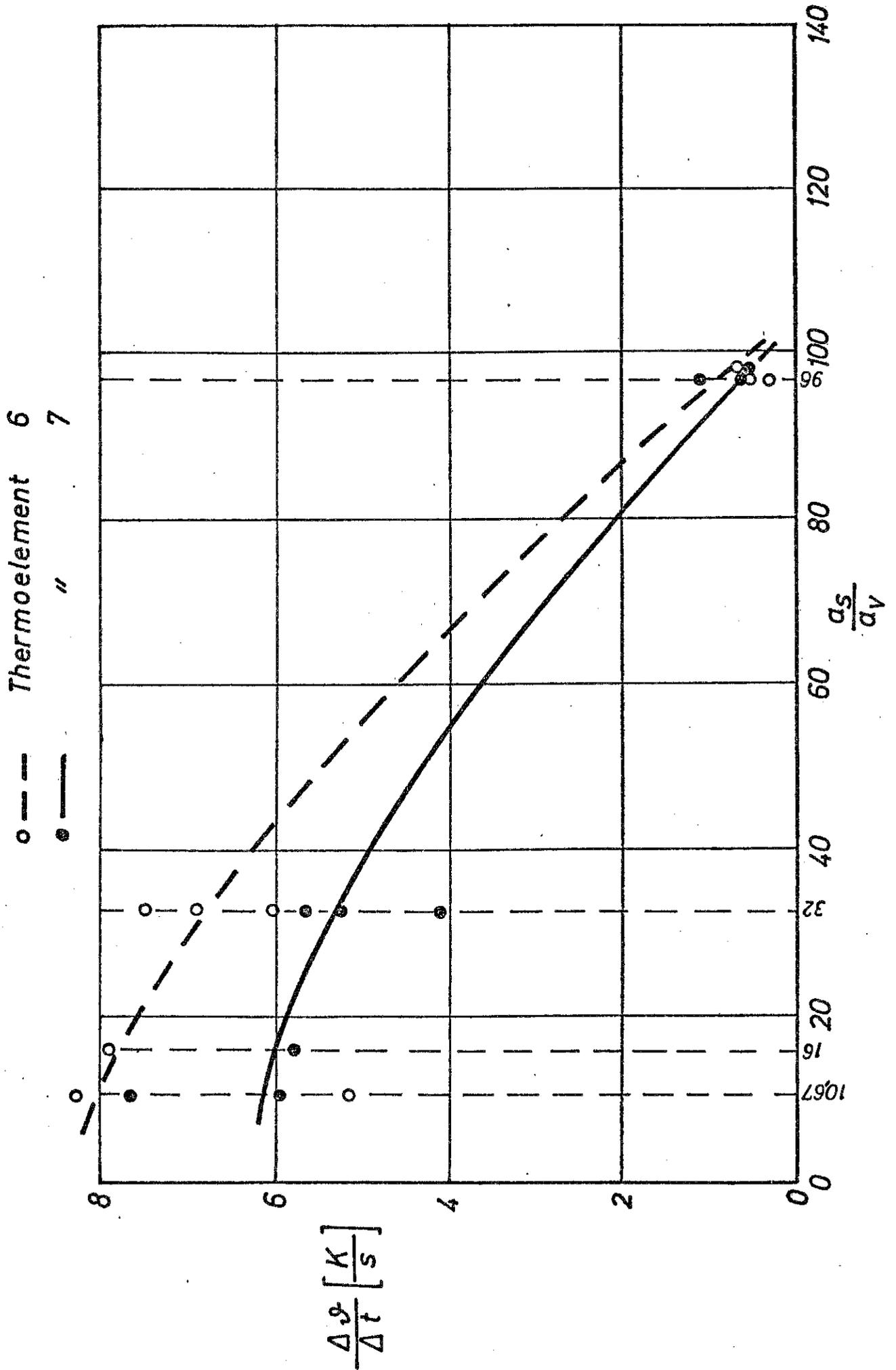


Bild 6-79