

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Auswirkungen von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung, Teil 2: Untersuchungen an einer Ganzflächen-Doppelfassade: „Brandversuche bei unterschiedlichen Abständen zwischen Innen- und Außenfassade“ und „Verhalten von Wärmeschutzglas und Einscheiben-Sicherheitsglas im Brandfall“

# 105

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER  
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN

Forschungsbericht Nr. 105

Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung.

- Teil 2: Untersuchungen an einer Ganzflächen-doppelfassade
- Brandversuche bei unterschiedlichen Abständen zwischen Innen- und Außenfassade
  - Verhalten von Wärmeschutzglas und Einscheibensicherheitsglas im Brandfall

von

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Mai 1997

## INHALTSVERZEICHNIS

|   | Seite |
|---|-------|
| 1. EINLEITUNG   | 1     |
| 2. VERSUCHSPROGRAMM   | 4     |
| 3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK                               | 4     |
| 4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG   | 6     |
| 4.1 VERSUCH 4   | 6     |
| 4.2 VERSUCH 5   | 6     |
| 4.2 VERSUCH 6   | 6     |
| 4.2 VERSUCH 7   | 6     |
| 5. VERSUCHSBEOBACHTUNGEN, MESSWERTE UND VERSUCHS-<br>ERGEBNISSE | 7     |
| 5.1 VERSUCH 4   | 7     |
| 5.2 VERSUCH 5   | 13    |
| 5.3 VERSUCH 6   | 17    |
| 5.4 VERSUCH 7   | 20    |
| 6. VERGLEICH DER BEI DEN VERSUCHEN ERMITTELTEN<br>MESSWERTE     | 23    |
| 7. ZUSAMMENFASSUNG  | 26    |
| 8. LITERATURVERZEICHNIS   | 30    |
| 9. TABELLEN UND BILDER  | 31    |
| 10. FOTOS   | 125   |

## 1. EINLEITUNG

Doppelfassaden werden seit einiger Zeit verstärkt von Architekten und Planern aus klima-, energie- und schallschutztechnischen Gründen eingesetzt.

Hierbei handelt es sich um Fassadenkonstruktionen, bei denen vor einer konventionellen Fassade im Abstand von ca. 20 cm bis 2 m eine zweite hinterlüftete äußere Fassade aus Glas vorgesetzt wird. Durch Zu- und Abluftöffnungen kann Luft in den Fassadenzwischenraum gelangen bzw. entweichen. Eine natürliche Raumlüftung wird durch zu öffnende Fenster oder Lüftungsklappen in der Innenfassade möglich. Der Sonnenschutz ist im Fassadenzwischenraum angeordnet.

Gegenüber einer einschaligen Fassade weist eine Doppelfassade einige Vorteile auf. Durch die äußere Glasscheibe erhält man einen Wind- und Wetterschutz für Fensterlüftung sowie einen Sonnenschutz. Das Öffnen von Fenstern wird auch bei extremen Wettersituationen ermöglicht. Eine teure und energieaufwendige Vollklimatisierung des Gebäudes ist bei einer Doppelfassade mit zu öffnenden Fenstern nicht notwendig. An verkehrsreichen Straßen mit einem erhöhten Lärmpegel wird über eine Doppelfassade der Schallpegel insbesondere bei geöffneten Fenstern deutlich reduziert.

In der Praxis haben sich einige Konstruktionsprinzipien für Doppelfassadenkonstruktionen nach ihrem Prinzip der Luftführung in der Fassade herauskristallisiert:

1.) Bei der Ganzflächendoppelfassade erfolgt die Luftführung im Fassadenzwischenraum über das gesamte Gebäude. Der Zwischenfas-sadenbereich weist abgesehen von den Randbereichen des Gebäudes keine vertikalen und horizontalen Abschottungen auf. Hierdurch grenzen sowohl horizontal als auch vertikal unterschiedliche Nutzungsbereiche an den Doppelfassadenbereich.

2.) Bei der Kanaldoppelfassade wechseln sich Kastenfenster mit vertikalen Abluftkanälen ab. Die Kastenfenster haben Zuluftöffnungen nach außen und Abluftöffnungen seitwärts zu den Abluftkanälen. Durch Auftrieb im Abluftkanal wird Luft im Zwischenraum nachgezogen und das Be- und Entlüften der Kastenfenster ermöglicht.

3.) Die Kastendoppelfassade ist eine geschoßweise durchlüftete Fassade mit horizontalen Abschottungen je Geschoß und vertikalen Abschottungen je Fenster. Die Doppelfassade ist hierbei jeweils auf einen Raum begrenzt. Zu den Doppelfassaden der angrenzenden Nachbarräume bestehen keine direkten Verbindungen. Die Ventilation dieser Doppelfassaden erfolgt über Frischlufteinströmung im Bereich der unteren horizontalen Abschottung, das Ausströmen im Bereich der oberen horizontalen Abschottung jeweils getrennt für jeden Fensterkasten.

4.) Der Fall, daß wie bei 3.) horizontale Abschottungen im Bereich der Geschoßplatten vorliegen, vertikale Abschottungen jedoch lediglich über große Entfernungen vorgesehen sind, tritt ebenfalls auf. Bei dieser Variante grenzen damit mehrere unterschiedliche Räume (Nutzungseinheiten) an einen gemeinsamen Doppelfassadenbereich an. Die Ventilation dieser Doppelfassaden erfolgt über Frischlufteinströmung im Bereich der unteren horizontalen Abschottung, das Ausströmen im Bereich der oberen horizontalen Abschottung.

Da über die Auswirkung der 2. Fassade auf den Brandverlauf und die Rauchgasabführung und über die Verhältnisse im Zwischenfassadenbereich (Brandübertragung) u. a. auch wegen der fast unüberschaubaren Vielzahl von Konstruktionsmerkmalen bisher nur relativ wenige Informationen existieren, die als Hilfe für eine allgemeine brandschutztechnische Sicherheitsbeurteilung von Gebäuden mit Doppelfassaden dienen können, sind realistische Brandversuche erforderlich.

Im Forschungsvorhaben für das Jahr 1995 wurden neben einer Lite-

raturauswertung orientierende Brandversuche (Versuche 1 bis 3) an dem neu errichteten Versuchsstand durchgeführt.

Der Versuchsaufbau entspricht vom Prinzip her einer Ganzflächen-doppelfassade (Typ 1.). Bei den Versuchen wurde der Abstand zwischen innerer und äußerer Fassade variiert. Durch Verwendung von Silikat-Brandschutzbauplatten in der verfahrbaren Außenfassade wurde u.a. untersucht, welche Auswirkungen der Brand auf brandtechnische Kenngrößen bei einer nichtzerstörten Außenfassade hat.

In den hier beschriebenen Untersuchungen wird der Einfluß unterschiedlicher Abstände zwischen der äußeren und der inneren Fassade auf die Brandausbreitung und die Strömung der Abgase untersucht, wenn ein Teil der Außenfassade im kritischen Bereich gegenüber und oberhalb des Brandraumfensters mit einer Einscheibensicherheitsverglasung ausgeführt wird. Aus Kostengründen mußte auf eine Vollverglasung der Außenfassade verzichtet werden.

## 2. VERSUCHSPROGRAMM

Zur Untersuchung der Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden im Zwischenfassadenbereich sowie in benachbarte und darüberliegende Räume wurden Brandversuche in einer dafür errichteten Versuchseinrichtung durchgeführt. Von Interesse war hierbei die Bestimmung der Wärmefreisetzung beim Brand, die Temperaturen in den Räumen, im Zwischenfassadenbereich, an den Fenstern und Verglasungen, die Wärmestrahlung an Fenstern in über dem Brandraum liegenden Stockwerken, der auftretende Rauchgasstrom im Zwischenfassadenbereich sowie die Rauchgaszusammensetzung. Besondere Aufmerksamkeit wurde auch dem Versagen der Wärmeschutzverglasung der Innenfassade und dem Versagen der Einscheibensicherheits-Verglasung (kurz: ESG) geschenkt. Die Auswahl der Versuchsparameter und Meßgrößen hatte das Ziel, Kriterien für die Konstruktion und den Brandschutz bereitzustellen, die den Personen- und Objektschutz bei derartigen Gebäuden gewährleisten.

## 3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

Bild 1 zeigt die Prinzipskizze des Versuchsaufbaus bestehend aus Brandraum, Flur, Nebenraum und dem Teilbereich einer Ganzflächendoppelfassade sowie den Meßstellenplan mit den entsprechenden Abmessungen. Bild 2 zeigt im Detail den Zwischenfassadenbereich. Tabelle 1 enthält nähere Einzelheiten zu den Versuchsaufbauten, Konstruktionselementen und Versuchsparametern. In Bild 1 das durch eine Wand über dem Brandraum angedeutete weitere Stockwerk zu erkennen. Im Brandraum befindet sich eine Fensteröffnung mit einer Wärmeschutzverglasung (Foto 2). Die Wand des oberen Stockwerkes ist aus Silikat-Brandschutzbauplatten gefertigt. Die Fensteröffnung des oberen Stockwerkes ist bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen ebenfalls mit Silikat-Brandschutzbauplatten verschlossen. An den Brandraum grenzen ein Flur sowie ein Nebenraum an. Die Räume sind jeweils durch eine Tür miteinander verbunden. Sämtliche Räume sind innen mit

Silikat-Brandschutzbauplatten verkleidet, um der Brandbelastung durch mehrere Versuche standhalten zu können. Der Boden des Brandraumes ist als Waageplattform ausgebildet.

Vor der Wand des Brandraumes und des "oberen Stockwerkes" befindet sich eine verfahrbare Außenfassade. Diese Außenfassade besteht aus einem verfahrbaren Stahlgerüst mit daran befestigten Silikat-Brandschutzbauplatten (PROMATECT<sup>R</sup>-L) von 20 mm Stärke. Ein Teilbereich der Außenfassade wurde, wie in Bild 1, 2, Foto 3 und Tabelle 1 dargestellt, mit einer Einscheibensicherheitsverglasung in einem handelsüblichen Aluminiumprofilsystem mit Glashalteleisten ausgeführt. Auf eine Vollverglasung der Außenfassade mußte aus Kostengründen verzichtet werden.

Als Brandlast wurde bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen eine bzw. zwei Brandlastpaletten nach Bild 3, Tabelle 2, Foto 1 im Brandraum vor dem Fenster aufgebaut. Diese Brandlastpaletten wurden bereits bei den in /1/ beschriebenen Versuchen eingesetzt. Die Brandlastpaletten haben den Vorteil, daß diese gegenüber Möbel billiger sind und eine gut reproduzierbare Wärmefreisetzung ergeben. Gegenüber reinen Holzkrippen besteht der Vorteil, daß die Rauchentwicklung durch die zusätzlich verwendeten Textilien und Kunststoffe etwa der bei einem Wohnungsbrand entspricht.

Bei den Versuchen wurden zeitliche Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelementen, der zeitliche Verlauf der Abbrandmasse, die Strömungsgeschwindigkeit der Luft bzw. der Rauchgase an Zu- bzw. Abluftöffnung der Außenfassade, die Wärmestrahlung an der Innenfassade im oberen Stockwerk sowie die Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration mit Infrarot-Gas-analysatoren gemessen. Die Art und Position der Meßstellen sind Bild 1 und 2 sowie der Meßstellenliste nach Tabelle 3 zu entnehmen. Zusätzlich wurde der Versuchsablauf mit mehreren Farb-Videokameras aufgezeichnet. Die Meßwertregistrierung erfolgte mit personalcomputergesteuerten Datenerfassungsanlagen.

#### 4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Tabelle 1 gibt nähere Einzelheiten über die Versuchsaufbauten und Versuchsparameter (z.B. Zu- und Abluftöffnungen, Fenster, Türen, Fassadenabstand, Brandlast) wieder.

##### 4.1 VERSUCH 4

Bei Versuch 4 betrug der Abstand zwischen Innen- und Außenfassade 1,2 m. Die Zündung der Brandlastpalette erfolgte durch 1/2 l Heptan in einer rechteckigen Zündwanne (200 mm \* 400 mm) unterhalb der Zündkrippe. Der Versuchsablauf wird in Tabelle 4 wiedergegeben.

##### 4.2 VERSUCH 5

Gegenüber Versuch 4 wurde der Abstand auf 0,8 m verringert. Die Zündung erfolgte in der gleichen Weise wie bei Versuch 4. Tabelle 5 zeigt den Versuchsablauf bei diesem Versuch.

##### 4.3 VERSUCH 6

Bei Versuch 6 wurde der Abstand weiter auf 0,3 m verringert. Die Zündung erfolgte in der gleichen Weise wie bei den vorherigen Versuchen. Der Versuchsablauf wird in Tabelle 6 dargestellt.

##### 4.4 VERSUCH 7

Bei Versuch 7 betrug der Abstand wiederum 0,8 m, jedoch wurde hier eine größere Brandlast mit 2 Brandlastpaletten verwendet. Die Zündung der beiden Brandlastpaletten erfolgte mit 2 Zündkrippen und 2 Zündwannen mit jeweils 1/2 l Heptan. Tabelle 7 zeigt den Versuchsablauf bei Versuch 7.

## 5. VERSUCHSBEOBACHTUNGEN, MESS- UND VERSUCHSERGEBNISSE

Der zeitliche Verlauf der Meßwerte wie Temperatur, Abbrandmasse, Gaskonzentration, Wärmestrahlung, Strömungsgeschwindigkeit etc. ist bei allen Versuchen abhängig von den Ventilationsöffnungen für den Brandraum und die Doppelfassade. Hierunter fallen insbesondere die Öffnungszustände der Brandraumtür und der Tür des Flures als Öffnung zur Versuchshalle sowie des Brandraumfensters. Weiterhin die Zu- und Abluftöffnung an der Außenfassade. Die Ansaugung von Luft durch den Spalt zwischen Abbrandwaage und Brandraumwänden ist für alle Versuche gleich. Bei der Bewertung der Ergebnisse der einzelnen Versuche untereinander ist dies zu berücksichtigen.

### 5.1 VERSUCH 4

Der Ablauf des Versuches 4 ist in Tabelle 4 wiedergegeben.

Bild 4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen im Brandraum. Bei geöffneter Brandraumtür und geschlossener Flurtür zur Versuchshalle ergaben sich nach ca. 8 bis 9 min abfallende Temperaturen bei geschlossenem Brandraumfenster. Zur Aufrechterhaltung der Brandentwicklung mußte daher bei diesem Versuch die Flurtür zur Versuchshalle geöffnet werden. Nach Versagen des Wärmeschutzglasfensters im Brandraum wurde die Flurtür zur Versuchshalle wieder geschlossen. Die Temperatur TB2 erreichte im Deckenbereich bei Versuch 4 einen maximalen Wert von ca. 700°C.

Bild 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen im Fensterbereich der Innenfassade. Die höchsten Temperaturen von ca. 800°C traten hierbei im Bereich der Oberkante der Fensteröffnung nach ca. 23 min auf. Die Temperatur TOR1 im Bereich des "oberen Fensters" erreichte zum gleichen Zeitpunkt einen Wert von etwa 350 °C.

In Tabelle 8 sind die Zeiten und die Temperaturen beim Versagen des Wärmeschutzglasfensters (1. Rißbildung im Glas, Herausschlagen der 1. Flammen durch das Wärmeschutzglasfenster) aufgeführt. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, daß das Versagen des Wärmeschutzglases durch mehr oder weniger laute mehrfach auftretende Geräusche bei der Rißbildung angekündigt wird. Beim Zerspringen des Wärmeschutzglases fallen unterschiedlich große scharfkantige Glasstücke in den Brandraum und in den Zwischenfassadenbereich. Beim Aufprall auf dem Boden zerspringen die Bruchstücke zum Teil in kleinere Teile.

Die Bilder 6 und 7 zeigen den zeitlichen Verlauf der Temperaturen im Zwischenfassadenbereich in einem Abstand von 0,2 m von der Innenfassade bzw. im Bereich der Prandtl-Rohre. Die höchsten Temperaturen ergaben sich in der Mitte des Zwischenfassadenbereiches (TZ4, TZ7, TZ9). Die seitlich davon, im Bereich der vertikalen Abschottung angeordneten Meßstellen erreichten wesentlich niedrigere Temperaturen (TZ5, TZ6, TZ8, TZ10).

Bild 8 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe an der Innenseite der ESG-Verglasung. Es traten bereits bei der geringen Brandlast und dem großen Abstand von 1,2 m Temperaturen von über 350°C an der obersten Meßstelle TZ3.3 auf. Die ESG-Verglasung blieb bei diesem Versuch vollständig intakt. Nach Auskunft eines Glasherstellers verliert ESG bei ca. 300°C seine Vorspannung. Es liegen hierzu jedoch noch keine näheren Untersuchungen vor.

Bild 9 zeigt die zeitlichen Verläufe der Temperaturen im Flur. Es traten Temperaturen bis zu 500°C bei geöffneter Brandraumtür und nach Öffnen der Flurtür zur Versuchshalle auf. Die Türen mußten geöffnet werden, um eine ausreichende Ventilation bei geschlossenem Wärmeschutzglasfenster zur Aufrechterhaltung der Brandentwicklung zu erzielen.

Bild 10 gibt die Temperaturenverläufe im Nebenraum wieder. Diese Temperaturen lagen unter 100°C.

Bild 11 zeigt ausgewählte Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich und an der ESG-Verglasung der Außenfassade.

Die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke  $p_{dyn}$ , die mit jeweils 3 Prandtl-Rohren an der Zu- und Abluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches gemessen wurden, sind in Bild 12 dargestellt. Aus diesem läßt sich mit Hilfe der temperaturabhängigen Luft- bzw. Rauchgasdichte  $\rho$  die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  (Bild 13) mit folgender Gleichung nach /2/ berechnen:

$$v = \sqrt{\frac{2 * p_{dyn}}{\rho}}$$

Die Strömungsgeschwindigkeit der Zu- und Abluft lag bei allen Versuchen vor dem Zerplatzen des Brandraumfensters bei ca. 0,1 bis 0,3 m/s. Wegen der starken Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit wurde dieser Bereich in den Diagrammen für die Strömungsgeschwindigkeit nicht berücksichtigt und gleich Null gesetzt. Nach dem das Brandraumfenster zerstört war, stiegen diese Geschwindigkeiten stark an. Der Maximalwert betrug ca. 6,5 m/s in der Abgasöffnung.

Unter Berücksichtigung der Öffnungsfläche der Zu- und Abluftöffnung von jeweils 1,5 m<sup>2</sup> nach Tabelle 1 und unter Berücksichtigung einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit ergab sich der mittlere Volumenstrom für die Zu- und Abluftöffnung in Abhängigkeit der Luft- bzw. Rauchgastemperatur nach Bild 14. Der Maximalwert betrug bei diesem Versuch ca. 33000 m<sup>3</sup>/h in der Abluftöffnung bei einer Abgastemperatur von 310°C bzw. 15500 m<sup>3</sup>/h unter Normbedingungen.

Aus dem zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse während der Brandversuche erhält man durch Differentiation dieser Kurve die Abbrandrate und über die Verwendung eines entsprechend der Kom-

ponenten der Brandlast gewichteten Heizwertes den beim Abbrand freigesetzten Gesamtwärmestrom. Die Abbrandmasse  $\Delta M$  ergibt sich aus der Differenz zwischen Anfangsmasse  $M_a$  und der noch nicht verbrannten Masse der gelagerten Stoffe zum Zeitpunkt  $t$  zu

$$\Delta M = M_a - M(t)$$

Der zeitliche Verlauf der Abbrandrate  $M$  ergibt sich aus

$$\frac{d(\Delta M)}{dt} = \frac{dM}{dt} = \dot{M}$$

Hiernach ergibt sich der Zusammenhang zwischen der in der Zeiteinheit freigesetzten Wärmemenge, d.h. dem Wärmestrom  $Q$  und der Abbrandrate  $M$  für einen homogenen Stoff bei vollständiger Verbrennung.

$$Q = M \cdot H_u$$

Bei einer aus mehreren Komponenten zusammengesetzten Brandlast sind die Massenströme und Heizwerte der Einzelkomponenten zu berücksichtigen, was aber insbesondere in einem fortgeschrittenen Brandstadium nicht mehr möglich ist. Die gemessenen Abbrandkurven charakterisieren daher das Abbrandverhalten der gesamten Brandlast, da schon nach kurzer Zeit die Trennung der Vorgänge auf die verschiedenen Komponenten nicht mehr möglich ist.

Für den Heizwert  $H_u$  wird der gewichtete Heizwert  $\bar{H}_u$  aus den Komponenten der Brandlast eingesetzt. Dieser ergibt sich nach folgender Beziehung

$$\bar{H}_u = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot H_{u,i}}{\sum_{i=1}^n P_i} = \sum_{i=1}^n p_i \cdot H_{u,i}$$

Die Einzelmassen  $P_i$  und Heizwerte  $H_{u,i}$  der Komponenten der Brandlastpalette sind hierbei Tabelle 2 zu entnehmen.

Der aufsteigende fühlbare Wärmestrom ist geringer als der nach der obigen Gleichung errechnete maximale theoretische Wärmestrom. Dies ist darauf zurückzuführen, daß durch eine unvollständige Verbrennung der Heizwert  $H_u$  nicht erreicht wird und Wärme durch Strahlung an die Umgebung abgegeben wird. Eine unvollständige Verbrennung entsteht z.B. durch den Einfluß flammenhemmender Zusätze auf die Verbrennung, durch Sauerstoffmangel sowie durch nicht ausreichende Zündenergien zur Zündung der durch Wärmeeinwirkung entstandenen und nach oben abströmenden Zersetzungsgase und -dämpfe und führt u.a. zu einer Rußbildung.

Wie Bild 15 verdeutlicht, stieg zu Beginn des Versuches die Abbrandrate bzw. die Wärmefreisetzung an, solange noch ausreichend Luftsauerstoff zur Verbrennung vorhanden ist an und fiel anschließend wieder ab. Nach Öffnen der Flurtür zur Versuchshalle stiegen die Werte wieder an. Es ergab sich eine maximale Abbrandrate von ca. 9 kg/min und eine maximale theoretische Wärmefreisetzung von ca. 2,6 MW.

Die im Brandraum entstandenen Zersetzungsgase wurden bei allen Versuchen zum Teil im Brandraum und zum Teil im Zwischenfassadenbereich verbrannt. Dieses war am Entzünden der Rauchgase im Zwischenfassadenbereich visuell erkennbar.

Im Abgasstrom aus der Abluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches wurde aus dem Massenstrom, der Abgastemperatur und der spezifischen Wärmekapazität ein maximaler Enthalpiestrom von ca. 1,7 MW ermittelt. Durch die geöffnete Brandraum- und Flurtür wurde ebenfalls ein Enthalpiestrom abgeführt, der bei diesen Versuchen jedoch meßtechnisch nicht erfaßt wurde. Weiterhin ist der Anteil zum Aufheizen der Wände sowie der Strahlungswärmeaustausch mit den Wänden zu berücksichtigen.

Bild 16 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wärmestrahlung in der

Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade. Die Wärmestrahlung ist bei einem geschlossenen Fenster hauptsächlich dafür verantwortlich, daß Textilien oder sonstige Materialien entzündet werden und dadurch ein Feuerüberschlag in darüberliegende Geschosse erfolgt. Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde der Wärmestrahlungsaufnehmer so positioniert, daß die Höhe des Aufnehmers einem Feuerüberschlagsweg von 1 m plus der halben Fensterhöhe entspricht. Der bei Versuch 4 gemessene Maximalwert von ca.  $0,8 \text{ W/cm}^2$  würde nach /4/ nicht ausreichen, handelsübliche Materialien zu entzünden.

Bild 17 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum. Man erkennt, daß beim Öffnen der Flurtür zu Versuchshalle nach 9 min 40 s die Sauerstoffkonzentration anstieg. Nach ca. 14 min fiel diese wieder ab bis diese nach dem Versagen des Wärmeschutzglasfensters nach ca. 21 min wieder anstieg.

## 5.2 VERSUCH 5

Der Ablauf des Versuches wird in Tabelle 5 wiedergegeben.

Bild 18 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im Brandraum. Bei geöffneter Brandraumtür und geschlossener Flurtür zur Versuchshalle ergaben sich nach ca. 8 min abfallende Temperaturen bei geschlossenem Brandraumfenster. Zur Aufrechterhaltung der Brandentwicklung mußte daher wie bei Versuch 4 die Flurtür zur Versuchshalle geöffnet werden. Nach Versagen des Wärmeschutzglasfensters im Brandraum wurde die Flurtür zur Versuchshalle wieder geschlossen. Die Temperatur TB2 erreichte im Deckenbereich einen maximalen Wert von ca. 650°C.

Die Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade werden in Bild 19 dargestellt. Die höchste Temperatur von ca. 1000°C trat hierbei im Bereich der Oberkante der Fensteröffnung nach ca. 17 min auf. Die Temperatur TOR1 im Bereich des "oberen Fensters" wies zum gleichen Zeitpunkt eine Temperatur von etwa 400 °C auf. Die Meßergebnisse zeigen, daß durch eine Verringerung des Abstandes von 1,2 m auf 0,8 m wesentlich höhere Temperaturen im Fensterbereich auftraten. Das Wärmeschutzglasfenster ging nach Tabelle 8 ca. 7 min früher kaputt als bei Versuch 4.

Die Bilder 20 und 21 zeigen Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich in einem Abstand von 0,2 m von der Innenfassade bzw. im Bereich der Prandtl-Rohre. Die höchsten Temperaturen ergaben sich in der Mitte des Zwischenfassadenbereiches (TZ4, TZ7, TZ9). Die seitlich davon, im Bereich der vertikalen Abschottung angeordneten Meßstellen erreichten wesentlich niedrigere Temperaturen (TZ5, TZ6, TZ8, TZ10).

Bild 22 zeigt die Temperaturverläufe an der Innenseite der ESG-Verglasung. Es traten Temperaturen von über 500°C an der mittleren Meßstelle TZ3.2 auf. Die obere Scheibe ging nach ca. 19 min (siehe Tabelle 8) im Bruchteil einer Sekunde schlagartig ohne vorherige Rißbildungsgeräusche kaputt. Bis zum Zeitpunkt

der Zerstörung waren wegen der starken Verrauchung im Zwischenfassadenbereich und Rußablagerung auf der Scheibe fast keine Flammen hinter der Scheibe mehr erkennbar. Durch die dann plötzlich heraustretenden Flammen können Feuerwehreinsatzkräfte stark gefährdet werden. Beim ESG waren die Bruchstücke zwischen ca. 0,25 cm<sup>2</sup> und 70 cm<sup>2</sup> groß. Die Gefahr einer Schnittverletzung ist durch die Glasstruktur bei ESG wesentlich geringer als bei Wärmeschutzglas. Durch das Zerplatzen der ESG-Scheibe ist an der oberen Meßstelle TZ3.3 ein Temperaturabfall um ca. 150°C festzustellen. Dies würde in der Praxis zu einer Verringerung der thermischen Belastung für darüberliegende Bauteile führen.

Bild 23 zeigt die zeitlichen Verläufe der Temperaturen im Flur. Es traten Temperaturen bis zu 400°C bei geöffneter Brandraumtür und nach Öffnen der Flurtür zur Versuchshalle auf. Die Türen mußten geöffnet werden, um eine ausreichende Ventilation bei geschlossenem Wärmeschutzglasfenster zur Aufrechterhaltung der Brandentwicklung zu erzielen.

Bild 24 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im Nebenraum. Diese Temperaturen lagen unter 100°C.

Bild 25 zeigt ausgewählte Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich und an der ESG-Verglasung der Außenfassade.

Die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke  $p_{dyn}$ , die mit jeweils 3 Prandtl-Rohren an der Zu- und Abluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches gemessen wurden, sind in Bild 26 dargestellt.

Bild 27 zeigt den Verlauf der daraus errechneten Strömungsgeschwindigkeiten. Durch den geringeren Abstand zwischen Innen- und Außenfassade traten etwas höhere Strömungsgeschwindigkeiten als bei Versuch 4 auf. Der Maximalwert betrug ca. 6,7 m/s in der Abluftöffnung.

Unter Berücksichtigung der Öffnungsfläche der Zu- und Abluftöffnung von jeweils  $1,0 \text{ m}^2$  nach Tabelle 1 und unter Berücksichtigung einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit ergab sich der mittlere Volumenstrom für die Zu- und Abluftöffnung in Abhängigkeit der Luft- bzw. Rauchgastemperatur nach Bild 28. Durch die kleineren Querschnittsflächen in der Zu- und Abluftöffnung ergeben sich bei gleicher Brandlast kleinere Luft- und Rauchgasvolumenströme als bei Versuch 4. Der Maximalwert betrug bei diesem Versuch ca.  $24000 \text{ m}^3/\text{h}$  in der Abluftöffnung bei einer Abgastemperatur von  $350^\circ\text{C}$  bzw. ca.  $10400 \text{ m}^3/\text{h}$  unter Normbedingungen.

Wie Bild 29 zeigt, stieg zu Beginn des Versuches die Abbrandrate bzw. die Wärmefreisetzung an, solange noch ausreichend Luftsauerstoff zur Verbrennung vorhanden ist an und fiel anschließend wieder ab. Nach Öffnen der Flurtür zur Versuchshalle steigen die Werte wieder an. Es ergab sich eine maximale Abbrandrate von ca.  $8,5 \text{ kg}/\text{min}$  und eine maximale theoretische Wärmefreisetzung von ca.  $2,4 \text{ MW}$ .

Im Abgasstrom aus der Abluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches wurde aus dem Massenstrom, der Abgastemperatur und der spezifischen Wärmekapazität ein maximaler Enthalpiestrom von ca.  $1,3 \text{ MW}$  ermittelt.

Bild 30 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wärmestrahlung in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade. Der bei diesem Versuch gemessene Maximalwert von ca.  $1,5 \text{ W}/\text{cm}^2$  würde nach /4/ für die Fremdentzündung (Entzündung mit Energiezufuhr von außen) von Textilien im oberen Stockwerk ausreichen.

Bild 31.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum. Man erkennt, daß nach Öffnen der Flurtür zur Versuchshalle nach ca. 10 min die Sauerstoffkonzentration nach einem Abfall wieder anstieg. Nach ca. 13 min fiel diese wieder ab, stieg nach ca. 15 min nach dem Zerspringen des Wärmeschutzglasfensters

leicht an und fiel nach ca. 16 min wieder ab. Im Bereich der Abklingphase des Brand stieg die Sauerstoffkonzentration wieder an.

Bild 31.2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration in dem aus der Versuchshalle abgesaugten Abgasvolumenstrom.

### 5.3 VERSUCH 6

Der Ablauf des Versuches wird in Tabelle 6 wiedergegeben.

Bild 32 zeigt die Temperaturverläufe im Brandraum. Bei geöffneter Brandraumtür und geschlossener Flurtür zur Versuchshalle ergaben sich nach ca. 8 min abfallende Temperaturen bei geschlossenem Brandraumfenster. Zur Aufrechterhaltung der Brandentwicklung mußte daher wie bei Versuch 4 und 5 die Flurtür zur Versuchshalle geöffnet werden. Nach Versagen des Wärmeschutzglasfensters im Brandraum wurde die Flurtür zur Versuchshalle wieder geschlossen. Die Temperatur TB2 erreichte im Deckenbereich einen maximalen Wert von ca. 680°C.

Bild 33 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade. Die höchste Temperatur von ca. 950°C trat hierbei im Bereich der Oberkante der Fensteröffnung nach ca. 18 min auf. Die Temperatur TOR1 im Bereich des "oberen Fensters" wies zum gleichen Zeitpunkt eine Temperatur von etwa 650°C auf. Das Wärmeschutzglasfenster zersprang nach 14 min 35 s (Tabelle 8) und damit ca. 1/2 min später als bei Versuch 5.

Die Bilder 34 und 35 zeigen die Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich. Die höchsten Temperaturen ergaben sich ebenfalls in der Mitte des Zwischenfassadenbereiches (TZ4, TZ7, TZ9). Die seitlich davon, im Bereich der vertikalen Abschottung angeordneten Meßstellen erreichten wesentlich niedrigere Temperaturen (TZ5, TZ6, TZ8, TZ10).

Bild 36 zeigt die Temperaturverläufe an der Innenseite der ESG-Verglasung. Es traten Temperaturen von maximal 950 °C an der unteren Meßstelle TZ3.1 auf. Die obere Meßstelle TZ3.3 hatte zu zur gleichen Zeit eine Temperatur von ca. 500 °C auf. Die untere ESG-Scheibe ging nach 16 min 38 s, die obere ESG-Scheibe nach 18 min 32 s (siehe Tabelle 8) im Bruchteil einer Sekunde schlagartig ohne vorherige Ribbildungsgerausche kaputt. Bis zum Zeitpunkt der Zerstörung waren wegen der starken Verrauchung im

Zwischenfassadenbereich und Rußablagerung auf der Scheibe fast keine Flammen hinter der Scheibe mehr erkennbar. Nach der Zerstörung der ESG Scheiben erfolgte ein Temperaturabfall an den Meßstellen TZ3.1 und TZ3.3.

Bild 37 zeigt die zeitlichen Verläufe der Temperaturen im Flur. Es traten Temperaturen bis zu 350°C bei geöffneter Brandraumtür und nach Öffnen der Flurtür zur Versuchshalle auf. Die Türen mußten bei diesem Versuch ebenfalls geöffnet werden, um eine ausreichende Ventilation bei geschlossenem Wärmeschutzglasfenster zur Aufrechterhaltung der Brandentwicklung zu erzielen.

Bild 38 zeigt die Temperaturverläufe im Nebenraum. Diese Temperaturen lagen unter 100°C.

Bild 39 zeigt ausgewählte Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich und an der ESG-Verglasung der Außenfassade.

Die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke  $p_{dyn}$ , die an der Zu- und Abluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches gemessen wurden, sind in Bild 40 dargestellt.

Bild 41 zeigt den Verlauf den hieraus errechneten Strömungsgeschwindigkeiten. Durch den geringeren Abstand zwischen Innen- und Außenfassade traten höhere Strömungsgeschwindigkeiten als bei Versuch 4 und 5 auf. Der Maximalwert betrug ca. 9,5 m/s in der Abluftöffnung.

Unter Berücksichtigung der Öffnungsfläche der Zu- und Abluftöffnung von jeweils 0,375 m<sup>2</sup> (siehe Tabelle 1) und unter Berücksichtigung einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit ergab sich der mittlere Volumenstrom für die Zu- und Abluftöffnung in Abhängigkeit der Luft- bzw. Rauchgastemperatur nach Bild 28. Durch die kleineren Querschnittsflächen in der Zu- und Abluftöffnung ergaben sich bei gleicher Brandlast kleinere Luft- und Rauchgasvolumenströme als bei Versuch 4 und 5. Der Maximalwert betrug

bei diesem Versuch ca. 11500 m<sup>3</sup>/h in der Abgasöffnung bei einer Abgastemperatur von 400°C bzw. ca. 4700 m<sup>3</sup>/h unter Normbedingungen.

Wie Bild 43 zeigt, stieg zu Beginn des Versuches die Abbrandrate bzw. die Wärmefreisetzung an, solange noch ausreichend Luft-sauerstoff zur Verbrennung vorhanden war. Anschließend fallen diese Werte wieder ab. Nach Öffnen der Flurtür zur Versuchshalle steigen die Werte wieder an. Es ergab sich eine maximale Abbrandrate von ca. 10 kg/min und eine maximale theoretische Wärmefreisetzung von ca. 2,9 MW.

Im Abgasstrom aus der Abluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches wurde aus dem Massenstrom, der Abgastemperatur und der spezifischen Wärmekapazität ein maximaler Enthalpiestrom von ca. 0,7 MW ermittelt.

Bild 44 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wärmestrahlung in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade. Der bei diesem Versuch gemessene Maximalwert von ca. 2,7 W/cm<sup>2</sup> würde nach /4/ sowohl für die Fremdentzündung (Entzündung mit Energiezufuhr von außen) als auch für die Selbstentzündung (Entzündung ohne Energiezufuhr von außen) von Holz und Textilien im oberen Stockwerk ausreichen.

Bild 45.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum. Man erkennt, daß nach Öffnen der Flurtür zur Versuchshalle nach ca. 8 min die Sauerstoffkonzentration nach einem Abfall wieder anstieg. Nach ca. 13 min fiel diese wieder ab und stieg nach ca. 16 min nach dem Zerspringen des Wärmeschutzglasfensters wieder an.

Bild 45.2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration in dem aus der Halle abgesaugten Abgasvolumenstrom.

#### 5.4 VERSUCH 7

Der Ablauf des Versuches wird in Tabelle 7 wiedergegeben. Die Fotos 1 bis 10 zeigen einige Details des Versuchsaufbaues und des Versuchsablaufes.

Bild 46 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im Brandraum. Aufgrund der vergrößerten Brandlast von 2 Brandlastpaletten (s. Foto 1) mußte die Brandraumtür geschlossen werden, um den angrenzenden Flur thermisch nicht zu sehr zu belasten. Um eine ausreichende Ventilation für die Brandentwicklung zu erreichen wurde das Wärmeschutzglasfenster im Brandraum gekippt. Hierdurch entstand eine Öffnungsfläche von ca. 0,15 m<sup>2</sup>. Der gekippte Fensterflügel fiel bereits nach 3 min 26 s, durch Lösen des durch Nieten im PVC-Rahmen befestigten Kippmechanismusses (Erweichung des PVC) in den Brandraum. Dadurch stand die gesamte Fensterfläche zur Ventilation zur Verfügung. Es ergab sich ein wesentlich schnellerer Anstieg der Brandraumtemperaturen und aufgrund der doppelten Brandlast weitaus höhere Temperaturen als bei den Versuchen 4, 5 und 6. Die Temperatur TB2 erreichte im Deckenbereich einen maximalen Wert von ca. 950°C. Nach 28 min 33 s wurde der Brand durch die Feuerwehr abgelöscht.

Bild 47 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade. Die höchste Temperatur von ca. 1100°C trat hierbei im Bereich der Oberkante der Fensteröffnung nach ca. 17 min auf. Die Temperatur TOR1 im Bereich des "oberen Fensters" erreichte nach 14 min eine Temperatur von 700 °C auf. Die ersten Flammen schlugen bereits nach 4 min 57 s aus dem Brandraum, 10 bis 15 Minuten früher als bei den Versuchen 4, 5 und 6 (s.a. Tabelle 8).

Die Bilder 48 und 49 geben den zeitlichen Temperaturverlauf im Zwischenfassadenbereich wieder. Die höchsten Temperaturen traten wiederum in der Mitte des Zwischenfassadenbereiches (TZ4, TZ7, TZ9) auf. Selbst an der oberen Meßstelle TZ9 trat noch eine Temperatur von 800°C auf. Die seitlich davon, im Bereich der ver-

tikalen Abschottung angeordneten Meßstellen erreichten wesentlich niedrigere Temperaturen (TZ5, TZ6, TZ8, TZ10). Nach 11 min 42 s waren ca. 0,5 m bis 0,7 m hohe Flammen oberhalb der Fassade erkennbar.

Bild 50 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe an der Innenseite der ESG-Verglasung. Es traten Temperaturen von bis zu 670°C an der unteren Meßstelle TZ3.1 und von bis zu 850°C an der oberen Meßstelle TZ3.3 auf. Die obere Scheibe zerplatzte nach 13 min 28 s. (siehe Tabelle 8) im Bruchteil einer Sekunde schlagartig ohne vorherige Rißbildungsgeräusche. Bis zum Zeitpunkt der Zerstörung waren wegen der starken Verrauchung im Zwischenfassadenbereich und Rußablagerung auf der Scheibe fast keine Flammen hinter der Scheibe mehr erkennbar. Die Temperatur an der Meßstelle TZ3.3 fiel nach dem Platzen der ESG-Scheibe um ca. 300°C ab. Nach 16 min 34 s begann die untere ESG-Scheibe sich plastisch zu verformen. Hierbei löste sich diese zunächst aus dem Quersprossen, sackte in sich etwas zusammen und wölbt sich nach innen in den Zwischenfassadenbereich. Zum gleichen Zeitpunkt stieg die Temperatur an der Meßstelle TZ3.3 wieder um ca. 150°C an. Während der gesamten Brandbelastung zerplatzte die untere ESG-Scheibe nicht. Selbst eine Wasserbesprühung durch die Feuerwehr nach 27 min 8 s führt zu keiner weiteren Zerstörung, mit der Ausnahme, daß das zunächst noch durchsichtige Glas durch feine Rißbildung undurchsichtig wurde. Nach dem Versuch ließ sich das Glas mit einer Eisenstange leicht zerstoßen.

Bild 51 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im Flur. Die Temperatur TF2 stieg nach Öffnen der Brandraumentür beim Löscheintritt durch die Feuerwehr nach 28 min 33 s sehr schnell von ca. 60°C auf 350°C an.

Bild 52 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im Nebenraum. Diese Temperaturen lagen unter 50°C.

Bild 53 zeigt ausgewählte Temperaturen im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich und an der

ESG-Verglasung der Außenfassade.

Die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke  $p_{dyn}$ , die an der Zu- und Abgasöffnung des Zwischenfassadenbereiches gemessen wurden, sind in Bild 54 dargestellt.

Bild 55 zeigt den Verlauf den hieraus errechneten Strömungsgeschwindigkeiten. Durch das frühzeitige Versagen des Wärmeschutzglasfensters und die doppelte Brandlast entstehen schon frühzeitig hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Zwischenfassadenbereich. Es trat eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von ca. 8,7 m/s in der Mitte der Abluftöffnung auf.

Unter Berücksichtigung der Öffnungsfläche der Zu- und Abluftöffnung von jeweils  $1,0 \text{ m}^2$  (siehe Tabelle 1) und unter Berücksichtigung einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit ergab sich der mittlere Volumenstrom für die Zu- und Abgasöffnung in Abhängigkeit der Luft- bzw. Rauchgastemperatur nach Bild 56. Der Maximalwert betrug bei diesem Versuch ca.  $29000 \text{ m}^3/\text{h}$  in der Abluftöffnung bei einer Abgastemperatur von  $549^\circ\text{C}$  bzw. ca.  $9600 \text{ m}^3/\text{h}$  unter Normbedingungen.

Nach Bild 57 beträgt die maximale Abbrandrate ca. 19 kg/min und die maximale theoretische Wärmefreisetzung ca. 5,3 MW.

Im Abgasstrom aus der Abluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches wurde aus dem Massenstrom, der Abgastemperatur und der spezifischen Wärmekapazität ein maximaler Enthalpiestrom von ca. 2 MW ermittelt.

Bild 58 gibt den zeitlichen Verlauf der Wärmestrahlung in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade wieder. Der bei diesem Versuch gemessene Maximalwert von  $3,98 \text{ W}/\text{cm}^2$  würde nach /4/ sowohl für die Fremdentzündung (Entzündung mit Energiezufuhr von außen) als auch für die Selbstentzündung (Entzündung ohne Energiezufuhr von außen) von Holz und Textilien im oberen Stockwerk ausreichen.

Bild 59.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum. Man erkennt, daß gegenüber den anderen Versuchen der Sauerstoffgehalt sehr stark abfiel und bis zu 2 Vol-% CO entstanden.

Bild 59.2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im aus der Halle abgesaugten Abgasvolumenstrom.

## 6. VERGLEICH DER BEI DEN VERSUCHEN ERMITTELTEN MESSWERTEN

In den Bildern 60 bis 73 sind ausgewählte Meßwerte aller 4 Versuche zum Vergleich dargestellt.

Aus dem Verlauf der Kurven ist zu erkennen, daß bei offener Fensteröffnung infolge des Versagens des Kippmechanismus des Wärmeschutzglasfensters in Versuch 7 auch bei geschlossener Brandraumtür relativ schnell hohe Temperaturen im Brandraum (Bild 60), im Fensterbereich (Bild 61, 62), am "oberen Fenster" (Bild 63), an der ESG-Verglasung (Bild 64, 65, 66) und im Zwischenfassadenbereich (Bild 67) auftreten. Bei der in Versuch 7 verwendeten doppelten Brandlastmenge ergaben sich im Vergleich mit Versuch 5 bei gleichem Abstand zwischen innerer und äußerer Fassade je nach Temperaturmeßstelle um 150°C bis 400°C höhere Temperaturen.

Durch Verringerung des Abstandes zwischen innerer und äußerer Fassade ergaben sich höhere Temperaturen insbesondere am "oberen Fenster", an der ESG-Verglasung (Bild 64, 65) und an der obersten Meßstelle im Zwischenfassadenbereich (Bild 67). Dies zeigt sich besonders bei Versuch 6 bei einem Abstand von 0,3 m. Diese Meßwerte belegen bereits eindrucksvoll, daß bei einem geringen Abstand zwischen innerer und äußerer Fassade die Gefahr eines Feuerüberschlages in darüberliegende Stockwerke sehr groß ist.

Die Bilder 68 und 69 zeigen den Vergleich der zeitlichen Ver-

läufe der Volumenströme in der Zu- und Abluft- bzw. Abgasöffnung des Zwischenfassadenbereiches bei den aktuellen Luft- bzw. Rauchgastemperaturen. Bild 70 zeigt die jeweiligen Maximalwerte der Abluftvolumenströme und die zur gleichen Zeit auftretenden Zuluftvolumenströme bei der jeweils aktuellen Temperatur.

Bild 71 zeigt diese Werte im Normzustand bei 0°C und 1,013 bar. Man erkennt in Bild 70, daß bei Vergrößerung der Brandlast in Versuch 7 gegenüber Versuch 5 bei gleichem Abstand durch die höheren Temperaturen größere Rauchgasvolumenströme auftreten. Durch Verringerung des Abstandes ergaben sich zum einen wegen der kleineren Strömungsquerschnitte, zum anderen wegen der höheren Reibungsverluste im Zwischenfassadenbereich geringere Volumenströme.

Der aus der Abbrandrate ermittelte freigesetzte konvektive Wärmestrom (Bild 72) nimmt ebenfalls bei geöffnetem Fenster schneller seinen Maximalwert an. Bei Verdoppelung der Brandlast ergab sich ungefähr der doppelte Wert der Wärmefreisetzung.

Bild 73 zeigt die am "oberen Fenster" maximal auftretenden Meßwerte für die Wärmestrahlung. Unter dem Diagramm sind einige Werte für die Bestrahlungsstärke nach /4/ aufgeführt, die zur Fremd- bzw. Selbstentzündung von Stoffen führen. Diese Meßwerte können als Kriterium dienen, um zu beurteilen ob zum Beispiel Gardinen hinter einem Fenster in einem darüberliegenden Stockwerk hinter dem Fenster der Innenfassade durch Wärmestrahlung entzündet werden. Man erkennt, daß durch Verringerung des Abstandes zwischen Innen- und Außenfassade sowie durch Vergrößerung der Brandlast die Wärmestrahlung stark zunimmt und die Gefahr einer Brandübertragung in darüberliegende Stockwerke größer wird. Bei gleichem Abstand (Versuch 5 und 7) führt die Verdoppelung der Brandlast zu einem 2,6-fachen Wert der Wärmestrahlung. Bei einem mit ca. 750 kg eingerichteten Wohnzimmer ist gegenüber einer Brandlast von ca. 300 kg bei 2 Brandlastpaletten noch mit weitaus höheren Werten zu rechnen. Dieses soll in weiteren Versuchen noch genauer untersucht werden. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß daher selbst der größte untersuchte

Abstand von 1,2 m nicht vor einer Brandübertragung in darüberliegende Stockwerke schützen würde.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Zur experimentellen Untersuchung der Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden im Zwischenfassadenbereich, sowie in benachbarte und darüberliegende Räume wurden Brandversuche in einer dafür errichteten Versuchseinrichtung mit Brandraum, Flur, Nebenraum und verfahrbarer Außenfassade durchgeführt.

In experimentellen Untersuchungen wurde der Ausschnitt einer Ganzflächendoppelfassade untersucht. Bei der Ganzflächendoppelfassade erfolgt die Luftführung im Fassadenzwischenraum über das gesamte Gebäude. Der Zwischenfassadenbereich weist abgesehen von den Randbereichen des Gebäudes keine vertikalen und horizontalen Abschottungen auf.

Die Außenfassade wurde in einem Teilbereich mit einer Einscheibensicherheitsverglasung in einem Aluminiumprofilssystem mit Glashalteleisten ausgeführt. Als Innenfassadenfenster (Brandraumfenster) wurde ein Wärmeschutzglasfenster mit PVC-Rahmen verwendet.

Gemessen wurden die zeitlichen Verläufe von Wärmefreisetzung, Temperaturen, Wärmestrahlung, dynamischer Druck, Strömungsgeschwindigkeiten, Luft- und Rauchgasvolumenströme und Gaskonzentrationen ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ) bei verschiedenen Abständen zwischen innerer und äußerer Fassade sowie unterschiedlichen Brandlasten.

Bei den Versuchen hat sich gezeigt, daß die Brandentwicklung in entscheidendem Maße von den Ventilationsöffnungen abhängt. Insbesondere bei dem für den Brandraum verwendeten Wärmeschutzglasfenster mit PVC-Rahmen hat sich gezeigt, daß im gekippten Zustand sich der Kippmechanismus durch Erweichen des PVC aus dem Rahmen lösen kann und schnell die volle Fensterfläche zur Ventilation des Brandes zur Verfügung steht. Dieses kleine Detail zeigt, daß konstruktive Eigenschaften der Fenster sowie die verwendeten Materialien einen entscheidenden Einfluß auf den

Brandverlauf haben können.

Durch die Auftriebsströmung im Zwischenfassadenbereich ergab sich durch die fehlenden horizontalen Abschottungen bei dem betrachteten Doppelfassadentyp eine schnelle Rauch- und Flammenausbreitung im Zwischenfassadenbereich, wobei die Flammenlängen noch das darüberliegende Stockwerk überschreiten können. Bei geschlossener Brandraumdür und geschlossenem (nicht gekippten) Wärmeschutzglasfenster hat sich gezeigt, daß die Brandentwicklung zum Erliegen kommt. Dieses hat sich an einem Abfall der Brandraumtemperaturen bemerkbar gemacht.

Weiterhin hat der Abstand zwischen Innen- und Außenfassade einen erheblichen Einfluß auf die Temperaturen im Zwischenfassadenbereich. Mit zunehmendem Abstand zwischen innerer und äußerer Fassade nimmt das Temperaturniveau im Zwischenfassadenbereich ab.

Bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen mit einer vertikalen Abschottung im Randbereich der Fassade traten im oberen Fensterbereich des Brandraumes wesentlich höhere Temperaturen als im Brandraum selbst auf.

An einem durch eine Wand angedeuteten Stockwerk über dem Brandraum traten an der Innenfassade Temperaturen und Wärmestrahlungen auf, welche z.B. zum Entzünden von Gardinen hinter einem Fenster ausreicht.

Selbst bei großen Abständen (hier 1,2 m) ist bei entsprechend großer Brandlast durch die hohen Temperaturen und großen Flammenlängen mit einem Feuerüberschlag in darüberliegende Stockwerke mit großer Wahrscheinlichkeit zu rechnen.

Es hat sich gezeigt, daß geschlossene Wärmeschutzglasfenster relativ lange einer Brandbelastung standhalten. Bei geschlossenem Fenster und geschlossenen Türen geht die Brandentwicklung und damit die Wärmefreisetzung nach einem Anstieg deutlich

zurück. Bei Versagen der Fenster fallen Scheibenstücke in den Brandraum und in den Zwischenfassadenbereich. Das Zerspringen des Wärmeschutzglases kündigt sich hierbei durch eine hörbare Rißbildung im Rahmenbereich an. Es fallen mehr oder weniger große scharfkantige Glasstücke in den Brandraum und den Zwischenfassadenbereich. Die Bruchstücke sind zwischen wenigen Quadratzentimetern und gesamter Scheibengröße groß, wobei zu bemerken ist, daß die großen Scheibenteile beim Aufprall auf den Boden in kleinere Stücke zerfallen.

Das Einscheibensicherheitsglas (ESG) geht im Gegensatz zum Wärmeschutzglas schlagartig ohne Rißbildungsgeräusche kaputt. Das Zerplatzen vollzieht sich in weniger als einer halben Sekunde. Wie die Versuche gezeigt haben, sind teilweise die ESG-Scheiben zu einem Zeitpunkt an einer Stelle kaputt gegangen, obwohl durch die starke Verrauchung fast keine Flammen hinter den Scheiben erkennbar waren. Durch die schlagartig heraustretenden Stichflammen sind Einsatzkräfte der Feuerwehr beim Anleitern und bei evtl. zu geringem Abstand zur Außenfassade enorm gefährdet. Beim Versagen der Scheiben fallen Bruchstücke sowohl in den Zwischenfassadenbereich als auch vor die Fassade.

Es hat sich weiterhin gezeigt, daß durch die Brandeinwirkung nicht zerstörte Scheiben mit stumpfen Schlagwerkzeugen nur sehr schwer zerstört werden können. Mit einer relativ stumpfen Eisenstange konnte die Scheibe nicht, mit einem Fäustel konnte die Scheibe erst nach zahlreichen Schlägen zerstört werden. Die Bruchstücke bei Einscheibensicherheitsglas sind zwischen ca.  $0,25 \text{ cm}^2$  und  $70 \text{ cm}^2$  groß. Die Gefahr einer Schnittverletzung ist durch die Glasstruktur bei ESG wesentlich geringer als bei Wärmeschutzglas. Wie die Versuche gezeigt haben, kann Einscheibensicherheitsglas unter bestimmten Bedingungen seine Vorspannung verlieren. Die Scheibe kann sich dann ohne Rißstruktur plastisch deformieren.

Durch das hohe Temperaturniveau im Zwischenfassadenbereich ist insbesondere bei großen Brandlasten und Feuerüberschlag in dar-

überliegende Stockwerke mit einem großflächigen Versagen der Außenfassade zu rechnen, wobei nicht nur das Einscheibensicherheitsglas versagen kann sondern auch Teile des Aluminiumprofilsystems schmelzen können und dadurch Glasscheiben nicht mehr gehalten werden können.

Weiterhin wurde festgestellt, daß es beim Öffnen der Brandraumtür beim Löscheinsatz durch die Feuerwehr zu einer starken Ver Rauchung der angrenzenden Räume und Flure kommt.

Nach dem jetzigen Kenntnisstand ist bei einer Ganzflächendoppelfassade unbedingt eine automatische Sprinkler- oder Wassernebellöschanlage in den Räumen einzubauen, um eine schnelle und große Rauch- und Wärmefreisetzung zu verhindern. Durch frühzeitiges Auslösen der Löschanlage kann verhindert werden, daß die Verglasung der Innenfassade versagt. Dadurch kann verhindert werden, daß Flammen in den Zwischenfassadenbereich schlagen bzw. daß große Mengen an Rauchgasen in andere Stockwerke gelangen.

## 8. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Kunkelmann, J.: Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung.  
Teil 1: - Literaturlauswertung  
- Einflußgrößen auf die Brand- und Rauchausbreitung  
- Brandversuche  
Forschungsbericht Nr. 100 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1996)
- /2/ Bohl W.: Technische Strömungslehre  
Vogelbuch-Verlag, 6. Auflage,  
Würzburg, 1984
- /3/ VDI: VDI-Wärmeatlas  
VDI-Verlag, 7. Auflage,  
Düsseldorf, 1994
- /4/ Seeger P.G.: Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion bei Bränden in Flüssiggaslagern.  
VFDB-Zeitschrift, 1/87  
Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart

9. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1: Versuchsaufbauten und Versuchsparameter

| Versuch | Brandraum   | Innenfassade  | Zwischenfassadenbereich   | Außenfassade  |
|---------|---|---|---|---|
| 4       | 1 Brandlastpalette (incl. 1 Zündwanne u. 1 Zündkrippe), Ansaugung von Verbrennungsluft über Ventilationsöffnungen (Türen und Fenster) sowie über den Spalt zwischen Plattform der Abbrandwaage und Brandraumwänden Brandraum- und Flurtür: 1985mm * 985mm (1,96m <sup>2</sup> )                     | PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum, geschlossen (4-16-4, k=1,5 W/m <sup>2</sup> K, (Rahmen:Höhe:1350mm, Breite:1050mm (1,42m <sup>2</sup> ); Glas:Höhe:1160mm, Breite:860mm (1m <sup>2</sup> )<br>2. Geschoß durch fassadenseitige Wand angedeutet | vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandenschutzbauplatten | Abstand:1,2m<br>Material:<br>Silikat-Brandenschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofilssystem mit Glashalteleisten (Breite: 1050mm, Höhe: 3100mm, Material: AlMgSi0,5F22), ESG-Scheibe 2-teilig, jeweils Breite: 946mm, Höhe:1468 mm (2*1,39m <sup>2</sup> =2,78m <sup>2</sup> ), 8mm stark<br>Verglasungsgummi: EPDM (Ethylen/Propylen-Dien-Terpolymer)<br>Zuluftöffnung: 0,3m * 5m (1,5m <sup>2</sup> )<br>Abluftöffnung: 0,3m * 5m (1,5m <sup>2</sup> ) |
| 5       | 1 Brandlastpalette (incl. 1 Zündwanne u. 1 Zündkrippe), Ansaugung von Verbrennungsluft über Ventilationsöffnungen (Türen und Fenster) sowie über den Spalt zwischen Plattform der Abbrandwaage und Brandraumwänden, Öffnungszeiten von Brandraum- und Flurtür: 1985mm * 985mm (1,96m <sup>2</sup> ) | PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum, geschlossen (4-16-4, k=1,5 W/m <sup>2</sup> K, (Rahmen:Höhe:1350mm, Breite:1050mm (1,42m <sup>2</sup> ); Glas:Höhe:1160mm, Breite:860mm (1m <sup>2</sup> )<br>2. Geschoß durch fassadenseitige Wand angedeutet | vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandenschutzbauplatten | Abstand:0,8m<br>Material:<br>Silikat-Brandenschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofilssystem mit Glashalteleisten (Breite: 1050mm, Höhe: 3100mm, Material: AlMgSi0,5F22), ESG-Scheibe 2-teilig, jeweils Breite: 946mm, Höhe:1468 mm (2*1,39m <sup>2</sup> =2,78m <sup>2</sup> ), 8mm stark<br>Verglasungsgummi: EPDM (Ethylen/Propylen-Dien-Terpolymer)<br>Zuluftöffnung: 0,2m * 5m (1m <sup>2</sup> )<br>Abluftöffnung: 0,2m * 5m (1m <sup>2</sup> )     |

|          |  |   |  |  |
|----------|--|---|--|--|
| <p>6</p> | <p>1 Brandlastpalette (incl. 1 Zündwanne u. 1 Zündkrippe), Ansaugung von Verbrennungsluft über Ventilationsöffnungen (Türen und Fenster) sowie über den Spalt zwischen Plattform der Abbrandwaage und Brandraumwänden, Öffnungszeiten von Brandraum- und Flurtür: 1985mm * 985mm (1,96m<sup>2</sup>)</p> | <p>PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum, geschlossen (4-16-4, k=1,5 W/m<sup>2</sup>K, (Rahmen:Höhe:1350mm, Breite:1050mm (1,42m<sup>2</sup>); Glas:Höhe:1160mm, Breite:860mm (1m<sup>2</sup>)<br/>2. Geschoß durch fassadenseitige Wand angedeutet</p>                                 | <p>vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandenschutzbauplatten</p> | <p>Abstand:0,3m<br/>Material: Silikat-Brandenschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofilsystem mit Glashalteleisten (Breite: 1050mm, Höhe: 3100mm, Material: AlMgSi0,5F22), ESG-Scheibe 2-teilig, jeweils Breite: 946mm, Höhe:1468 mm (2*1,39m<sup>2</sup>=2,78m<sup>2</sup>), 8mm stark<br/>Verglasungsgummi: EPDM (Ethylen/Propylen-Dien-Terpolymer)<br/>Zuluftöffnung: 0,075m * 5m (0,375m<sup>2</sup>)<br/>Abluftöffnung: 0,075m * 5m (0,375m<sup>2</sup>)</p> |
| <p>7</p> | <p>2 Brandlastpaletten (incl. 2 Zündwannen u. 2 Zündkrippen), Ansaugung von Verbrennungsluft über Ventilationsöffnung (Fenster) sowie über den Spalt zwischen Plattform der Abbrandwaage und Brandraumwänden, Brandraum- und Flurtür: 1985mm * 985mm (1,96m<sup>2</sup>)</p>                             | <p>PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum, gekippt (Öffnungsfläche: 0,15m<sup>2</sup>), (4-16-4, k=1,5 W/m<sup>2</sup>K, Rahmen:Höhe:1350mm, Breite:1050mm (1,42m<sup>2</sup>); Glas:Höhe:1160mm, Breite:860mm (1m<sup>2</sup>)<br/>2. Geschoß durch fassadenseitige Wand angedeutet</p> | <p>vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandenschutzbauplatten</p> | <p>Abstand:0,8m<br/>Material: Silikat-Brandenschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofilsystem mit Glashalteleisten (Breite: 1050mm, Höhe: 3100mm, Material: AlMgSi0,5F22), ESG-Scheibe 2-teilig, jeweils Breite: 946mm, Höhe:1468 mm (2*1,39m<sup>2</sup>=2,78m<sup>2</sup>), 8mm stark<br/>Verglasungsgummi: EPDM (Ethylen/Propylen-Dien-Terpolymer)<br/>Zuluftöffnung: 0,2m * 5m (1m<sup>2</sup>)<br/>Abluftöffnung: 0,2m * 5m (1m<sup>2</sup>)</p>             |

**Tabelle 2: Heizwerte und Einzelmassen des Brandgutes**  
 (1 bzw. 2 Brandlastpaletten [in eckigen Klammern])

| Stoff  | Heizwert $H_u$<br>MJ/kg | Masse<br>kg                 | Massenanteil |
|--|-------------------------|-----------------------------|--------------|
| Holz <sup>1</sup>                            | 16                      | 152,1 [304,2]               | 0,912        |
| Styropor<br>(PS 15 SE)                       | 40                      | 3,2 [6,4]                   | 0,019        |
| Linoleum                                     | 19                      | 8,8 [17,6]                  | 0,053        |
| Nadelfilz-<br>teppichboden<br>(Polypropylen) | 43                      | 1,1 [2,2]                   | 0,007        |
| Vorhang<br>50 % Baumwolle<br>50 % Polyester  | 20                      | 1,1                         | 0,007        |
| n-Heptan                                     | 44,7                    | 0,35 (0,51)<br>[0,7 (1,01)] | 0,002        |
| <b>Mittlerer<br/>Heizwert bzw.<br/>Summe</b> | 16,9                    | 166,7 [332,2]               | 1            |

<sup>1</sup> Holzfeuchte zwischen 7% und 8,5 %

Tabelle 3: Meßstellenliste

| Meßstellen-<br>bezeichnung | Versuchs-<br>Nr. | Position der Meßstellen  |
|----------------------------|------------------|--|
| ΔM                         | 4,5,6,7          | Abbrandwaage - Brandraumboden  |
|                            |                  | Prandtl-Rohre (dynamischer Druck,<br>Strömungsgeschwindigkeit)   |
| p1                         | 4,5,6,7          | Zuluftöffnung für Zwischenfassaden-<br>bereich<br>Blick auf die Fassade - links,<br>Mitte der Öffnung  |
| p2                         | 4,5,6,7          | Zuluftöffnung für Zwischenfassaden-<br>bereich<br>Blick auf die Fassade - Mitte,<br>Mitte der Öffnung  |
| p3                         | 4,5,6,7          | Zuluftöffnung für Zwischenfassaden-<br>bereich<br>Blick auf die Fassade - rechts,<br>Mitte der Öffnung   |
| p4                         | 4,5,6,7          | Abluftöffnung für Zwischenfassaden-<br>bereich<br>Blick auf die Fassade - links,<br>Mitte der Öffnung  |
| p5                         | 4,5,6,7          | Abluftöffnung für Zwischenfassaden-<br>bereich<br>Blick auf die Fassade - Mitte,<br>Mitte der Öffnung  |
| p6                         | 4,5,6,7          | Abluftöffnung für Zwischenfassaden-<br>bereich<br>Blick auf die Fassade - rechts,<br>Mitte der Öffnung   |
| WSA                        | 4,5,6,7          | Wärmestrahlungsaufnehmer<br>(Typ: Gardon, Sichtwinkel: 180°)<br>Sensor bündig mit Oberfläche der Innen-<br>fassade, Mitte der oberen, durch Sili-<br>kat-Brandschutzbauplatte verschlossenen<br>Fensteröffnung, im Bereich von Tempera-<br>turmeßstelle TOR1 |
|                            |                  | Temperaturmeßstellen   |
| TB1                        | 4,5,6,7          | Brandraum, zentral im Raum in 1,5m Höhe  |
| TB2                        | 4,5,6,7          | Brandraum, zentral im Raum 5 cm unter<br>der Decke   |

| zu Tabelle 3               |                  |  |
|----------------------------|------------------|--|
| Meßstellen-<br>bezeichnung | Versuchs-<br>Nr. | Position der Meßstellen  |
|                            |                  | <b>Temperaturmeßstellen</b>  |
| TB3                        | 4,5,6,7          | <b>Brandraum, Oberkante Tür, Mitte</b>   |
| TBF2                       | 4,5,6,7          | <b>Brandraum, Fenster, innen, 5 cm unter Oberkante des Rahmens, 5 cm entfernt vom rechten (Blick auf die Fassade) Rahmen</b>   |
| TBFi                       | 4,5,6,7          | <b>Brandraum, Fenster, innen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze in kleiner Bohrung im Rahmen direkt neben dem Glas</b>  |
| TBFa                       | 4,5,6,7          | <b>Zwischenfassadenbereich, Fenster, außen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze in kleiner Bohrung im Rahmen direkt neben dem Glas</b>                                |
| TOR1                       | 4,5,6,7          | <b>Zwischenfassadenbereich, Mitte der oberen, durch Silikat-Brandschutzbauplatte verschlossenen Fensteröffnung, Oberfläche der Innenfassade</b>  |
| TZ1                        | 4,5,6,7          | <b>Temperatur an Zuluftöffnung (Umgebungstemperatur), Mitte der Außenfassade im Bereich von Prandtl-Rohr p2</b>  |
| TZ2                        | 7                | <b>Zwischenfassadenbereich, Unterkante des Brandraumfensters, Mitte, 20 cm vor Innenfassade</b>  |
| TZ3                        | 5,6,7            | <b>Zwischenfassadenbereich, Oberfläche des Brandraumfensters, zentral</b>  |
| TZ3.1                      | 4,5,6,7          | <b>Zwischenfassadenbereich, Oberfläche der Außenfassade, zentral gegenüber Brandraumfenster</b>  |
| TZ3.2                      | 4,5,6,7          | <b>Zwischenfassadenbereich, Oberfläche der Außenfassade, gegenüber Brandraumfenster Oberkante Mitte</b>  |
| TZ3.3                      | 4,5,6,7          | <b>Zwischenfassadenbereich, Oberfläche der Außenfassade, zentral, gegenüber der oberen, durch Silikat-Brandschutzbauplatte verschlossenen Fensteröffnung (gegenüber Meßstelle WSA)</b> |
| TZ4                        | 4,5,6,7          | <b>Zwischenfassadenbereich, Oberkante des Brandraumfensterrahmens, Mitte, 20 cm vor Innenfassade</b>   |

| zu Tabelle 3               |                  |  |
|----------------------------|------------------|--|
| Meßstellen-<br>bezeichnung | Versuchs-<br>Nr. | Position der Meßstellen  |
|                            |                  | <b>Temperaturmeßstellen</b>  |
| TZ5                        | 4,5,6,7          | Zwischenfassadenbereich, Oberkante des Brandraumfensters, links, 10 cm vor vertikaler Abschottung, 20 cm vor Innenfassade                |
| TZ6                        | 4,5,6,7          | Zwischenfassadenbereich, Oberkante des Brandraumfensters, rechts <sup>2</sup> , 10 cm vor vertikaler Abschottung, 20 cm vor Innenfassade |
| TZ7                        | 4,5,6,7          | Zwischenfassadenbereich, Unterkante des "oberen Fensters" (s.Bem. TOR1), Mitte, 20 cm vor Innenfassade                                   |
| TZ8                        | 4,5,6,7          | Zwischenfassadenbereich, Oberkante der Außenfassade, links, im Bereich von Prandtl-Rohr p4   |
| TZ9                        | 4,5,6,7          | Zwischenfassadenbereich, Oberkante der Außenfassade, Mitte, im Bereich von Prandtl-Rohr p5   |
| TZ10                       | 4,5,6,7          | Zwischenfassadenbereich, Oberkante der Außenfassade, rechts, im Bereich von Prandtl-Rohr p6  |
| TF1                        | 4,5,6,7          | Flur, Brandraumtür, Mitte, Höhe 1,5 m  |
| TF2                        | 4,5,6,7          | Flur, zentral im Raum, 5 cm unter der Decke  |
| TF3                        | 4,5,6,7          | Flur, zentral im Raum in 1,5 m Höhe  |
| TF4                        | 4,5,6,7          | Flur, Tür zur Halle, Oberkante, Mitte  |
| TF5                        | 4,5,6,7          | Flur, Tür zum Nebenraum, Oberkante, Mitte  |
| TN1                        | 4,5,6,7          | Nebenraum, Tür, Mitte, Höhe 1,5 m  |
| TN2                        | 4,5,6,7          | Nebenraum, zentral im Raum, 5 cm unter der Decke   |
| TN3                        | 4,5,6,7          | Nebenraum, zentral im Raum, Höhe 1,5 m   |

| zu Tabelle 3               |                  |  |
|----------------------------|------------------|--|
| Meßstellen-<br>bezeichnung | Versuchs-<br>Nr. | Position der Meßstellen  |
|                            |                  | <b>Gaskonzentrationen</b>  |
| O <sub>2</sub> B           | 4,5,6,7          | Brandraum - Sauerstoffkonzentration,<br>zentral im Raum in 1,5 m Höhe        |
| CO <sub>2</sub> B          | 4,5,6,7          | Brandraum - Kohlendioxidkonzentration,<br>zentral im Raum in 1,5 m Höhe      |
| COB                        | 4,5,6,7          | Brandraum - Kohlenmonoxidkonzentration,<br>zentral im Raum in 1,5 m Höhe     |
| O <sub>2</sub> A           | 5,6,7            | Sauerstoffkonzentration im aus der<br>Halle abgesaugten Abgasvolumenstrom    |
| CO <sub>2</sub> A          | 5,6,7            | Kohlendioxidkonzentration im aus der<br>Halle abgesaugten Abgasvolumenstrom  |
| COA                        | 5,6,7            | Kohlenmonoxidkonzentration im aus der<br>Halle abgesaugten Abgasvolumenstrom |

Tabelle 4: Versuch 4 - Versuchsablauf

| Versuchszeit<br>min : s | Bemerkungen   |
|-------------------------|---|
| 0 : 00                  | Zündung, (rechte Seite der Brandlastpalette, 1 Zündwanne, 1 Zündkrippe), Brandraumtür geöffnet, Tür zum Nebenraum und Flurtür zur Versuchshalle ist geschlossen, Brandraumfenster geschlossen |
| 3 : 00                  | Rechte Vorhanghälfte beginnt an Vorhangschiene zu schmelzen, Brandraumbenachteiligungsfenster beginnt durch Wasserdampf aus dem Verbrennungsvorgang zu beschlagen                             |
| 4 : 54                  | leichte Rauchentwicklung an der Oberkante des Wärmeschutzglasfensterrahmens   |
| 6 : 04                  | leichte Rauchentwicklung an der Unterkante des Wärmeschutzglasfensterrahmens  |
| 7 : 32                  | leichte Rauchentwicklung ca. 0,5 m unter dem Fenster durch Mauerfuge  |
| ca. 8 : 00              | Vorhang vollständig heruntergefallen  |
| 9 : 40                  | Flurtür zur Versuchshalle wird wegen abfallender Brandraumtemperatur geöffnet   |
| 9 : 59                  | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)   |
| 10 : 15                 | Abnehmende Rauchentwicklung   |
| 13 : 30                 | Zunehmende Rauchentwicklung   |
| 14 : 44                 | Oberkante des PVC-Fensterrahmens entzündet sich auf der Brandraumseite  |
| 14 : 47                 | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)   |
| ca. 16                  | Brennender PVC-Fensterrahmen erlischt wieder, relativ starke Rauchentwicklung (weiß)  |
| 17 : 40                 | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)   |
| 18 : 27                 | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)   |
| 18 : 40                 | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)   |
| 18 : 56                 | Linke Hälfte der Brandlastpalette wird durch brennenden Bodenbelag entzündet  |

| zu Tabelle 4 |  |
|--------------|--|
| 19 : 30      | Brandraum total verqualmt, keine Flammen durch Brandraumbenachachtungsfenster erkennbar  |
| 19 : 43      | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)  |
| 20 : 10      | Scheibenstück der Innenscheibe des Wärmeschutzglasfensters fällt in den Brandraum  |
| 20 : 24      | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)  |
| 20 : 40      | Erste Flammen oben aus dem Brandraumfenster  |
| 20 : 43      | Scheibenstück des Brandraumfensters (Wärmeschutzglasfenster) fällt in Zwischenfassadenbereich  |
| 20 : 46      | Größere Scheibenstücke des Wärmeschutzglasfensters fallen in den Zwischenfassadenbereich, starke Flammenentwicklung im Zwischenfassadenbereich, starke schwarze Rauchentwicklung, nur noch unteres Drittel der unteren ESG-Scheibe erkennbar, Flammen im Brandraum durch Brandraumbenachachtungsfenster wieder erkennbar, Flurtür wird wieder geschlossen, Flammenspitzen aus Brandraum erreichen ESG-Verglasung |
| 21 : 16      | Weitere Scheibenstücke des Wärmeschutzglasfensters fallen in den Zwischenfassadenbereich   |
| 22 : 19      | Nicht brennendes PVC-Stück des Fensterrahmens fällt in Zwischenfassadenbereich   |
| 22 : 38      | Weitere Teile des Fensterrahmens fallen brennend in den Zwischenfassadenbereich, dadurch auch Rauchentwicklung unterhalb des Brandraumfensters   |
| ca. 24       | Nachlassende Flammenerscheinung aus dem Brandraumfenster   |
| ca. 30       | Keine Flammen mehr aus Brandraumfenster, keine Beschädigungen an Verglasung der Außenfassade, jedoch stark mit Ruß geschwärzt, Bruchstücke der Wärmeschutzverglasung zwischen 10 cm <sup>2</sup> bis 500 cm <sup>2</sup> groß, wobei allerdings durch den Spannungsverlauf im Wärmeschutzglasfenster weitaus größere Teile entstehen, die durch den Aufprall zerkleinert werden                                  |

Tabelle 5: Versuch 5 - Versuchsablauf

| Versuchszeit<br>min : s | Bemerkungen  |
|-------------------------|--|
| 0 : 00                  | Zündung (rechte Seite der Brandlastpalette, 1 Zündwanne, 1 Zündkrippe), Brandraumtür geöffnet, Tür zum Nebenraum und Flurtür zur Versuchshalle ist geschlossen, Brandraumfenster geschlossen |
| 3 : 46                  | Leichter Rauch im Zwischenfassadenbereich  |
| 3 : 52                  | Rechte Vorhanghälfte beginnt an Vorhangschiene zu schmelzen, Brandraumbeobachtungsfenster beginnt durch Wasserdampf aus dem Verbrennungsvorgang zu beschlagen                                |
| 5 : 01                  | Rechte Vorhanghälfte fällt herunter, kurze Zeit später keine Details im Brandraum durch Beobachtungsfenster wegen Beschlagens mehr erkennbar, nur noch Flammenerscheinung erkennbar          |
| 7 : 35                  | Flurtür zur Versuchshalle wird wegen abfallender Brandraumtemperatur geöffnet, Sicht in den Brandraum wird kurzzeitig etwas besser, rechter Teil der Brandlastpalette noch nicht entzündet   |
| 9 : 33                  | Durch Umfallen der Zündkrippe wird Bodenbelag auf Brandlastpalette entzündet   |
| 9 : 45                  | Abnehmende Rauchentwicklung im Fensterbereich (Zwischenfassadenbereich)  |
| 10 : 40                 | Rauchentwicklung kommt bis zu diesem Zeitpunkt fast vollständig zum Erliegen   |
| 11 : 30                 | Rauchentwicklung nimmt wieder zu   |
| 9 : 28 -<br>11 : 45     | Absenkung der Rauchsicht, Oberkante der Krippen noch erkennbar   |
| 12 : 06                 | Rauchsicht hat Brandlastpalettenplattform erreicht, Flammenerscheinung im rechten Brandlastpalettenbereich durch Beobachtungsfenster noch erkennbar  |
| 12 : 10                 | Stärkere Rauchentwicklung  |
| 12 : 16                 | Rauch an Fassadenoberkante   |
| 12 : 40                 | Feuererscheinung im Brandraum durch Beobachtungsfenster wegen starker Verqualmung fast nicht mehr erkennbar  |
| 12 : 47                 | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)  |

| zu Tabelle 5 |   |
|--------------|---|
| 12 : 55      | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)   |
| 13 : 05      | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)   |
| 13 : 21      | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)   |
| 13 : 28      | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters), kleines Scheibenstück fällt in Zwischenfassadenbereich   |
| 13 : 38      | Feuererscheinung im Brandraum durch Beobachtungsfenster nicht mehr erkennbar  |
| 13 : 53      | Erste Flammen an der Oberkante des Brandraumfensters  |
| 14 : 01      | Scheibenstücke des Wärmeschutzglasfensters fallen in den Brandraum  |
| 14 : 13      | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)   |
| 14 : 17      | Weitere kleinere Scheibenstücke des Wärmeschutzglasfensters fallen in den Zwischenfassadenbereich   |
| 14 : 43      | Weitere größere Scheibenstücke des Wärmeschutzglasfensters fallen in den Zwischenfassadenbereich  |
| 14 : 45      | Innen- und Außenscheibe des Wärmeschutzglasfensters vollständig zerstört, Feuererscheinung durch Brandraumbeobachtungsfenster wieder erkennbar, auch linker Teil der Brandlastpalette brennt  |
| 14 : 51      | Oberkante der Holzkrippen durch Brandraumbeobachtungsfenster wieder erkennbar   |
| 14 : 58      | Weitere größere Scheibenstücke des Wärmeschutzglasfensters fallen in den Zwischenfassadenbereich  |
| ca. 15 : 00  | Flammen sind nur noch durch die untere ESG-Scheibe erkennbar, darüber totale Verqualmung und Schwärzung der ESG-Scheibe mit Ruß   |
| 15 : 16      | Flurtür wird geschlossen, Absenkung der Rauchsicht im Brandraum, Feuererscheinung nur noch schwach erkennbar  |
| ca. 15 : 28  | Starke Flammenentwicklung, Flammen erreichen ESG-Verglasung, Flammenerscheinung bedeckt den größten Teil des Brandraumfensters, im Bereich von ca. 20 cm ab Unterkante des Brandraumfensters nach oben sind keine Flammen erkennbar |

| zu Tabelle 5 |   |
|--------------|---|
| 15 : 40      | Feuererscheinung durch Brandraumfenster wegen starker Verqualmung nicht mehr erkennbar  |
| 16 : 10      | Flammen sind nur noch durch das untere Drittel der unteren ESG-Scheibe erkennbar, darüber totale Verqualmung  |
| 16 : 40      | Flammen sind nur noch durch das untere Viertel der unteren ESG-Scheibe erkennbar, darüber totale Verqualmung  |
| 17 : 17      | Wärmespannungen im Rahmenbereich der ESG-Verglasung akustisch wahrnehmbar   |
| 18 : 13      | Wärmespannungen im Rahmenbereich der ESG-Verglasung akustisch wahrnehmbar   |
| 18 : 15      | Wärmespannungen im Rahmenbereich der ESG-Verglasung akustisch wahrnehmbar   |
| 19 : 22      | Obere ESG-Scheibe geht schlagartig im Bruchteil einer Sekunde vollständig kaputt, der größte Teil fällt vor die Außenfassade, ein Teil fällt in den Zwischenfassadenbereich, visuell keine wesentliche Änderung der Flammenerscheinung im Bereich des Brandraumfensters nach Zerstörung der ESG-Scheibe erkennbar   |
| 20 : 15      | Oberkante der Fassade durch Rauch nicht mehr erkennbar  |
| 20 : 30      | Abnehmende Flammenerscheinung aus dem Brandraum   |
| 27 : 40      | Keine Flammen mehr aus Brandraumfenster, Aluminiumrahmen der ESG-Verglasung durch Brandbelastung leicht verzogen, Dichtungsprofile teilweise angeschmolzen, insbesondere bei der oberen ESG-Scheibe, untere durch Brand nicht zerstörte ESG-Scheibe läßt sich nur sehr schwer mechanisch zerstören: kein Erfolg mit Eisenstange, bei Verwendung eines Fäustels zerspringt die Scheibe nach dem 13. Schlag, ESG-Bruchstücke der durch den Brand zerstörten Scheiben nach dem Aufprall auf dem Boden im Bereich zwischen 0,5 cm <sup>2</sup> und 100 cm <sup>2</sup> groß, Bruchstücke der Wärmeschutzverglasung zwischen 10 cm <sup>2</sup> bis 500 cm <sup>2</sup> groß, wobei allerdings durch den Spannungsverlauf im Wärmeschutzglasfenster weitaus größere Teile entstehen, die durch den Aufprall auf dem Boden zerkleinert werden |

Tabelle 6: Versuch 6 - Versuchsablauf

| Versuchszeit<br>min : s | Bemerkungen  |
|-------------------------|--|
| 0 : 00                  | Zündung (rechte Seite der Brandlastpalette, 1 Zündwanne, 1 Zündkrippe), Brandraumtür geöffnet, Tür zum Nebenraum und Flurtür zur Versuchshalle ist geschlossen, Brandraumfenster ist geschlossen |
| 3 : 03                  | Rechte Vorhanghälfte auf der Seite der Zündkrippe beginnt zu schrumpfen  |
| 3 : 06                  | Im Bereich der Oberkante des Brandraumfensters tritt Rauch in den Zwischenfassadenbereich  |
| 3 : 15                  | Rechte Vorhanghälfte auf der Seite der Zündkrippe löst sich von der Vorhangschiene (Vorhangstoff schmilzt)   |
| 3 : 43                  | Rechte Vorhanghälfte fällt herunter  |
| 4 : 42                  | Linke Vorhanghälfte fällt herunter   |
| 4 : 45                  | Brandraumbenachteiligungsfenster beginnt durch Wasserdampf aus dem Verbrennungsvorgang zu beschlagen   |
| 5 : 00                  | Nur noch Flammerscheinung ohne feste Konturen erkennbar  |
| 6 : 40                  | Konturen der Brandlastpalette und des PVC-Fensters durch Brandraumbenachteiligungsfenster wieder schwach erkennbar   |
| 7 : 25                  | Zündkrippe fällt zusammen  |
| 7 : 30                  | Konturen verschwinden wieder durch Absenkung der Rauchsicht im Brandraum   |
| 8 : 00                  | Abnehmende Flammerscheinung, rechter Teil der Brandlastpalette noch nicht entzündet, Flurtür zur Versuchshalle wird wegen abfallender Brandraumtemperatur geöffnet                               |
| 8 : 50                  | Abnehmende Rauchentwicklung in oberen Brandraumfensterbereich  |
| 11 : 00                 | Wieder zunehmende Flammerscheinung an Brandraumbenachteiligungsfenster, Konturen der Holzkrippen werden wieder sichtbar, leichter Rauch durch Mauerfugen unterhalb des Brandraumfensters         |
| 12 : 10                 | Zunehmende Rauchentwicklung im Zwischenfassadenbereich   |
| 12 : 46                 | Rauchsicht hat Plattform der Brandlastpalette wieder erreicht  |

| zu Tabelle 6 |  |
|--------------|--|
| 13 : 30      | Stärkere Rauchentwicklung im Zwischenfassadenbereich   |
| 13 : 14      | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)  |
| 13 : 30      | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)  |
| 13 : 45      | Knallartiges Geräusch (Rißbildung in Scheibe des Wärmeschutzglasfensters)  |
| 14 : 00      | Keine Flammenerscheinung im Brandraum mehr erkennbar   |
| 14 : 14      | Scheibenstücke des Wärmeschutzglasfensters (Brandraumfenster) fallen in den Zwischenfassadenbereich  |
| 14 : 35      | Erste kleine Flammen aus dem Brandraumfenster  |
| 15 : 03      | Größere Scheibenstücke des Wärmeschutzglasfensters fallen in den Zwischenfassadenbereich, größere Flammen aus dem Brandraumfenster   |
| 15 : 18      | Großes Scheibenstück des Wärmeschutzglasfensters kippt in den Zwischenfassadenbereich und stützt sich an der Außenfassade ab   |
| 15 : 30      | Flammenerscheinung durch Brandraumfenster wieder erkennbar, auch linker Teil der Brandlastpalette brennt, Flurtür wird geschlossen   |
| 15 : 42      | Gekipptes Scheibenstück fällt in den Zwischenfassadenbereich   |
| 16 : 10      | Weitere Scheibenstücke des Wärmeschutzglasfensters fallen in den Zwischenfassadenbereich   |
| 16 : 18      | Starke Flammenentwicklung im Zwischenfassadenbereich   |
| 16 : 20      | Oberkante der Außenfassade ist wegen starker Verqualmung nicht mehr erkennbar  |
| 16 : 38      | Untere ESG-Scheibe geht nach dumpfem Knall schlagartig im Bruchteil einer Sekunde ohne vorherige Geräusche z.B. durch Rißbildung kaputt - vor der Zerstörung ist durch die starke Verqualmung und der durch Ruß geschwärzten Scheibe fast keine Flammenerscheinung durch die ESG-Scheibe erkennbar |
| 16 : 54      | Abschmelzendes PVC-Stück des Fensterrahmens fällt in den Zwischenfassadenbereich, helle Leuchterscheinung am Rahmen der ESG-Verglasung - neben dem brennenden Dichtungsmaterial wahrscheinlich auch brennende Schmelze der Leichtmetalllegierung   |

| zu Tabelle 6 |  |
|--------------|--|
| 18 : 32      | Obere ESG-Scheibe geht nach dumpfem Knall schlagartig im Bruchteil einer Sekunde ohne vorherige Geräusche z.B. durch Rißbildung kaputt - wegen der starken Verqualmung im oberen Bereich der Außenfassade ist das Zerplatzen nur akustisch wahrnehmbar   |
| 18 : 40      | Abnehmende Flammenerscheinung  |
| 22 : 26      | Letzte Flammen aus dem Brandraumfenster nach Ablösen durch die Feuerwehr, ESG-Bruchstücke der durch den Brand zerstörten Scheiben nach dem Aufprall auf dem Boden im Bereich zwischen 0,5 cm <sup>2</sup> und 100 cm <sup>2</sup> groß, Bruchstücke der Wärmeschutzverglasung zwischen 10 cm <sup>2</sup> bis 500 cm <sup>2</sup> groß, wobei allerdings durch den Spannungsverlauf im Wärmeschutzglasfenster weitaus größere Teile entstehen, die durch den Aufprall zerkleinert werden |

Tabelle 7: Versuch 7 - Versuchsablauf

| Versuchszeit<br>min : s | Bemerkungen   |
|-------------------------|---|
| 0 : 00                  | Zündung (rechte Seite der Brandlastpaletten, 2 Zündwannen, 2 Zündkrippen), Brandraumtür geschlossen, Tür zum Nebenraum und Flurtür zur Versuchshalle ist geschlossen, Brandraumfenster gekippt    |
| 0 : 19                  | Leichte Rauchentwicklung an der Oberkante des Brandraumfensters   |
| 2 : 35                  | Rechte Vorhanghälfte auf der Seite der Zündkrippen beginnt durch Wärmeeinwirkung zu schrumpfen  |
| 3 : 24                  | Rechte Vorhanghälfte löst sich von der Gardinenleiste und fällt herunter  |
| 3 : 26                  | Gekippter Fensterflügel fällt komplett in den Brandraum, da sich durch die Wärmeeinwirkung die in den PVC-Rahmen genieteten Kippscharniere lösen  |
| 3 : 39                  | Linke Vorhanghälfte löst sich von der Gardinenleiste und fällt herunter   |
| 4 : 57                  | Erste kleine Flammen aus dem Brandraumfenster, Rauchentwicklung in den Zwischenfassadenbereich wird kontinuierlich stärker  |
| 5 : 33                  | Brandraumbeobachtungsfenster beschlägt mit Wasserdampf aus dem Verbrennungsprozeß   |
| ca. 7 : 00              | Brandraum beginnt zu verrauchen   |
| 7 : 50                  | Obere ESG-Scheibe durch Rauch nicht mehr erkennbar  |
| 8 : 01                  | Brandraum vollständig verraucht, nur noch schwache Leuchterscheinung des Feuers durch Brandraumbeobachtungsfenster erkennbar  |
| 8 : 14                  | Keine Leuchterscheinung durch Brandraumbeobachtungsfenster mehr erkennbar, Brandraumfensteröffnung durch ESG-Scheibe wegen starker Verrauchung des Zwischenfassadenbereiches nicht mehr erkennbar |
| 8 : 55                  | Flammenerscheinung durch ESG-Scheibe nur noch im unteren Rahmenbereich erkennbar  |
| 11 : 11                 | Helle Leuchterscheinung am Rahmen der ESG-Verglasung - neben dem brennenden Dichtungsmaterial wahrscheinlich auch brennende Schmelze der Leichtmetalllegierung                                    |
| 11 : 42                 | Flammen oberhalb der Fassade (ca. 0,5 m bis 0,7 m)  |

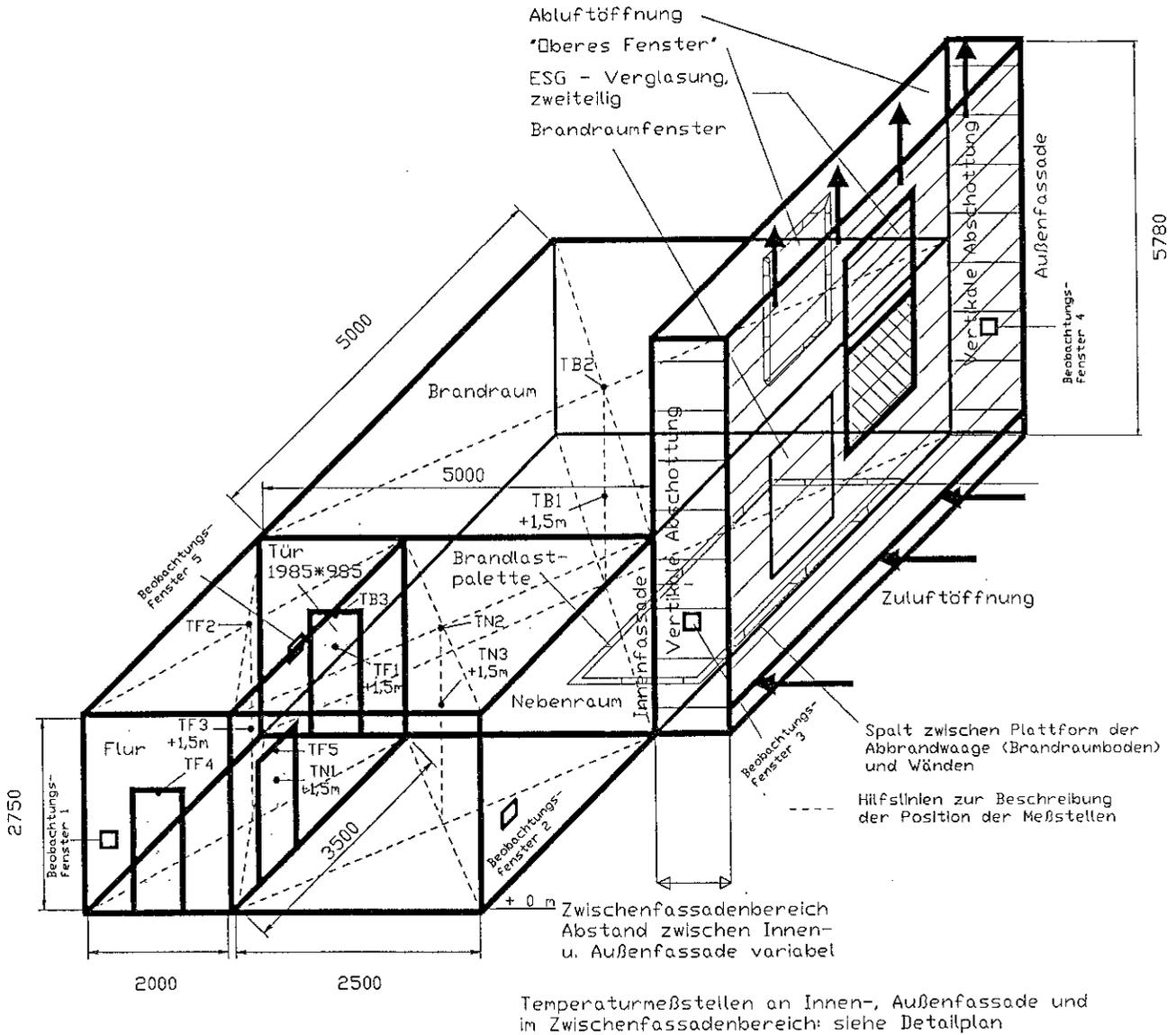
| zu Tabelle 7 |   |
|--------------|---|
| 12 : 18      | Leuchterscheinung der Flammen hinter der unteren ESG-Scheibe zentral wird wieder sichtbar (Durchmesser der Fläche zunächst ca. 30 cm), => Ruß wird verbrannt, Fläche wird kontinuierlich größer   |
| ca. 13 : 00  | Hinter fast der gesamten unteren ESG-Scheibe sind die Flammen wieder erkennbar  |
| 13 : 28      | Obere ESG-Scheibe geht nach dumpfem Knall schlagartig im Bruchteil einer Sekunde ohne vorherige Geräusche z.B. durch Ribbildung kaputt - vor der Zerstörung ist durch die starke Verqualmung und der durch Ruß geschwärzten Scheibe fast keine Flammerscheinung durch die ESG-Scheibe erkennbar, mittlere Leichtmetallstrebe schmilzt, d.h. untere ESG-Scheibe ist oben nicht mehr eingespannt  |
| 14 : 28      | Schwache Leuchterscheinung durch Brandraumbeobachtungsfenster, Leuchterscheinung wird kontinuierlich stärker  |
| 16 : 07      | Oberkante der vorderen rechten Holzkrippe wieder erkennbar  |
| 16 : 34      | Untere ESG-Scheibe beginnt etwas in sich zusammenzusacken und wölbt sich im oberen Bereich nach innen, ESG-Scheibe zerplatzt  |
| ca. 19 : 00  | Vordere Holzkrippe und Flammen deutlich erkennbar   |
| ca. 20 : 00  | Abnehmende Flammenentwicklung im Zwischenfassadenbereich  |
| ca. 24 : 00  | Wand im Bereich der Brandraumfensteröffnung wieder erkennbar  |
| 25 : 45      | Brandraumfensteröffnung wieder erkennbar  |
| 27 : 08      | Besprühen der unteren ESG-Scheibe mit Wasser durch die Feuerwehr, Scheibe verliert ihre Durchsichtigkeit, feine Ribbildung im Glas, kein Zerplatzen der Scheibe   |
| 28 : 33      | Ablöschen des Feuers im Brandraum durch die Feuerwehr, letzte Flammen aus dem Brandraumfenster, Scheibe wird mit Eisenstange zerstoßen, auf den Glasstücken befindet sich Leichtmetallschmelze, ESG-Bruchstücke der durch den Brand zerstörten Scheibe nach dem Aufprall auf dem Boden im Bereich zwischen 0,5 cm <sup>2</sup> und 100 cm <sup>2</sup> groß, Bruchstücke der Wärmeschutzverglasung zwischen 10 cm <sup>2</sup> bis 500 cm <sup>2</sup> groß, wobei allerdings durch den Spannungsverlauf im Wärmeschutzglasfenster weitaus größere Teile entstehen, die durch den Aufprall zerkleinert werden |

Tabelle 8: Versagen der Verglasungen von Innen- und Außenfassade

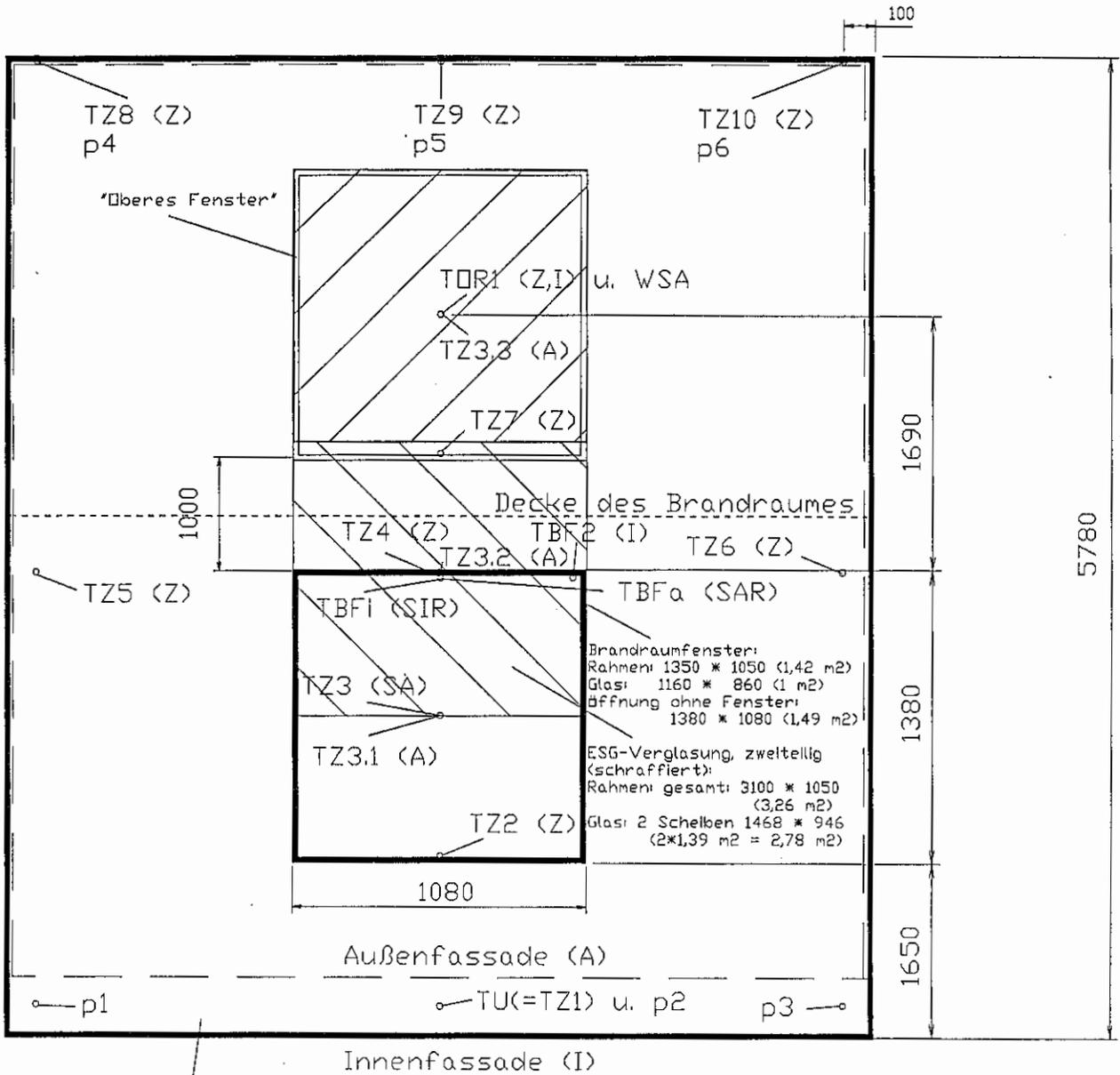
|  | Temperatur | Versuch 4              | Versuch 5              | Versuch 6              | Versuch 7                           |
|--|------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| <b>Wärmeschutzglasfenster<br/>(Innenfassade)</b> |            |                        |                        |                        |                                     |
| 1. Ribbildung<br>im Glas                         | TBFi       | 9 min 59 s<br>321,4°C  | 12 min 47 s<br>593,9°C | 13 min 14 s<br>251,4°C | 3 min 26 s<br>104,8°C <sup>2</sup>  |
|  | TBFa       | 9 min 59 s<br>52,7°C   | 12 min 47 s<br>83,5°C  | 13 min 14 s<br>99,2°C  | 3 min 26 s<br>35,1°C <sup>2</sup>   |
| 1. Flammen im<br>Zwischenfassadenbereich         | TBFi       | 20 min 40 s<br>748,3°C | 13 min 53 s<br>700,1°C | 14 min 35 s<br>713,3°C | 4 min 57 s<br>340,6°C               |
|  | TBFa       | 20 min 40 s<br>167,3°C | 13 min 53 s<br>103,3°C | 14 min 35 s<br>135,5°C | 4 min 57 s<br>339,6°C               |
| <b>ESG-Verglasung<br/>(Außenfassade)</b>         |            |                        |                        |                        |                                     |
| Zerspringen der unteren<br>ESG-Scheibe           | TZ3.1      | kein<br>Zerspringen    | kein<br>Zerspringen    | 16 min 38 s<br>770,0°C | 16 min 34 s<br>667,1°C <sup>3</sup> |
|  | TZ3.2      | "                      | "                      | 16 min 38 s<br>702,7°C | 16 min 34 s<br>745,0°C <sup>3</sup> |
|  | TZ3.3      | "                      | "                      | 16 min 38 s<br>499,9°C | 16 min 34 s<br>578,8°C <sup>3</sup> |
| Zerspringen der oberen<br>ESG-Scheibe            | TZ3.1      | "                      | 19 min 22 s<br>308,2°C | 18 min 32 s<br>618,6°C | 13 min 28 s<br>573,5°C              |
|  | TZ3.2      | "                      | 19 min 22 s<br>510,9°C | 18 min 32 s<br>849,1°C | 13 min 28 s<br>724,8°C              |
|  | TZ3.3      | "                      | 19 min 22 s<br>466,4°C | 18 min 32 s<br>376,3°C | 13 min 28 s<br>828,8°C              |

<sup>2</sup> Gekippter Fensterflügel fällt durch Versagen des Kippmechanismus (Wärmeeinwirkung) in den Brandraum

<sup>3</sup> Kein Zerspringen, Beginn der plastischen Deformation der Scheibe im oberen Rahmenbereich



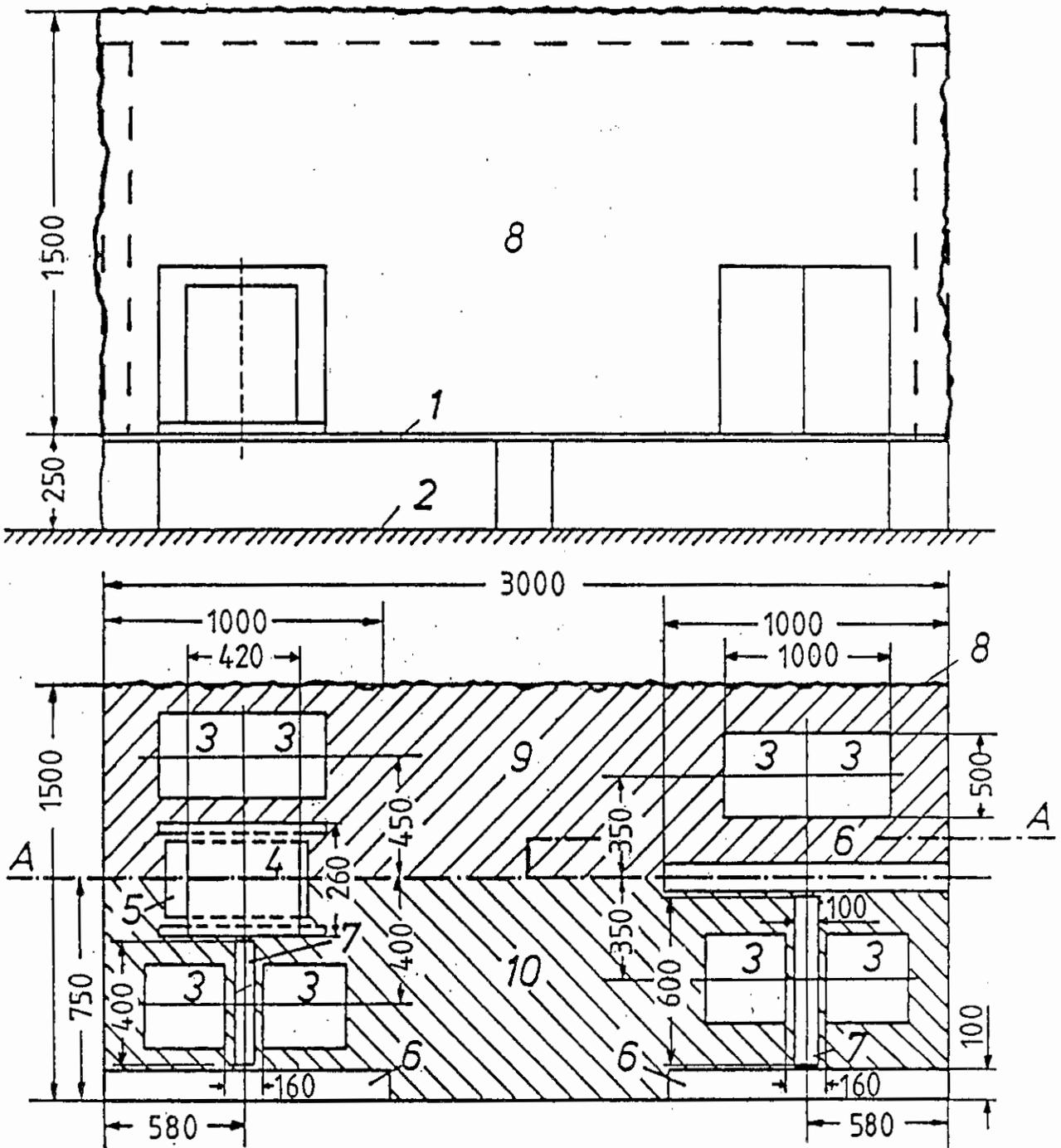
**Bild 1**      Prinzipskizze des Versuchsaufbaus und Meßstellenplan  
 - Gesamtdarstellung.



Zuluftöffnung

- Z: Zwischenfassadenbereich (Abstand der Temperaturmeßstellen von Innenfassade: 20 cm bzw. Position der Druckmeßstellen (Mitte der Zu- bzw. Abluftöffnung))
- A: Außenfassade
- I: Innenfassade
- SIR: Scheibe innen im Brandraum, Fensterrahmen
- SAR: Scheibe außen am Brandraum, Fensterrahmen
- SA: Scheibe außen am Brandraum, zentral

**Bild 2** Prinzipskizze des Versuchsaufbaus und Meßstellenplan - Zwischenfassadenbereich.



**Bild 3** Aufbau einer Brandlastpalette mit Zündkrippe.

- 1 Boden der Brandlastpalette (Silikat-Brand-  
schutzbauplatte)
- 2 Boden des Brandraumes (Abbrandwaage)
- 3 Holzkrippe
- 4 Zündkrippe
- 5 Zündwanne (200 mm \* 400 mm) + Heptan
- 6,7 Styropor -PS 15 SE- Platten
- 8 Vorhang, auf Rahmen befestigt
- 9 Linoleum
- 10 Nadelfilzbodenbelag

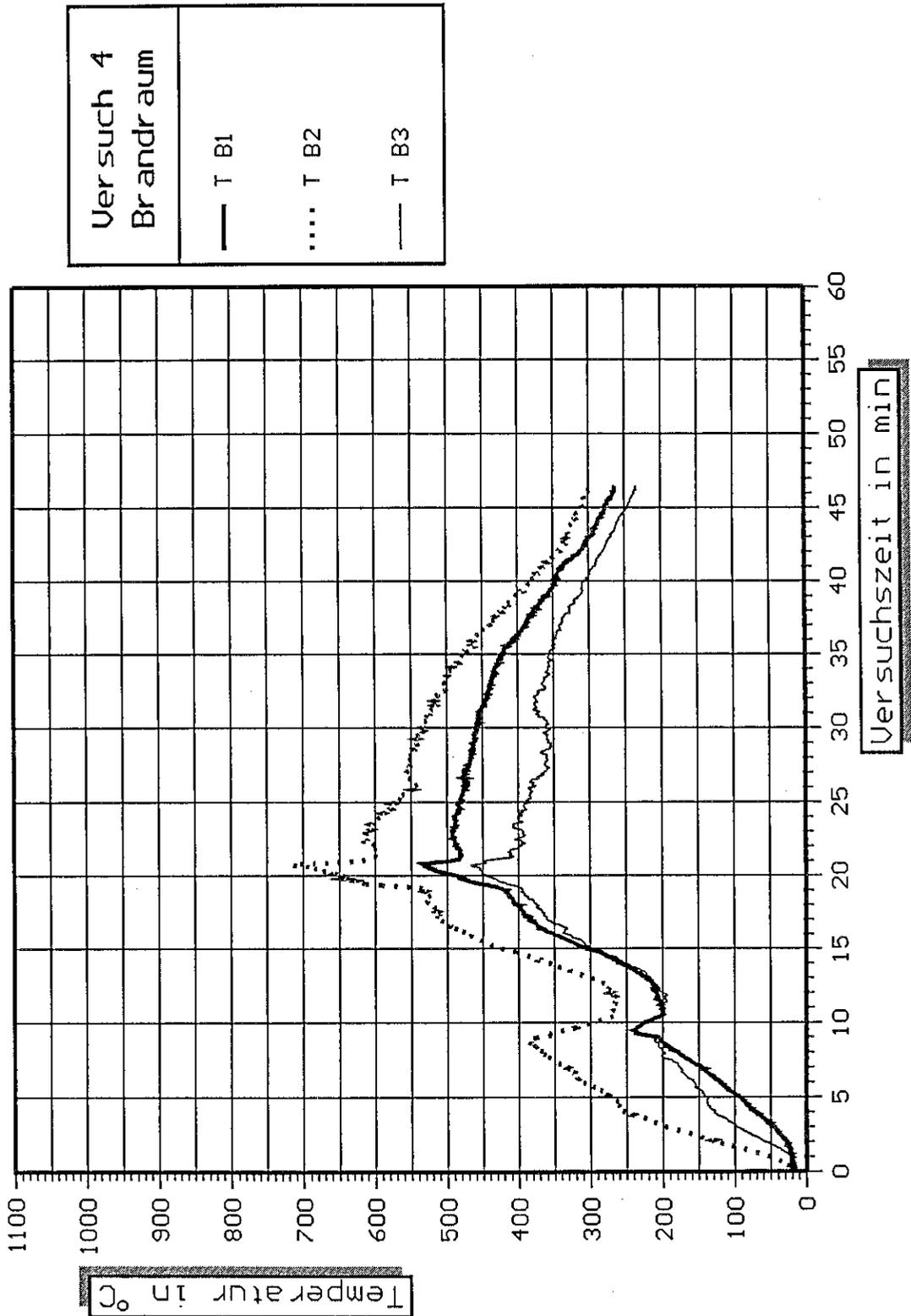
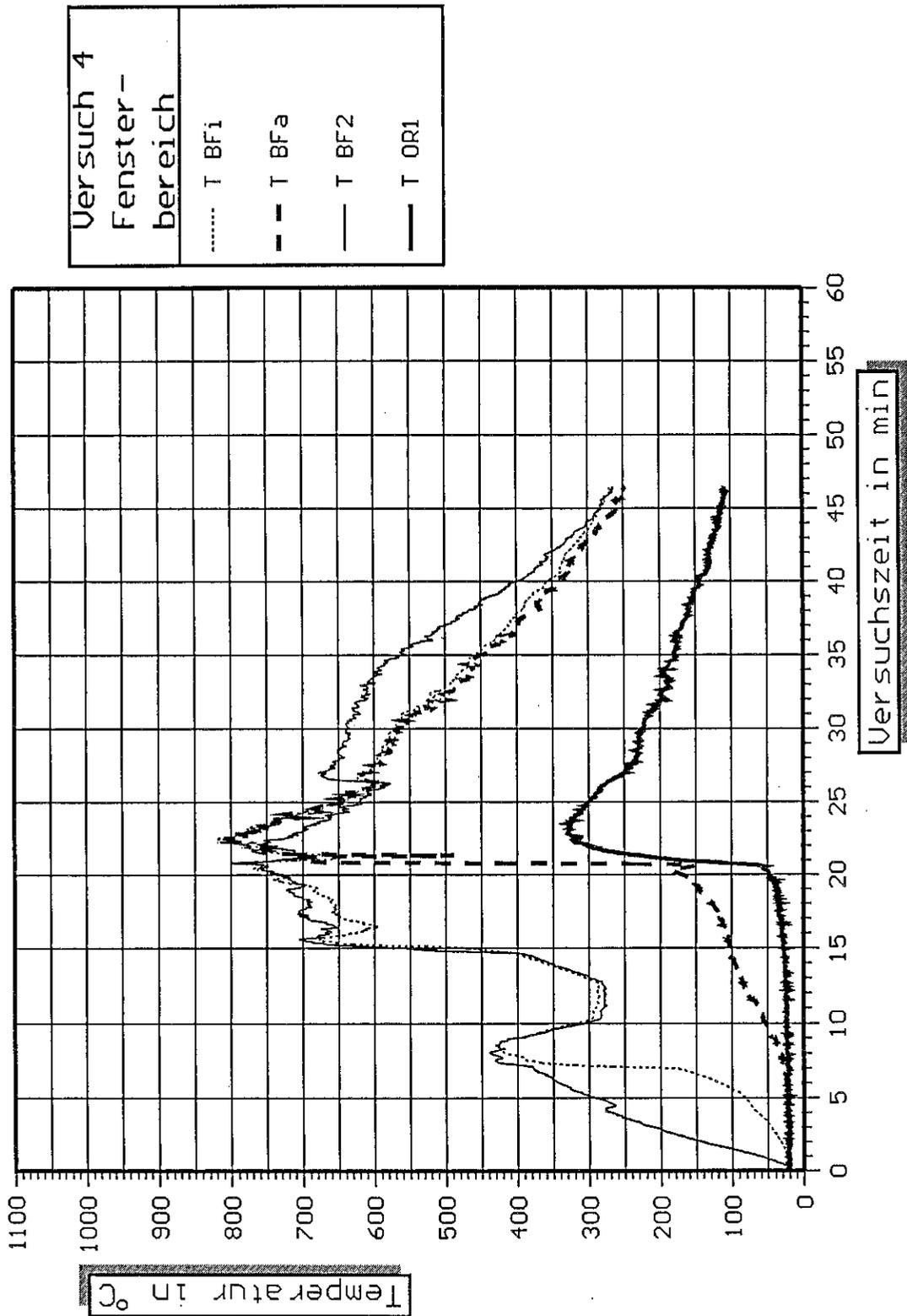


Bild 4 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes.  
- Versuch 4 -



**Bild 5** Zeitliche Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade.  
- Versuch 4 -

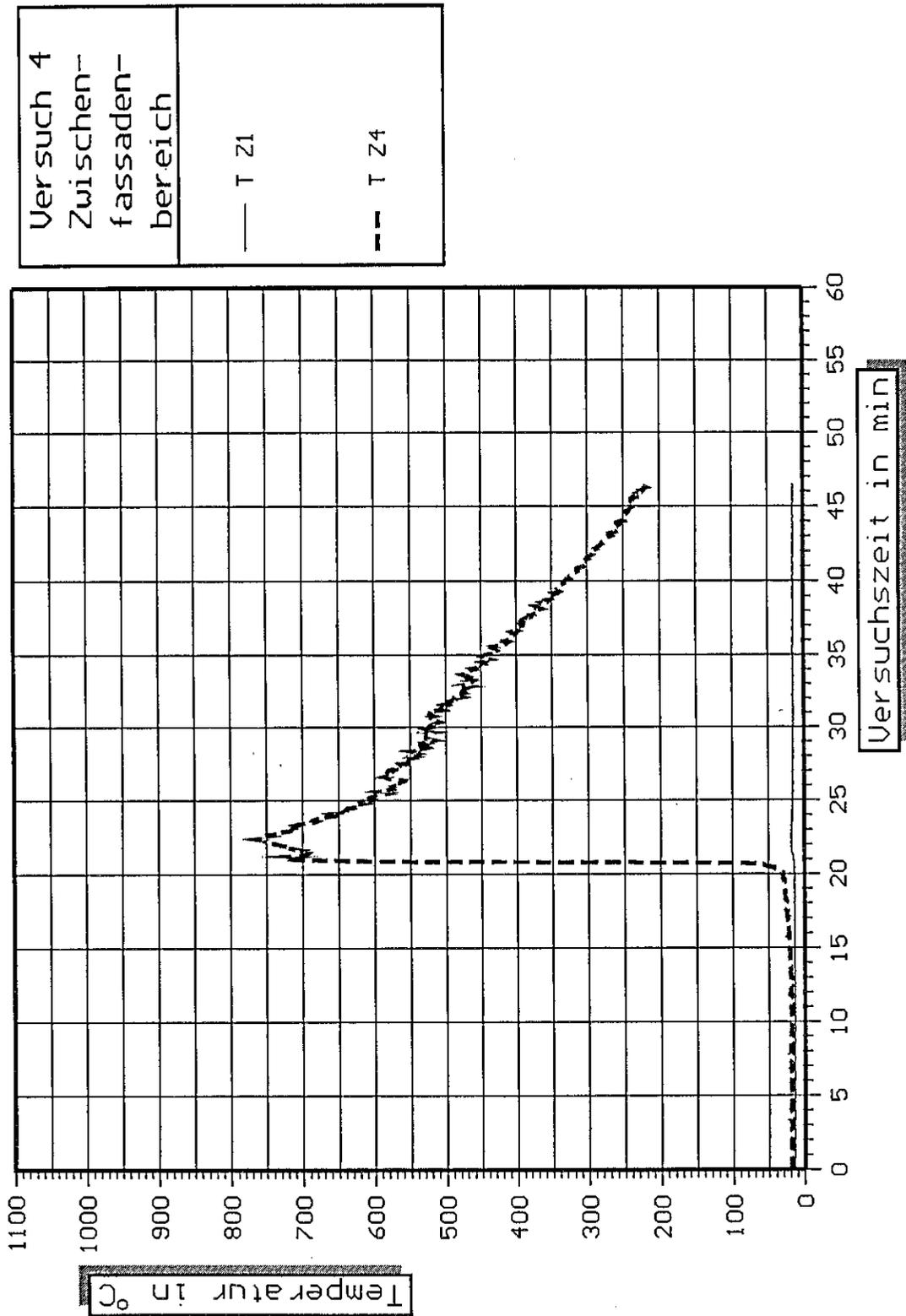


Bild 6 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.  
- Versuch 4 -

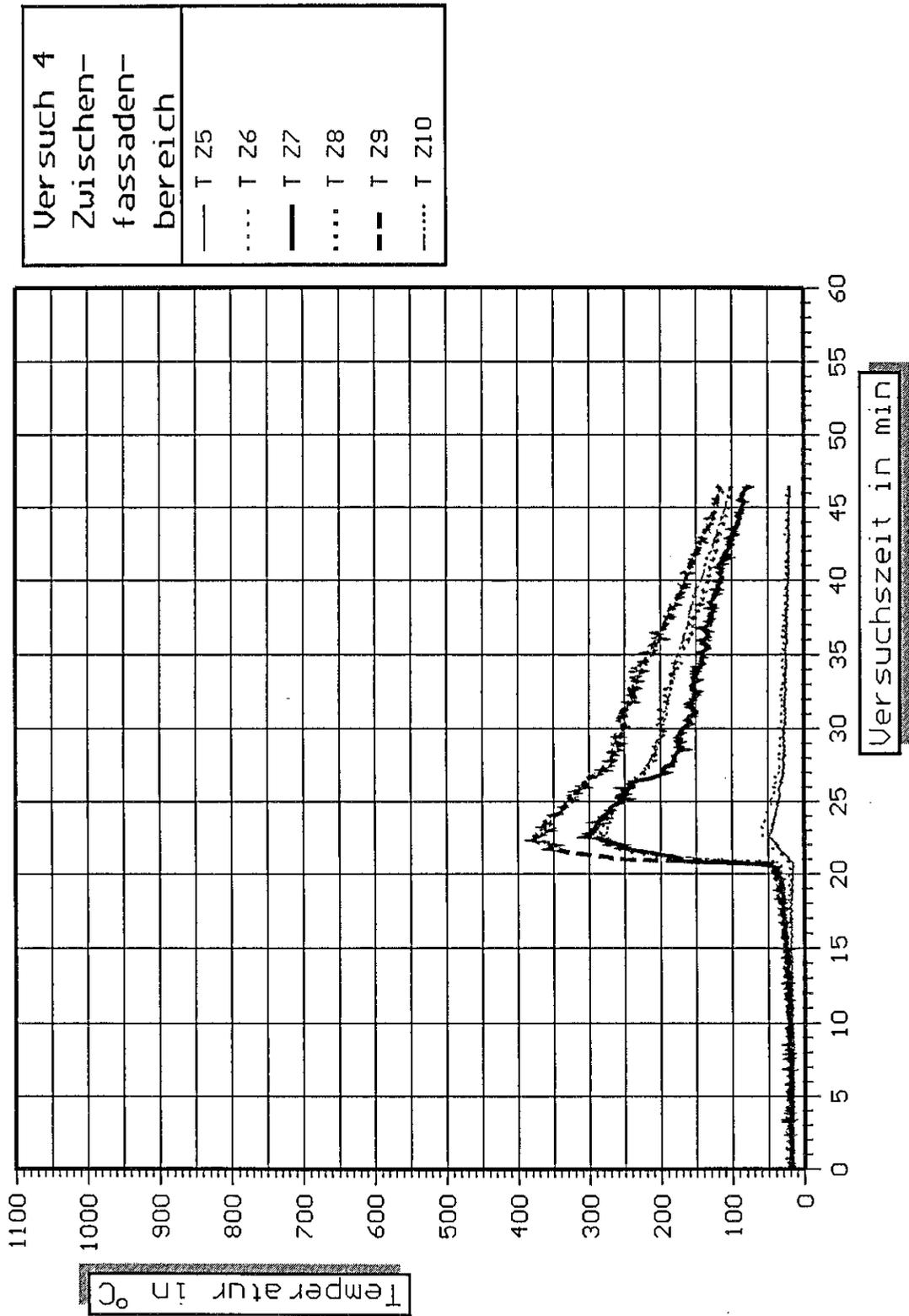
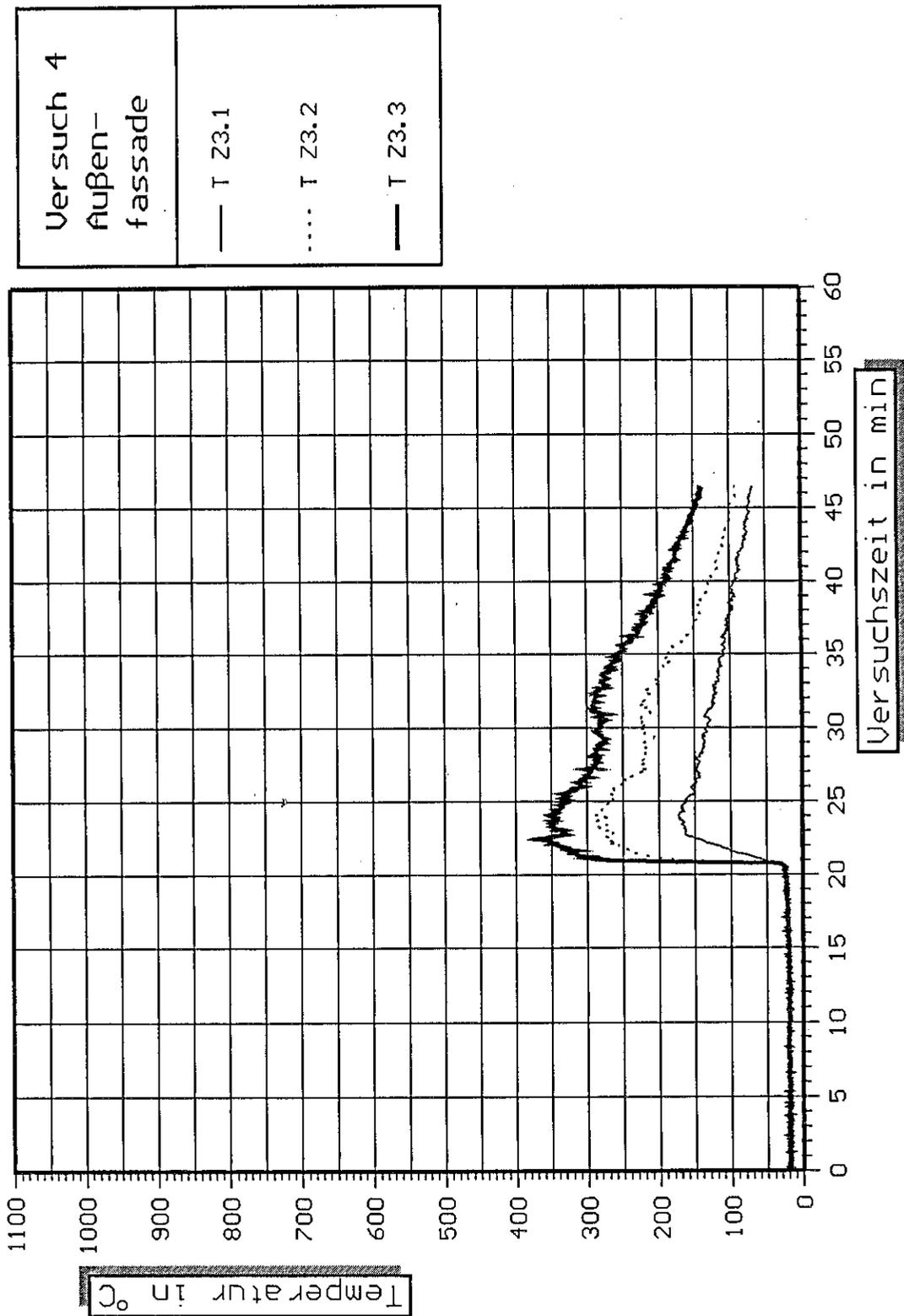


Bild 7      Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.  
- Versuch 4 -



**Bild 8** Zeitliche Temperaturverläufe an der ESG-  
Verglasung der Außenfassade.  
- Versuch 4 -

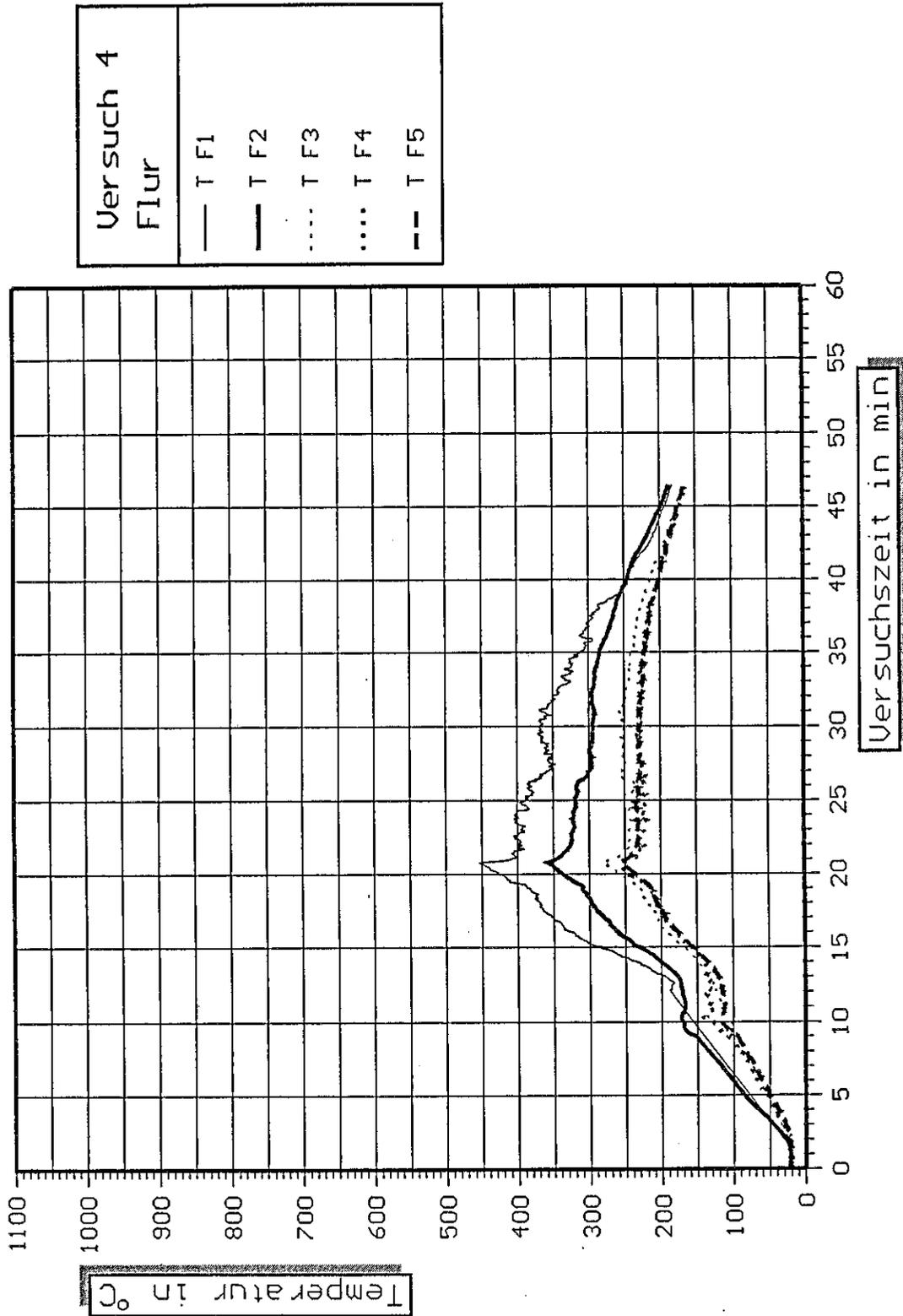


Bild 9      Zeitliche Temperaturverläufe im Flur.  
- Versuch 4 -

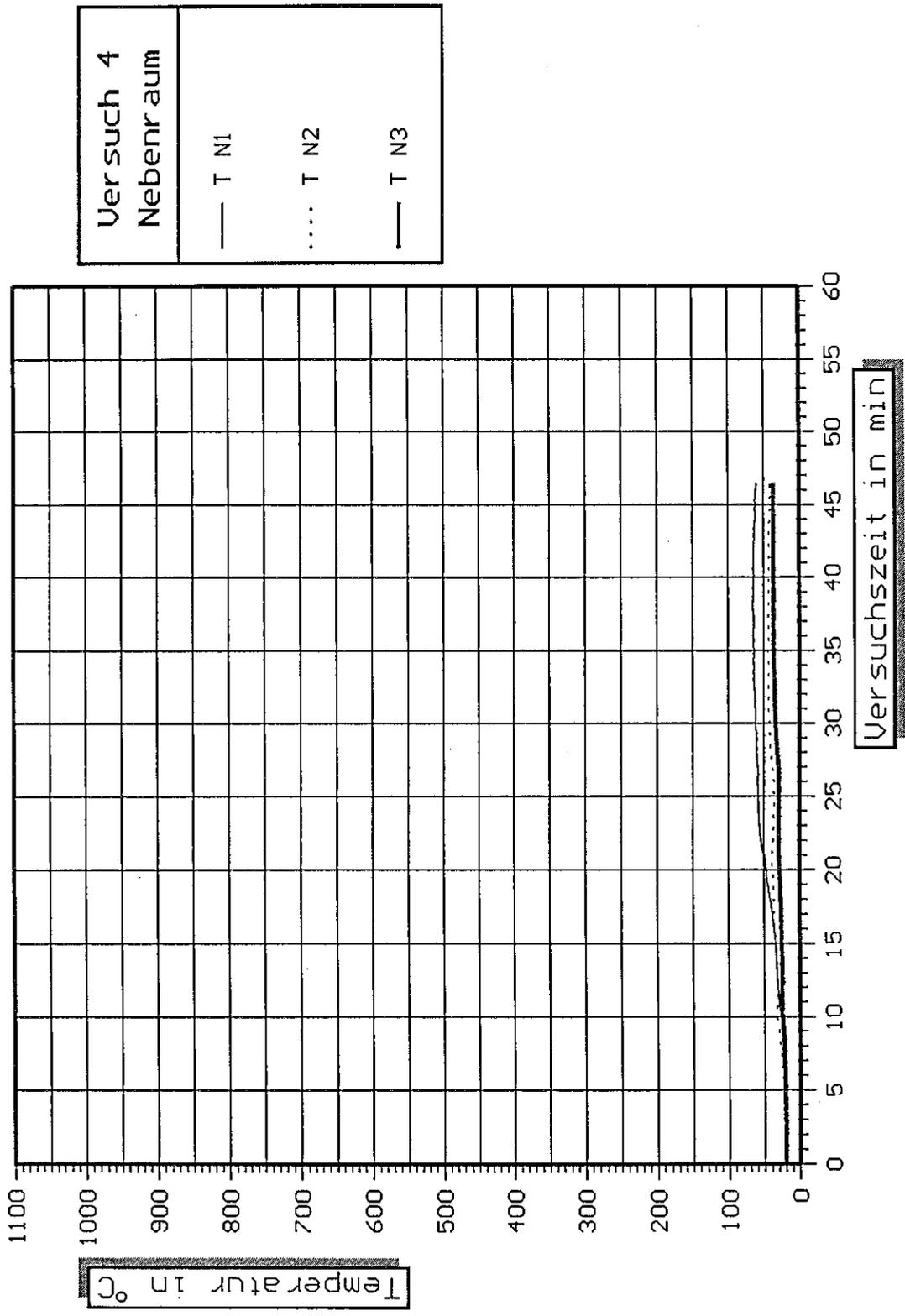
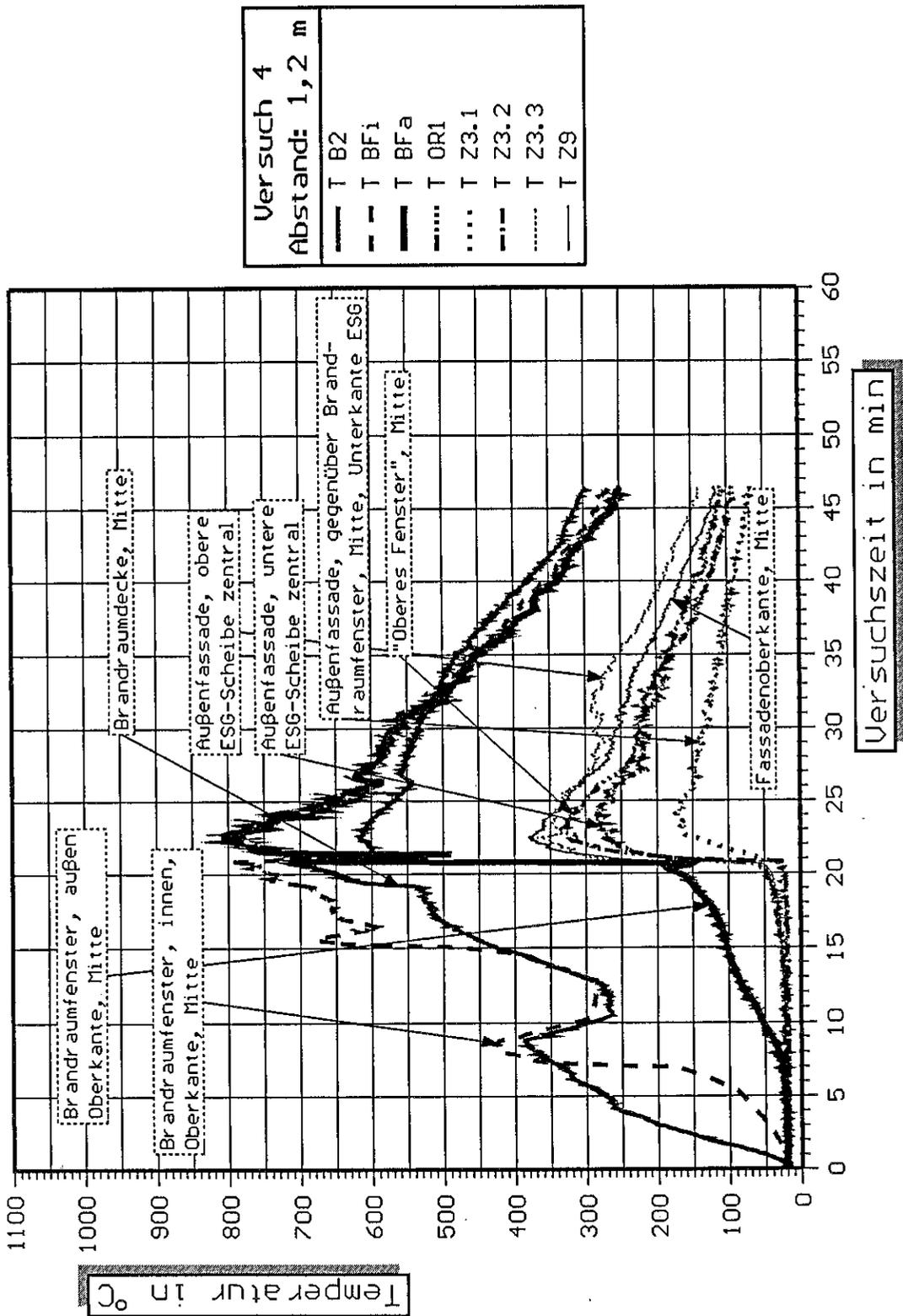
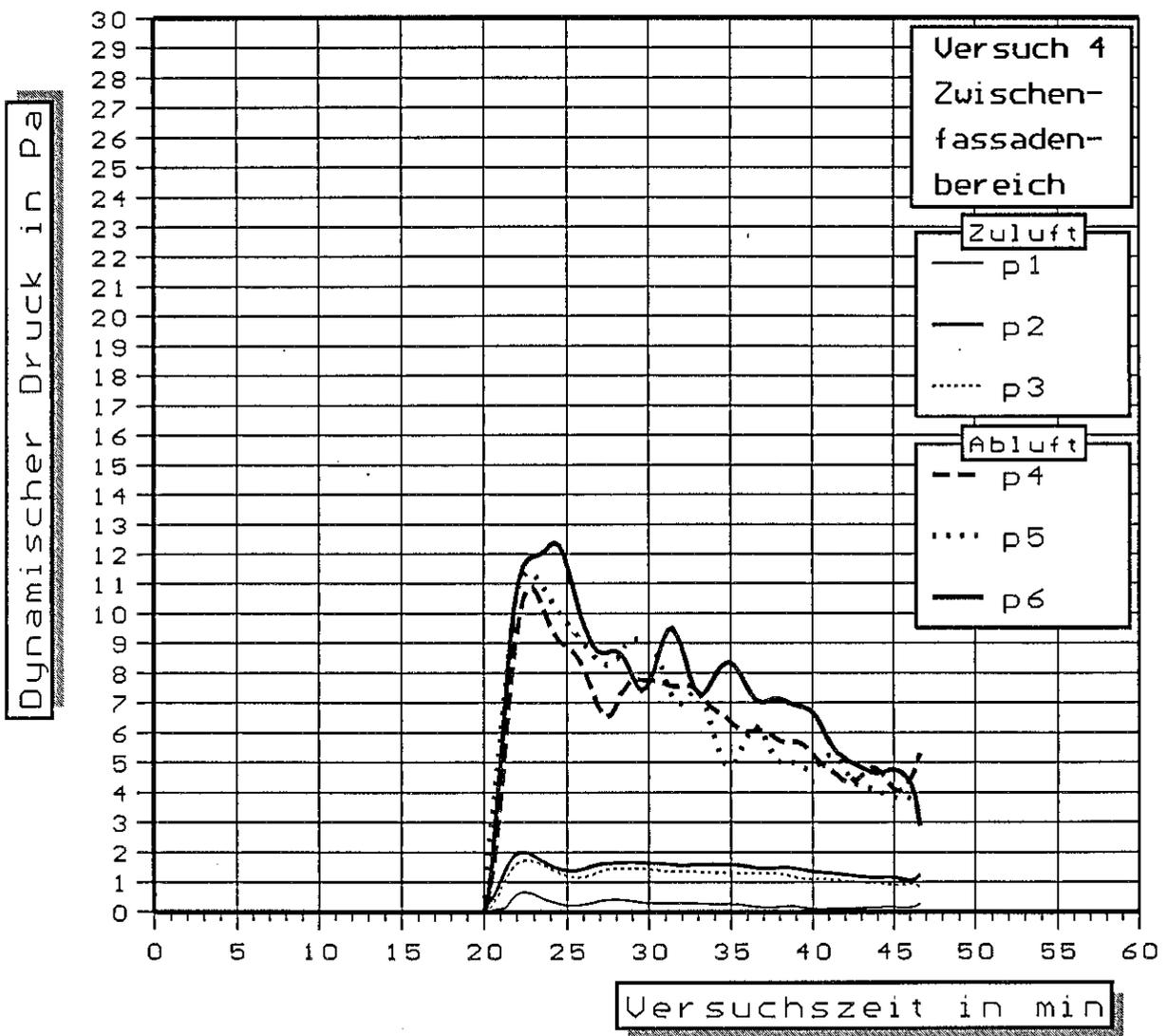


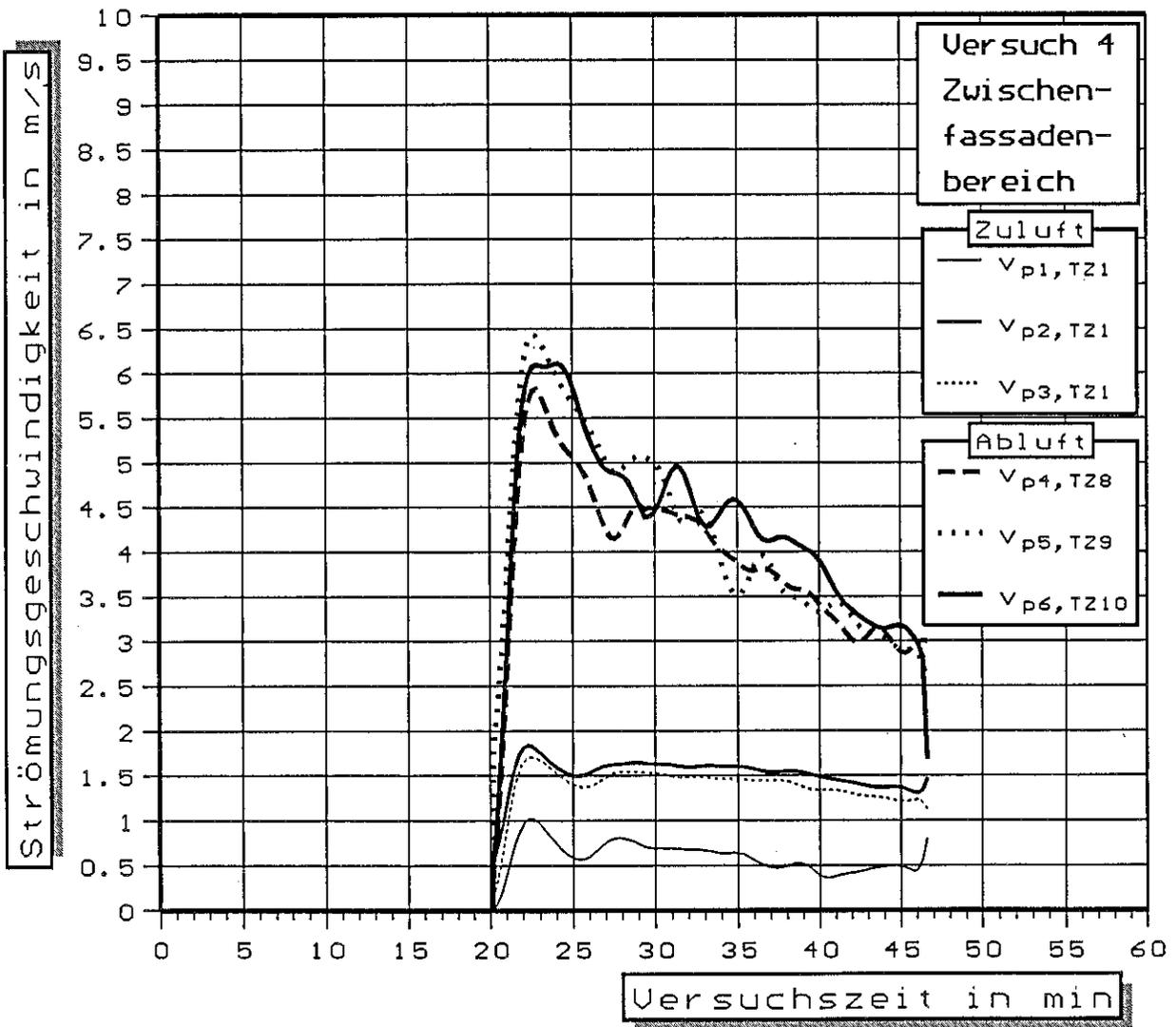
Bild 10 Zeitliche Temperaturverläufe im Nebenraum.  
- Versuch 4 -



**Bild 11** Vergleich ausgewählter zeitlicher Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich, sowie an der Außenfassade. - Versuch 4 -



**Bild 12** Zeitliche Verläufe des dynamischen Druckes an der Zu- und Abluftöffnung.  
- Versuch 4 -



**Bild 13** Zeitliche Verläufe der Strömungsgeschwindigkeit an der Zu- und Abluftöffnung.  
- Versuch 4 -

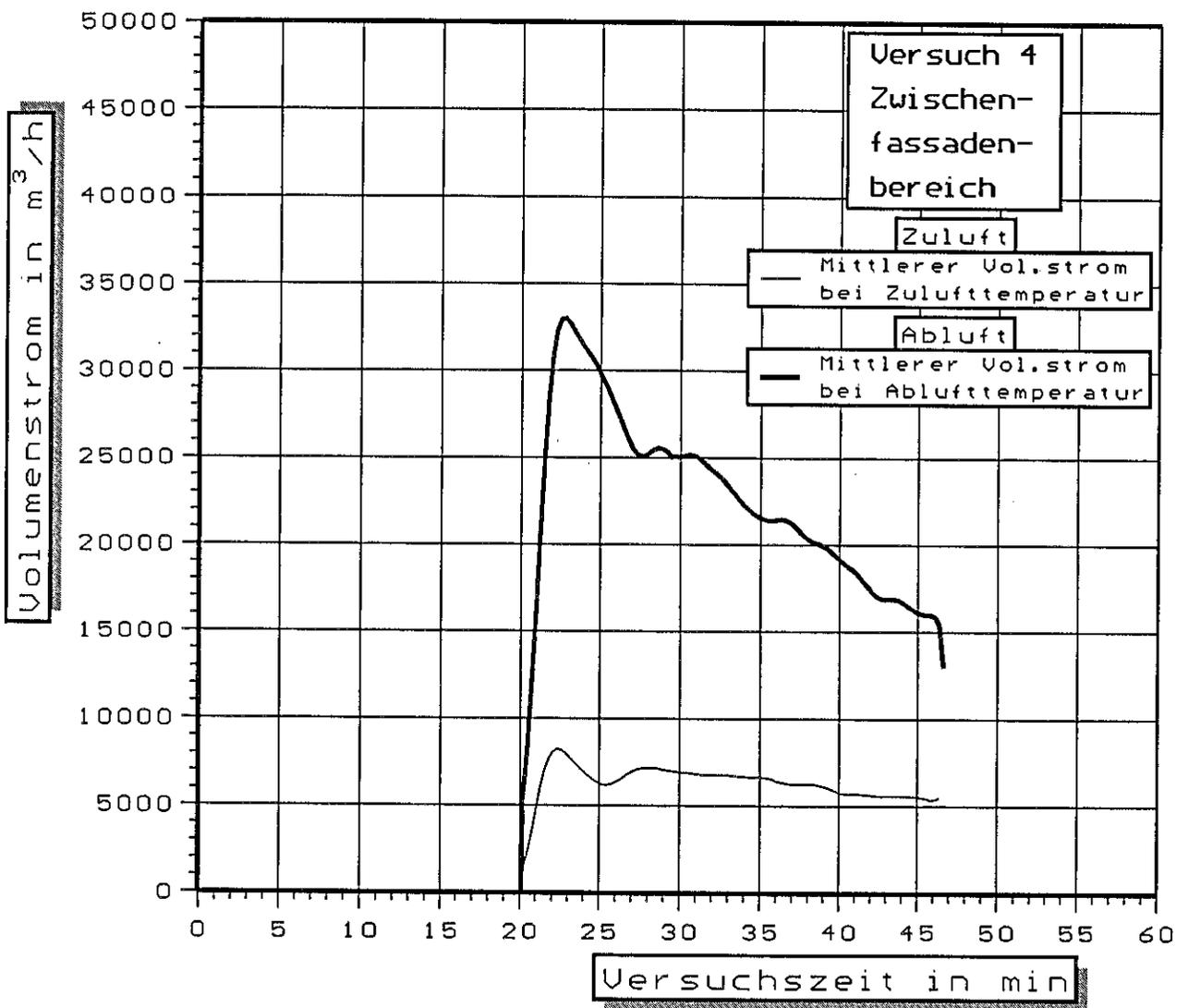
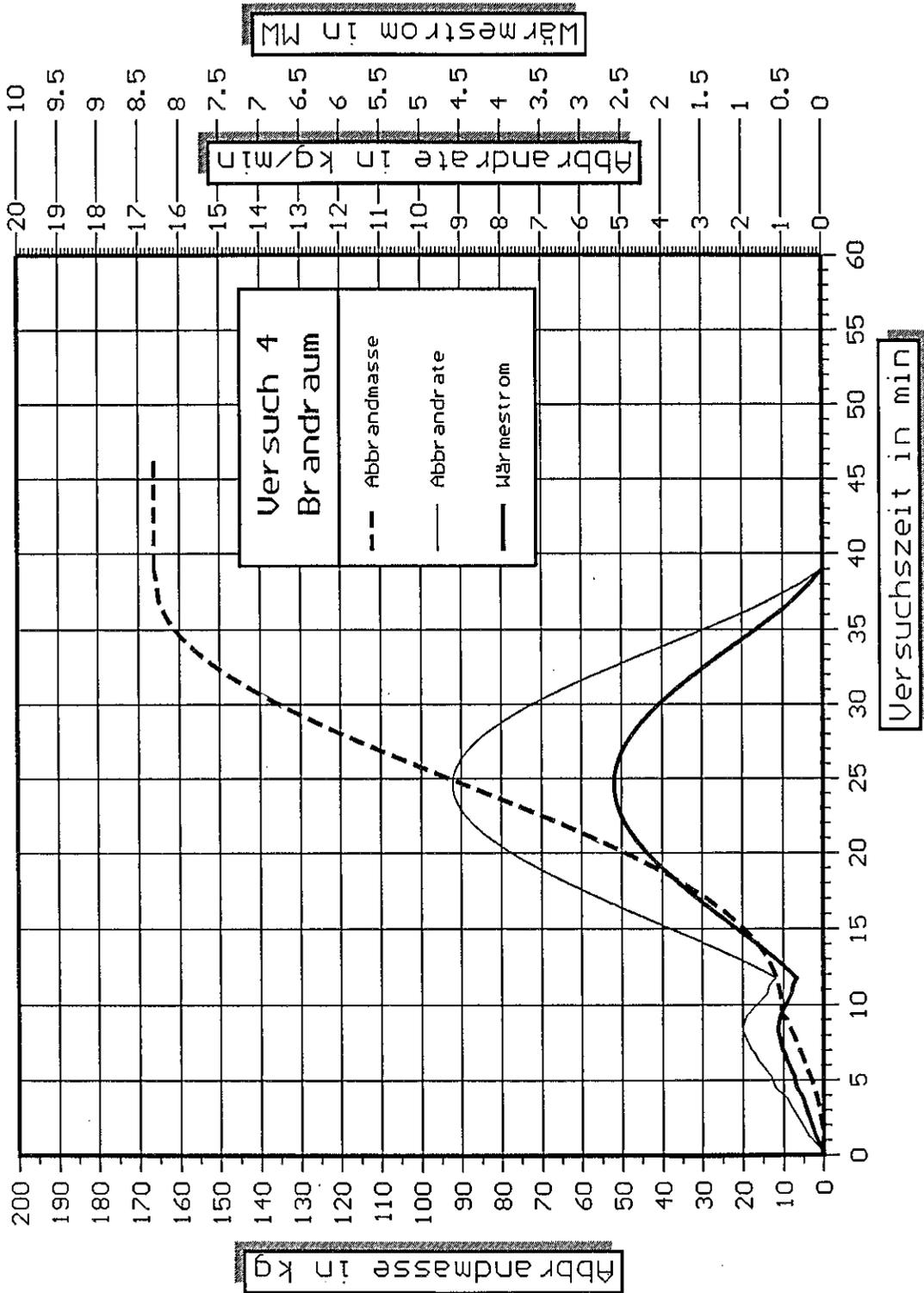
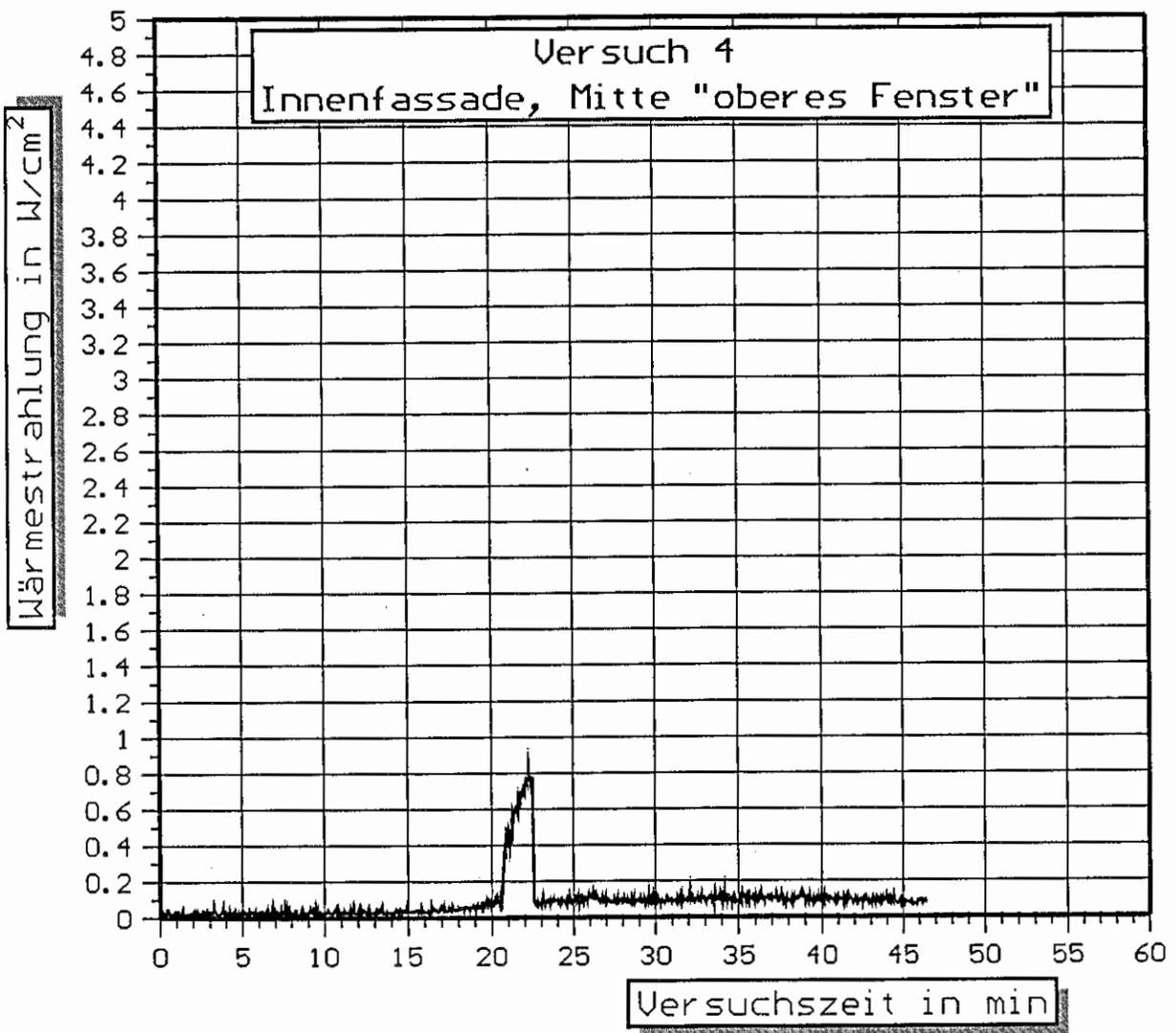


Bild 14 Zeitliche Verläufe der mittleren Volumenströme an der Zu- und Abluftöffnung bei Zu- bzw. Ablufttemperatur.  
- Versuch 4 -



**Bild 15** Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung.  
- Versuch 4 -



**Bild 16** Zeitlicher Verlauf der Wärmestrahlung in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade.  
- Versuch 4 -

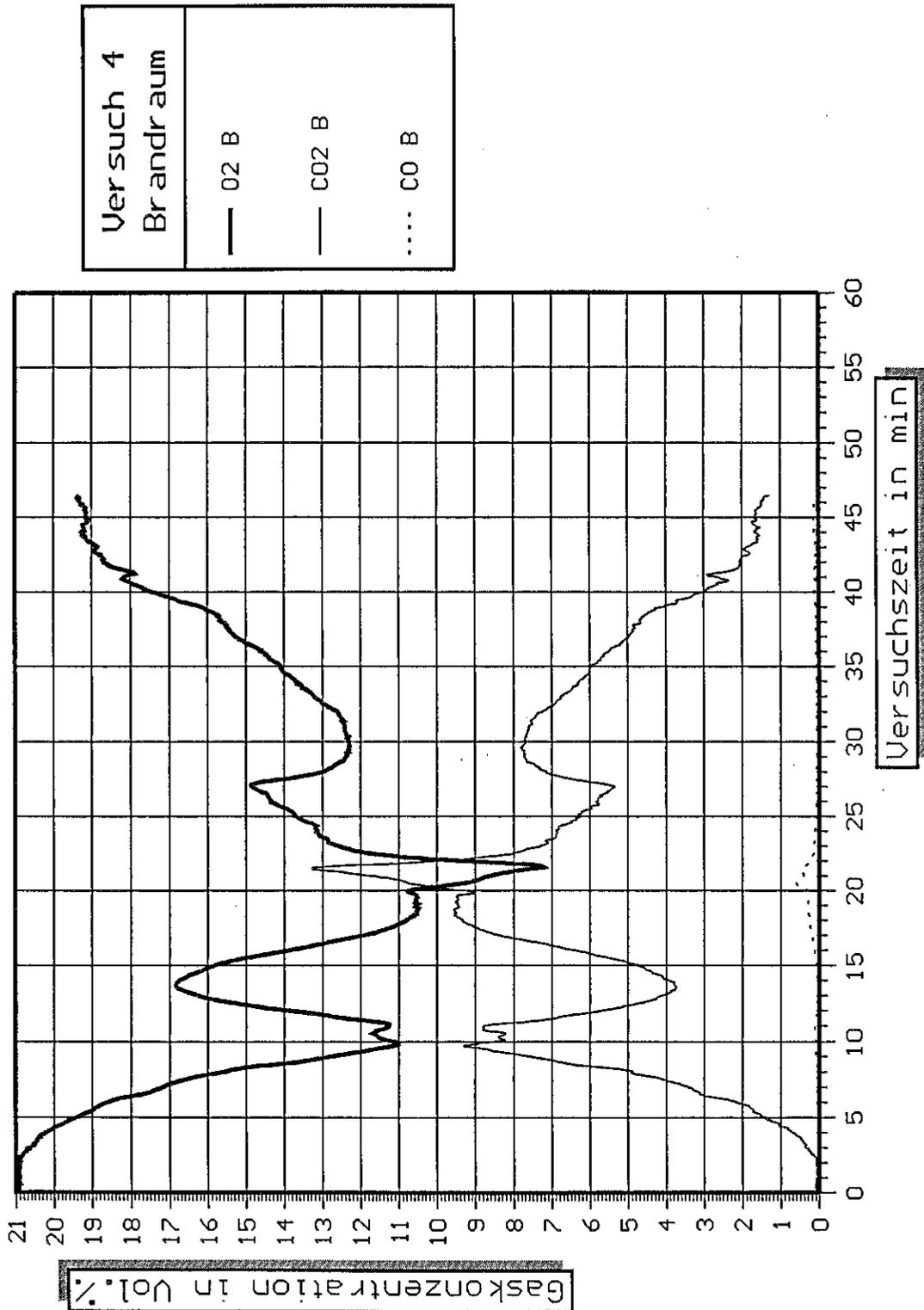


Bild 17 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.  
- Versuch 4 -

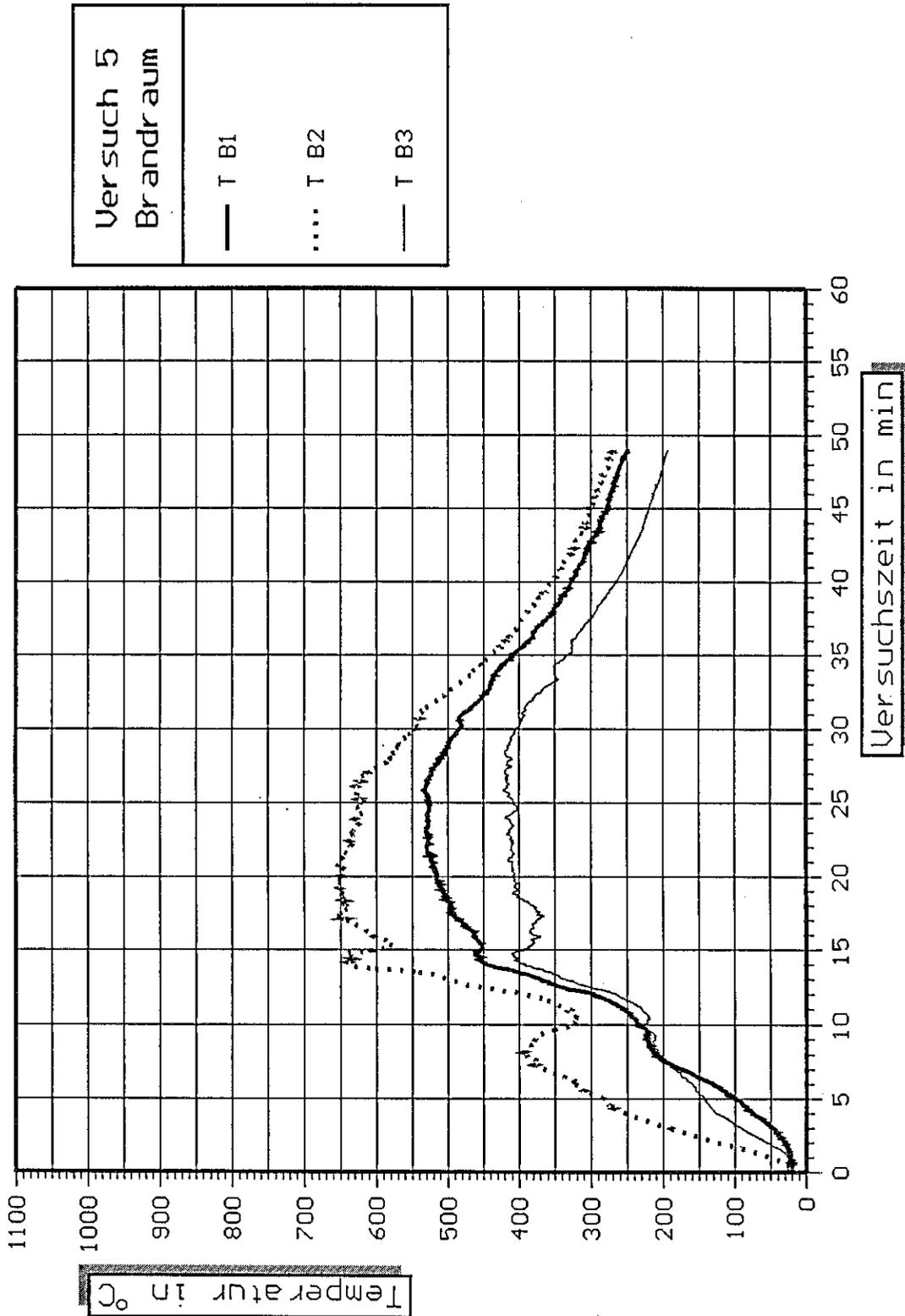
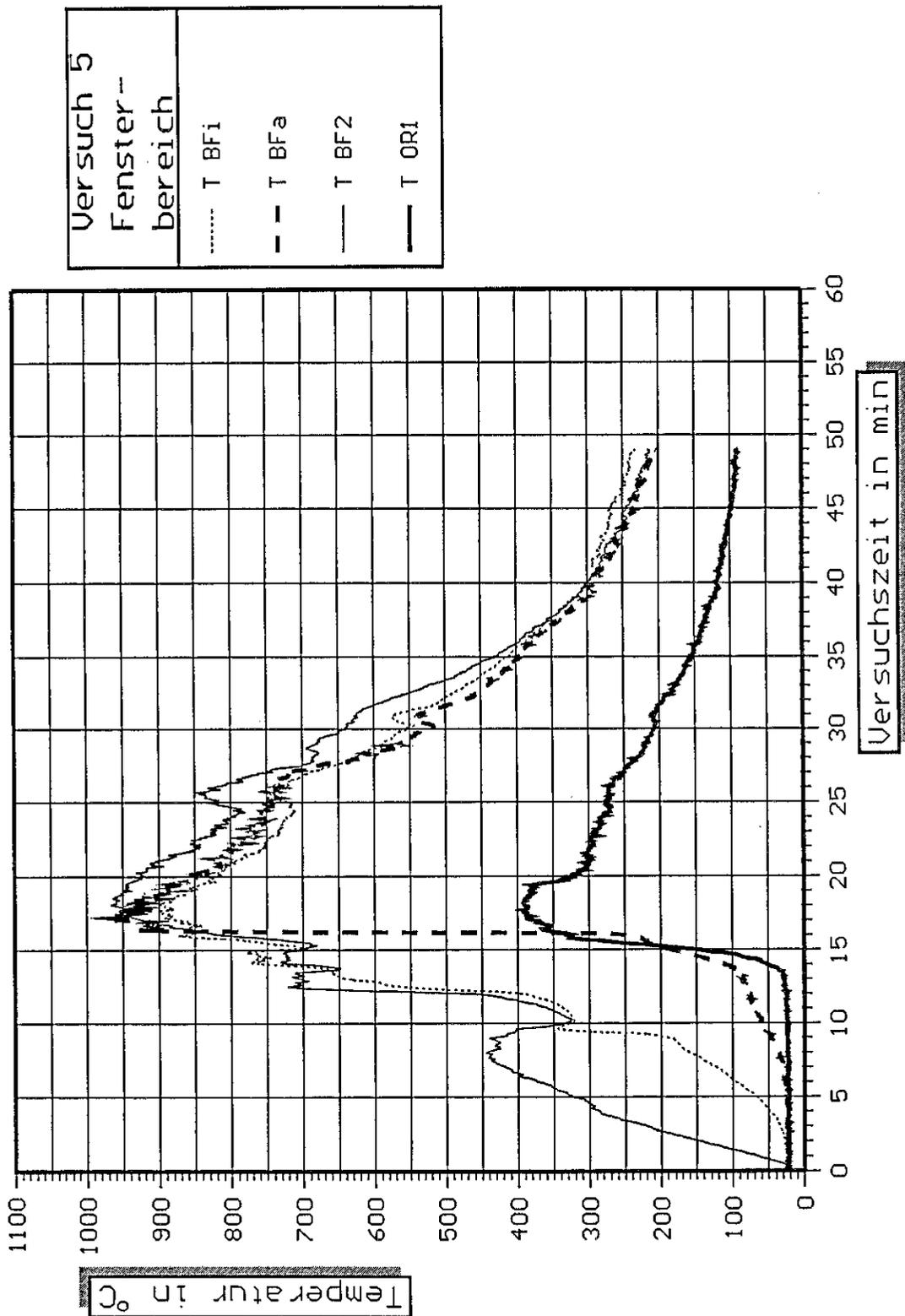


Bild 18 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes.  
- Versuch 5 -



**Bild 19** Zeitliche Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade.  
- Versuch 5 -

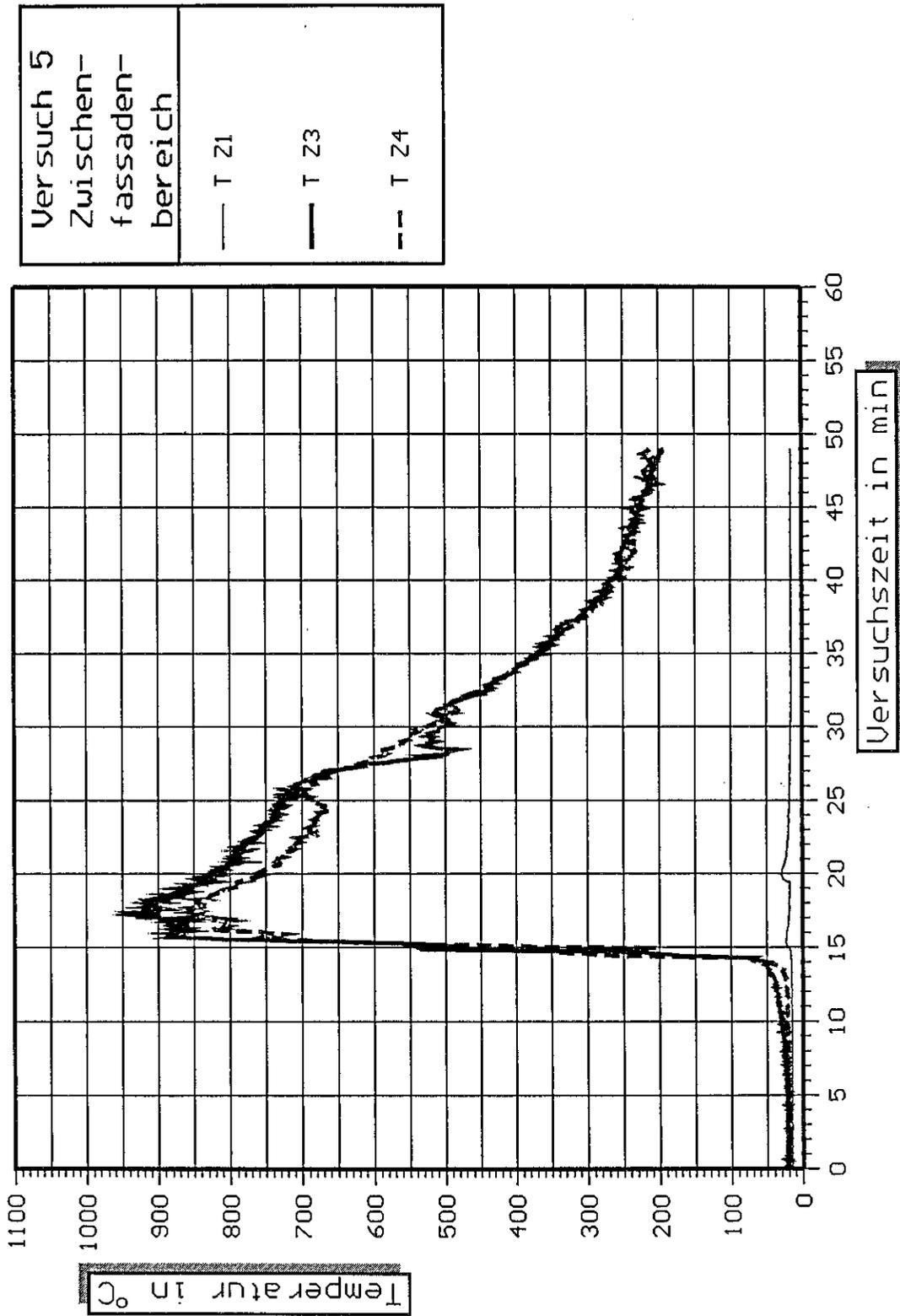
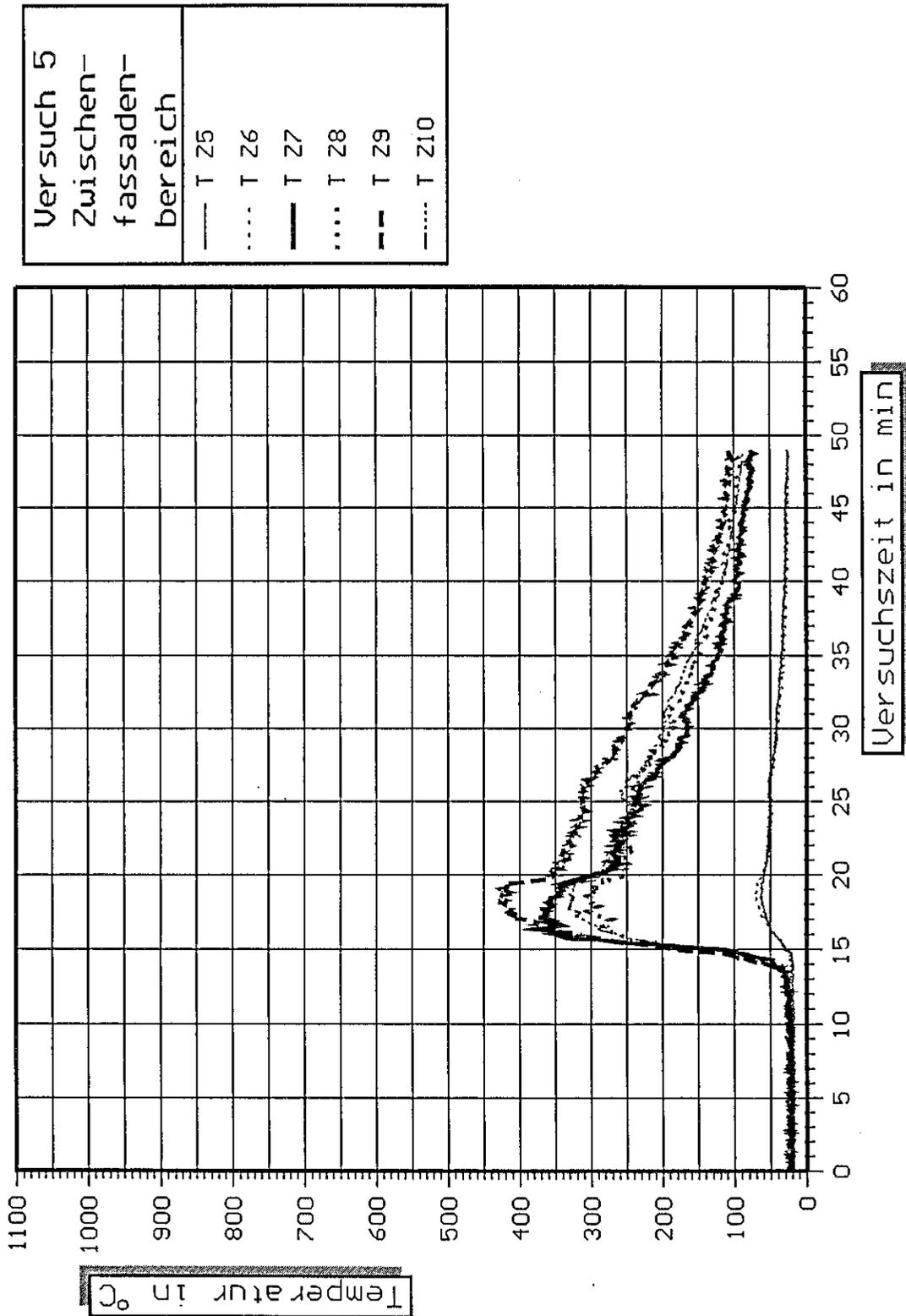


Bild 20 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.  
- Versuch 5 -



**Bild 21** Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.  
- Versuch 5 -

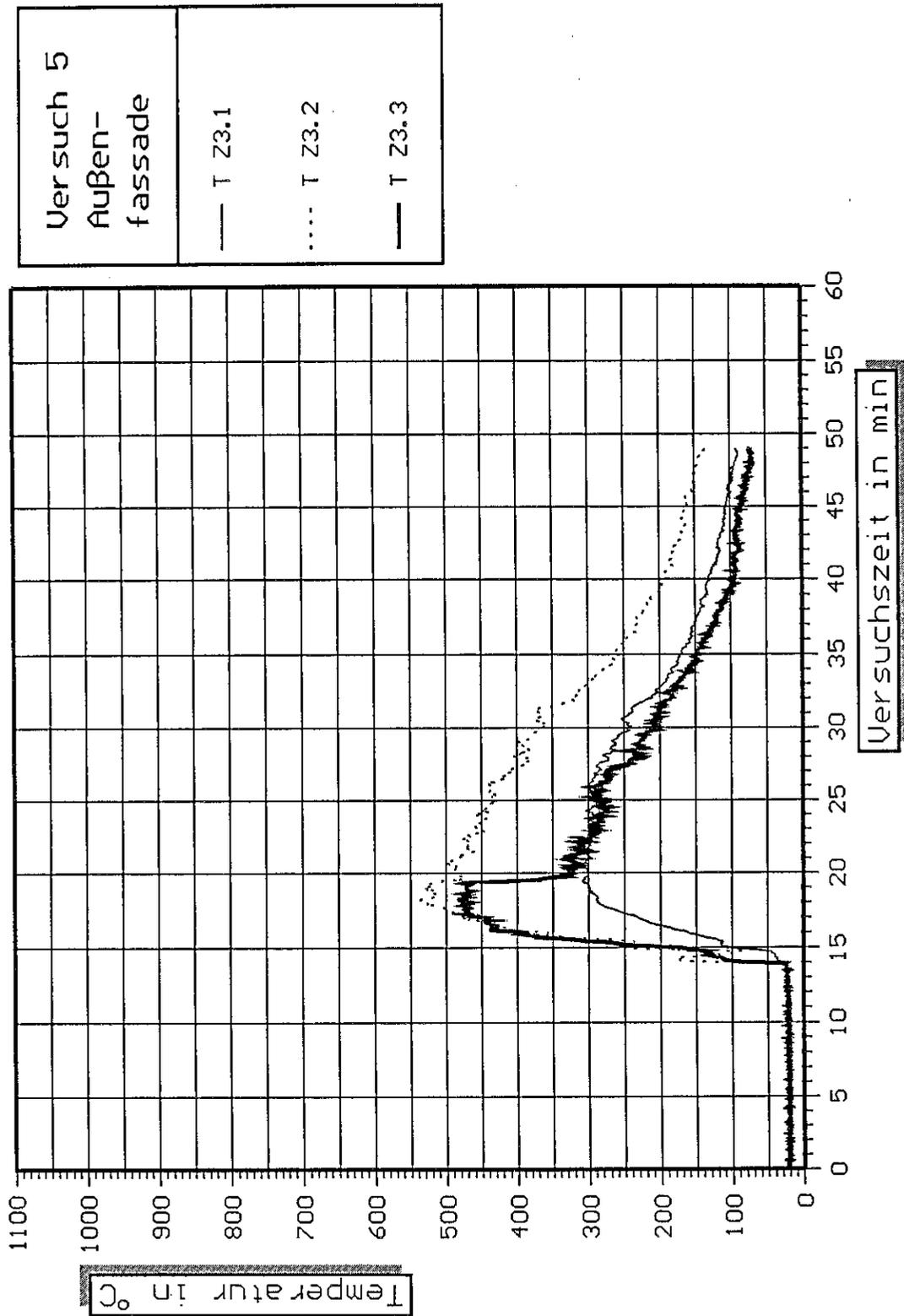


Bild 22 Zeitliche Temperaturverläufe an der ESG-  
Verglasung der Außenfassade.  
- Versuch 5 -

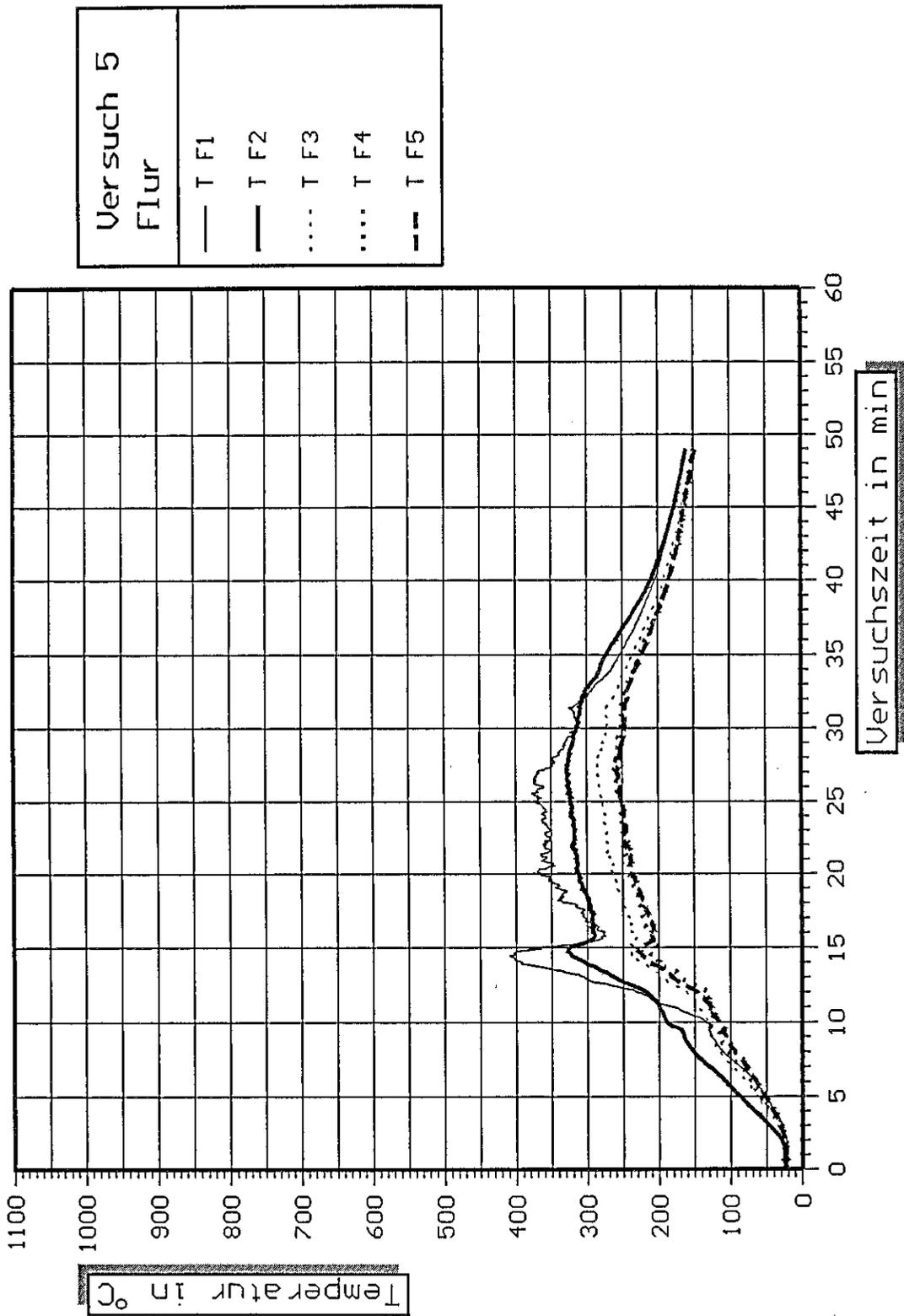


Bild 23 Zeitliche Temperaturverläufe im Flur.  
- Versuch 5 -

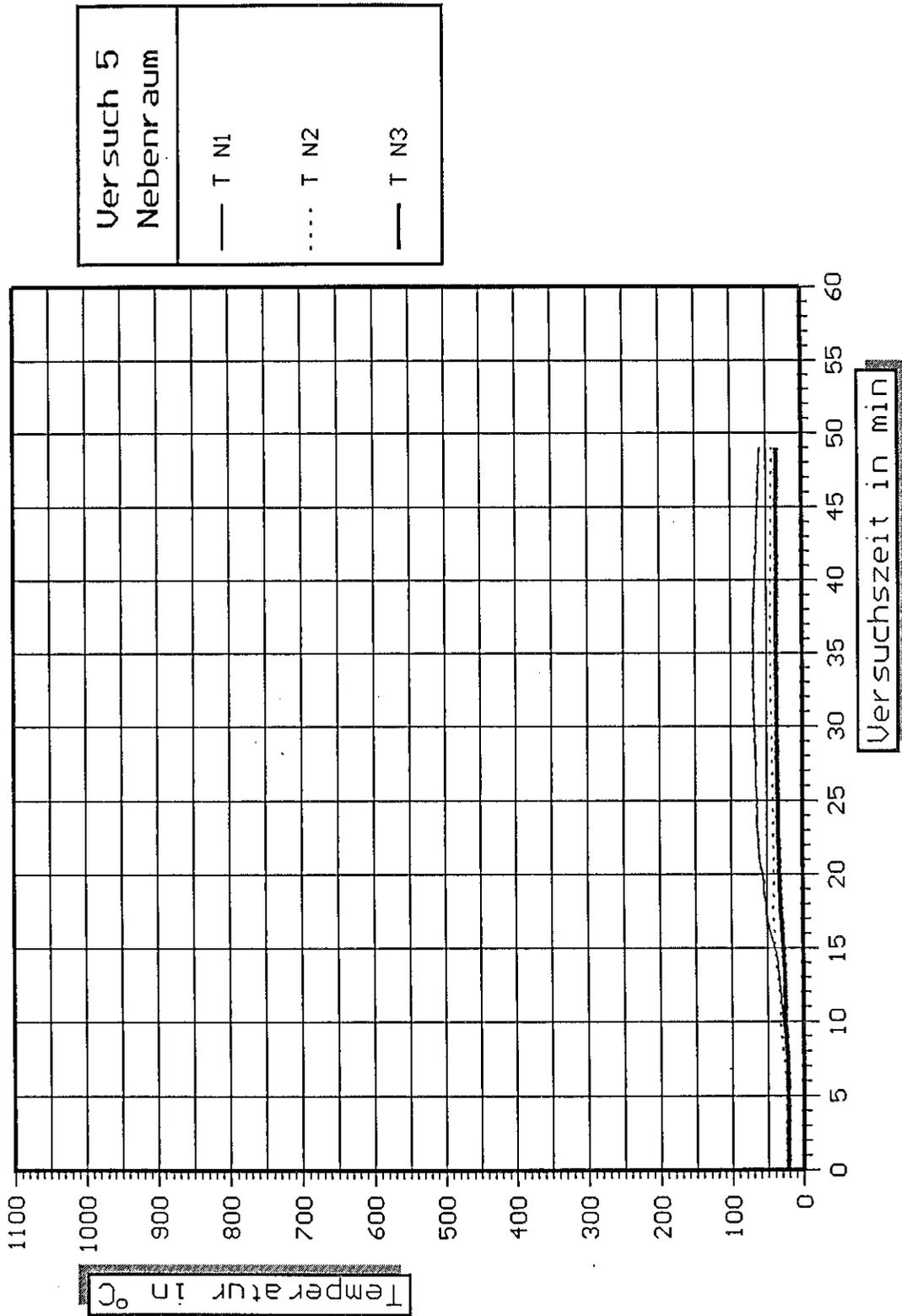
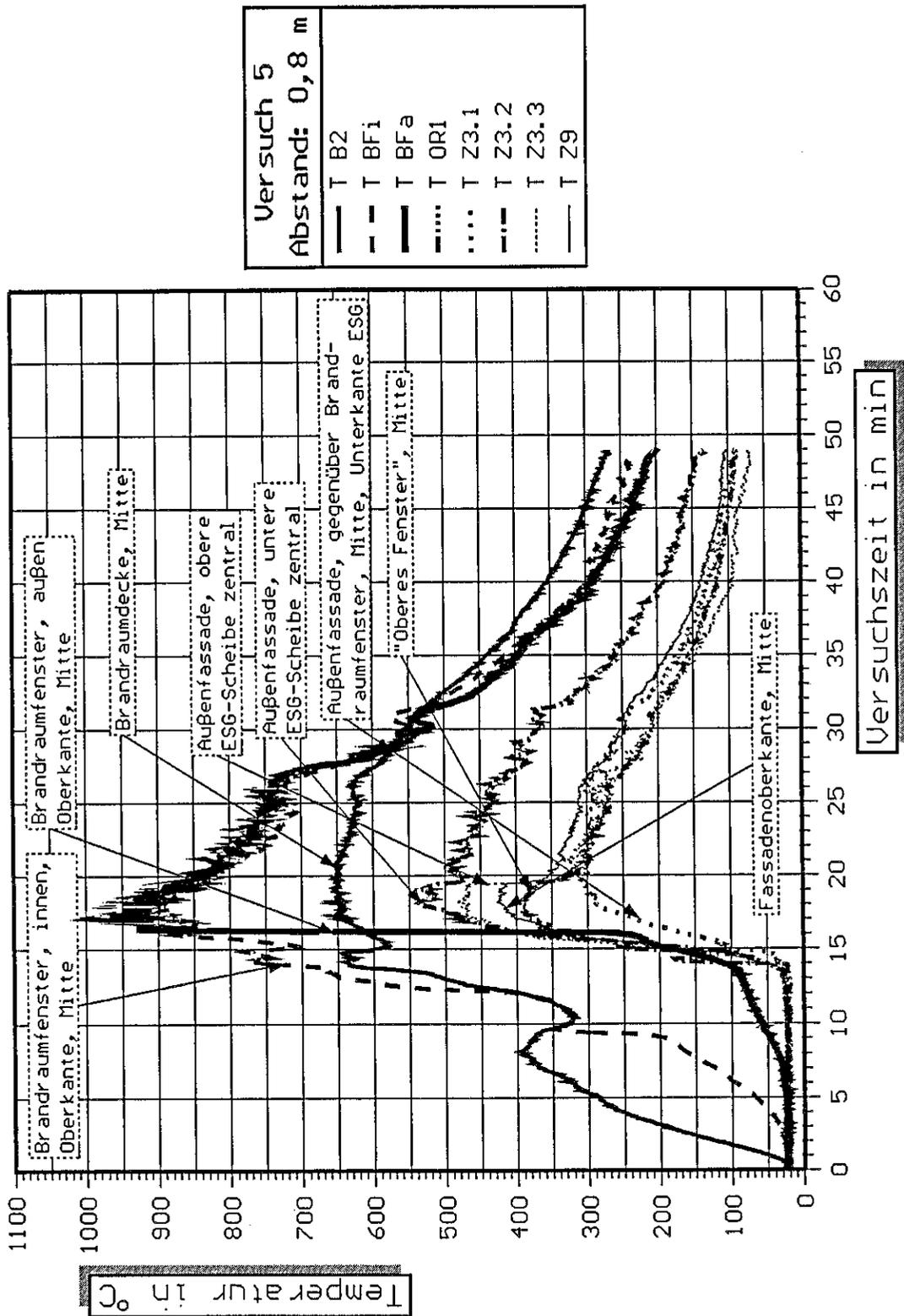
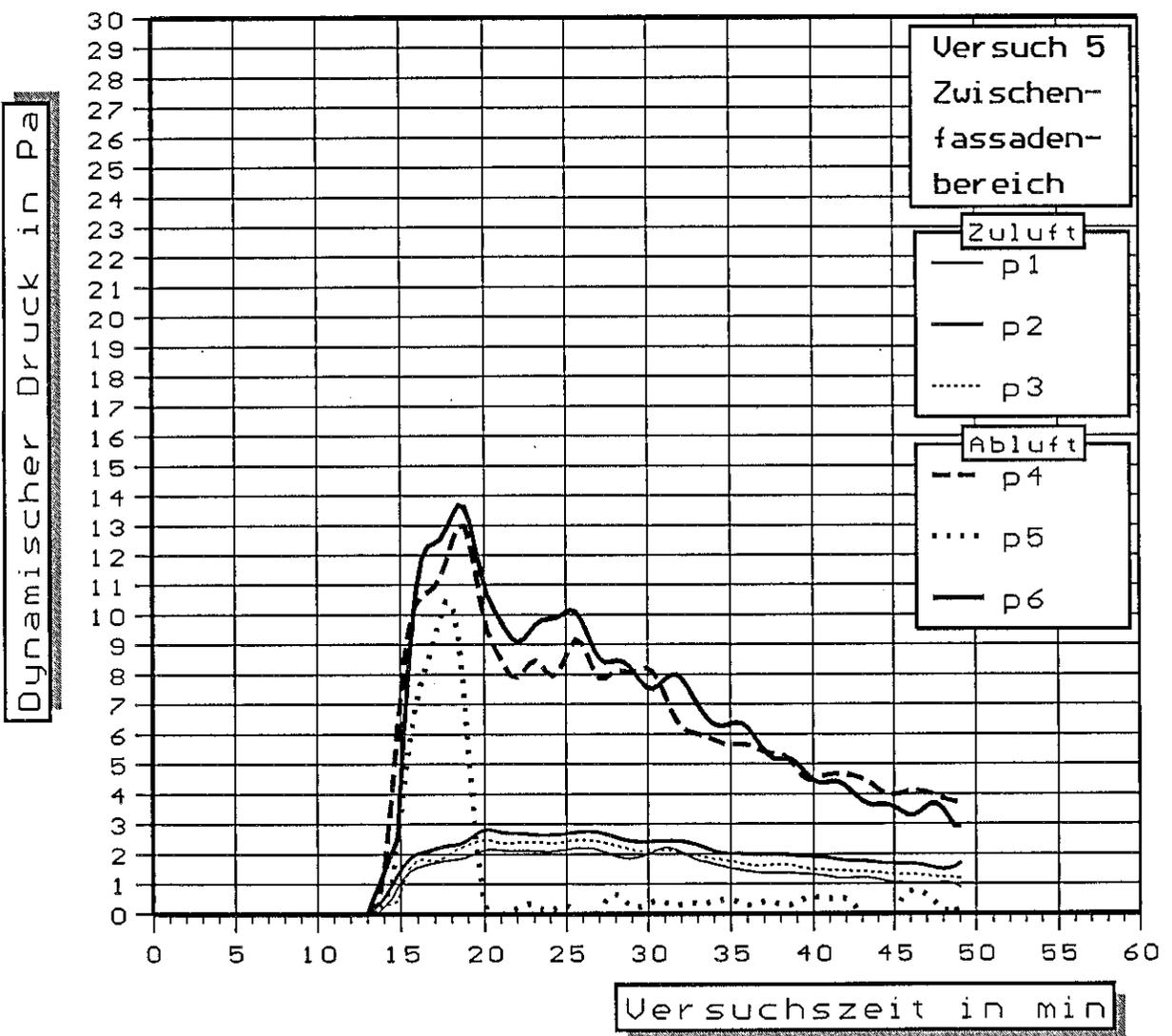


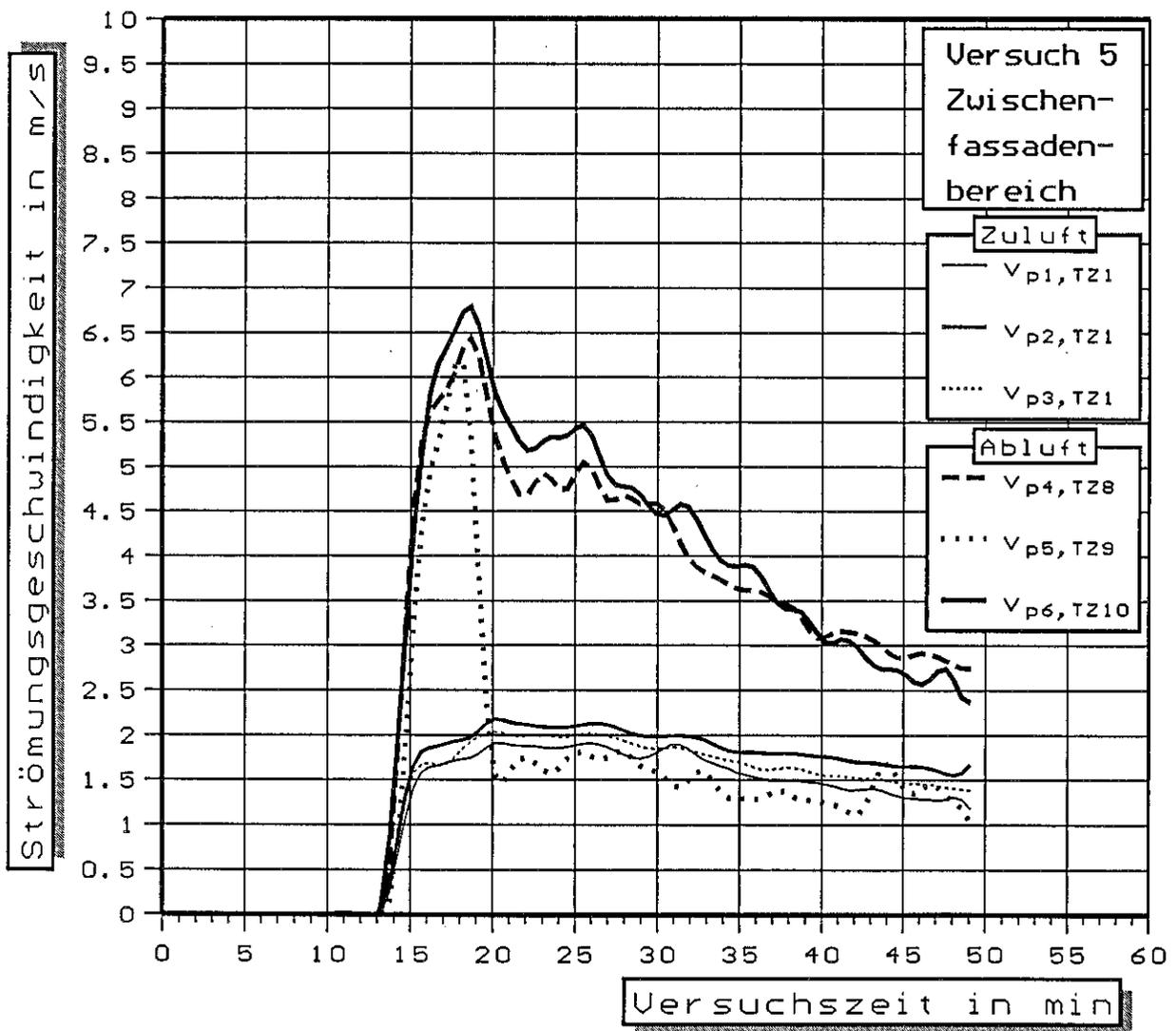
Bild 24 Zeitliche Temperaturverläufe im Nebenraum.  
- Versuch 5 -



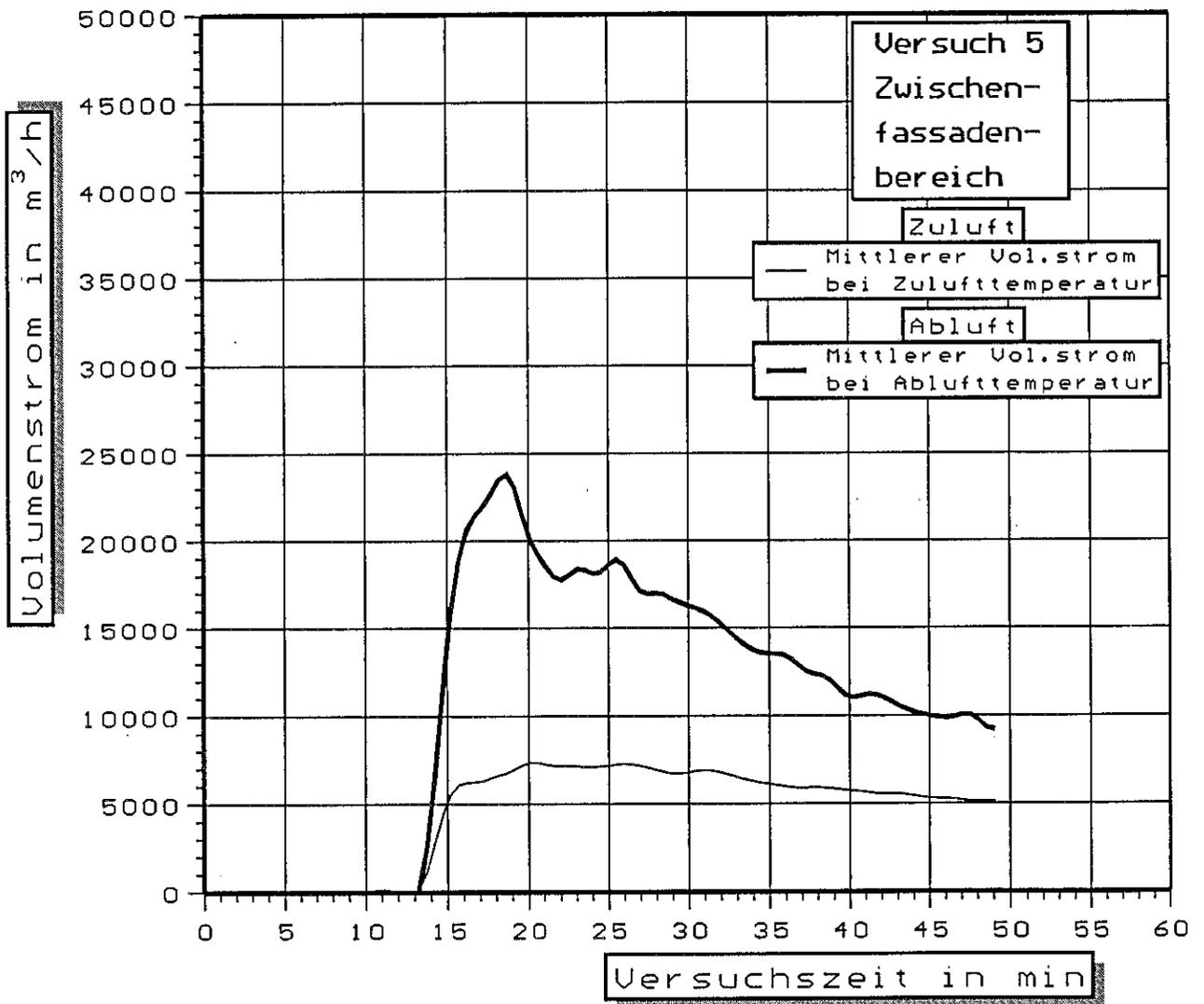
**Bild 25** Vergleich ausgewählter zeitlicher Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich, sowie an der Außenfassade.  
- Versuch 5 -



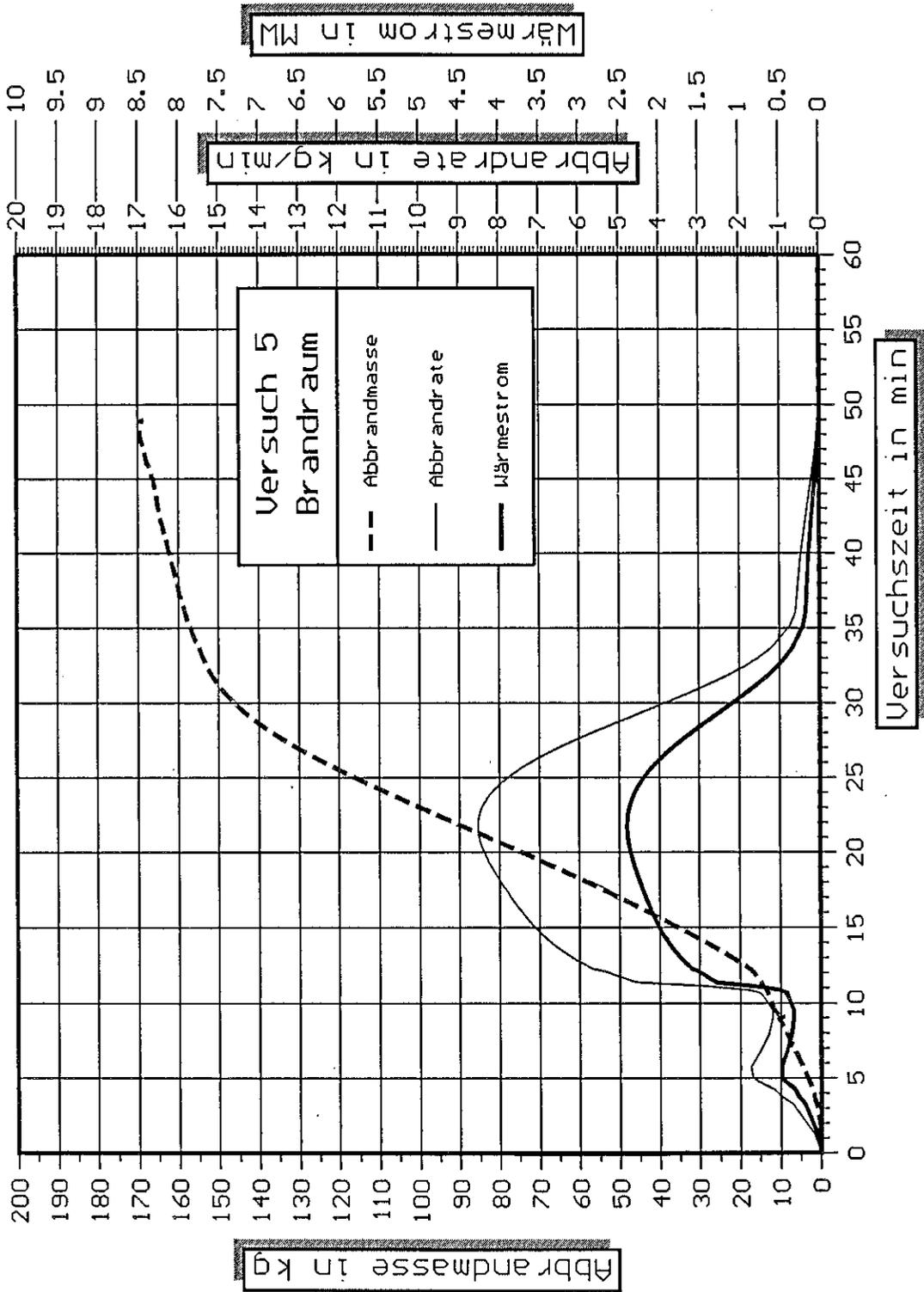
**Bild 26** Zeitliche Verläufe des dynamischen Druckes an der Zu- und Abluftöffnung.  
- Versuch 5 -



**Bild 27** Zeitliche Verläufe der Strömungsgeschwindigkeit an der Zu- und Abluftöffnung.  
- Versuch 5 -



**Bild 28** Zeitliche Verläufe der mittleren Volumenströme an der Zu- und Abluftöffnung bei Zu- bzw. Ablufttemperatur.  
- Versuch 5 -



**Bild 29** Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung.  
- Versuch 5 -

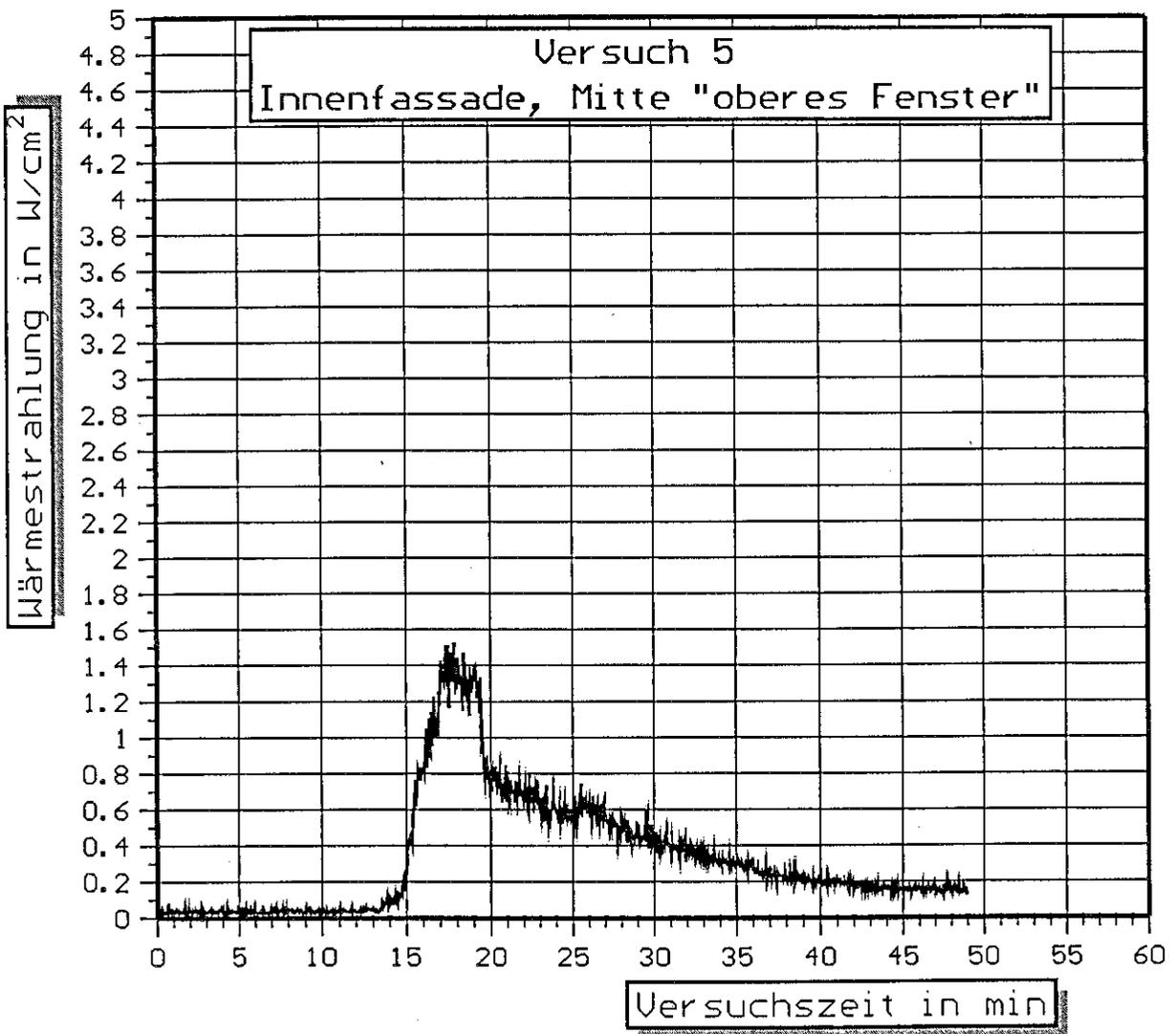


Bild 30 Zeitlicher Verlauf der Wärmestrahlung in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade.  
- Versuch 5 -

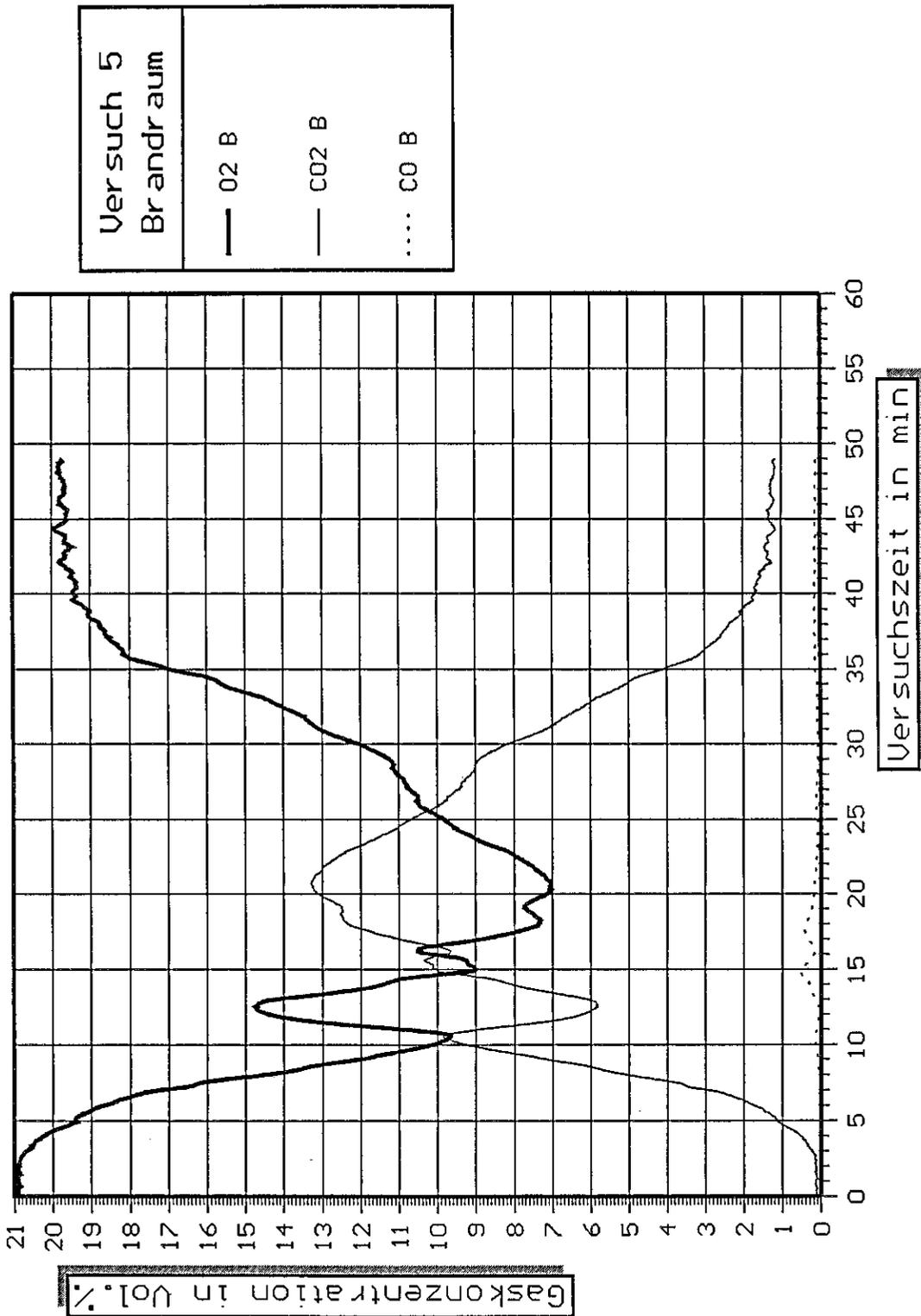


Bild 31.1 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.  
- Versuch 5 -

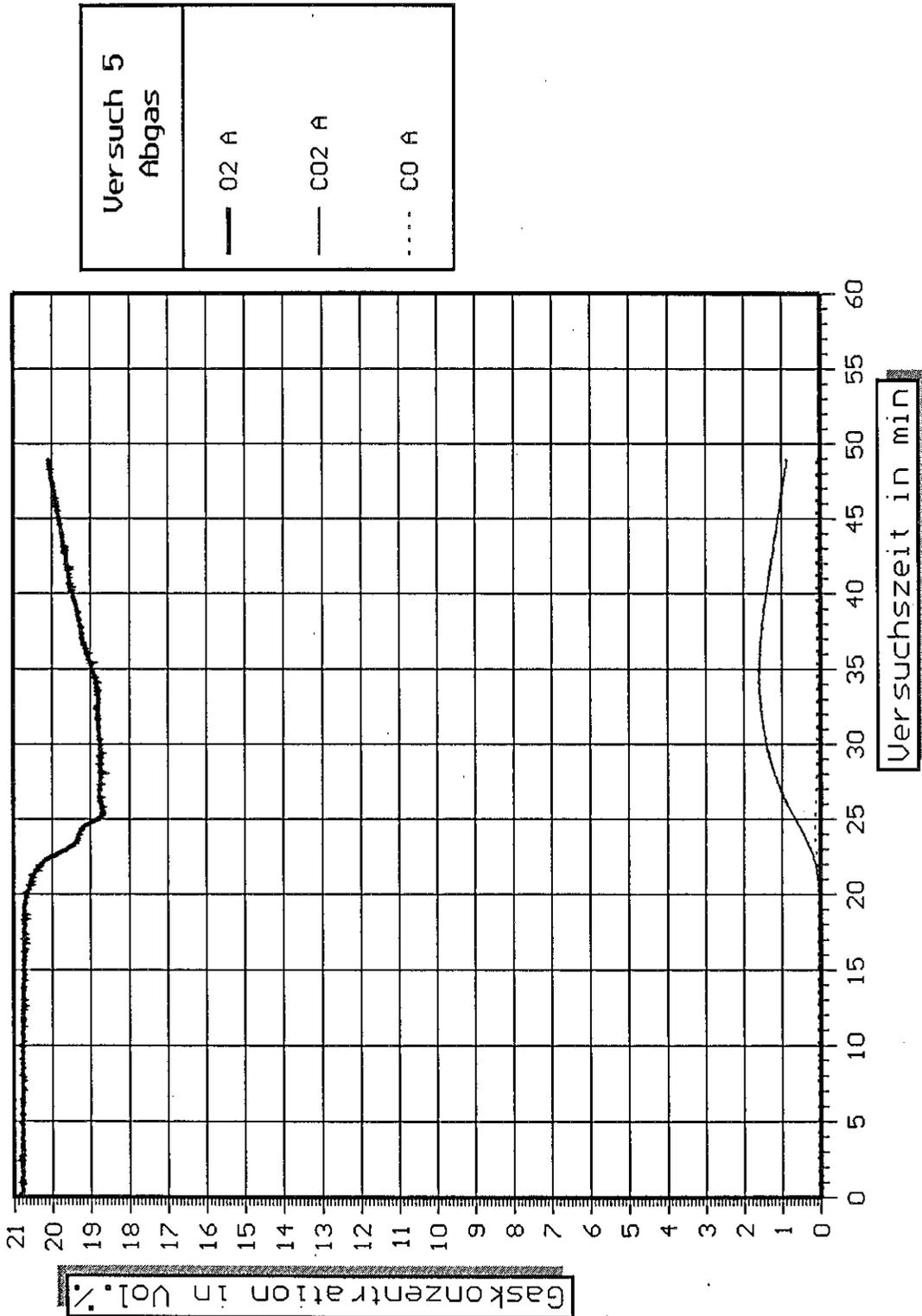


Bild 31.2 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration in dem aus der Versuchshalle abgesaugten Abgasvolumenstrom.  
- Versuch 5 -

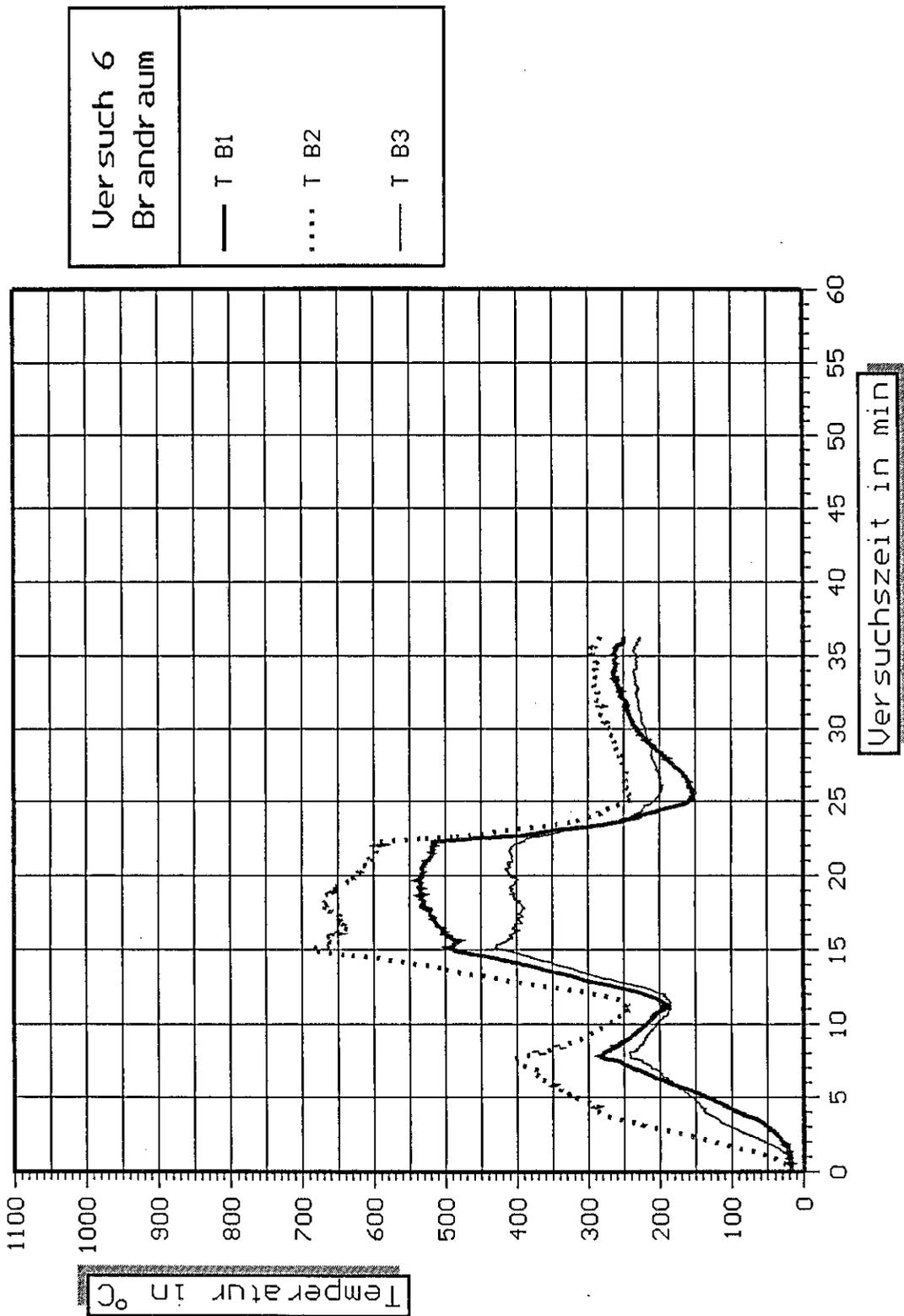


Bild 32 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes.  
- Versuch 6 -

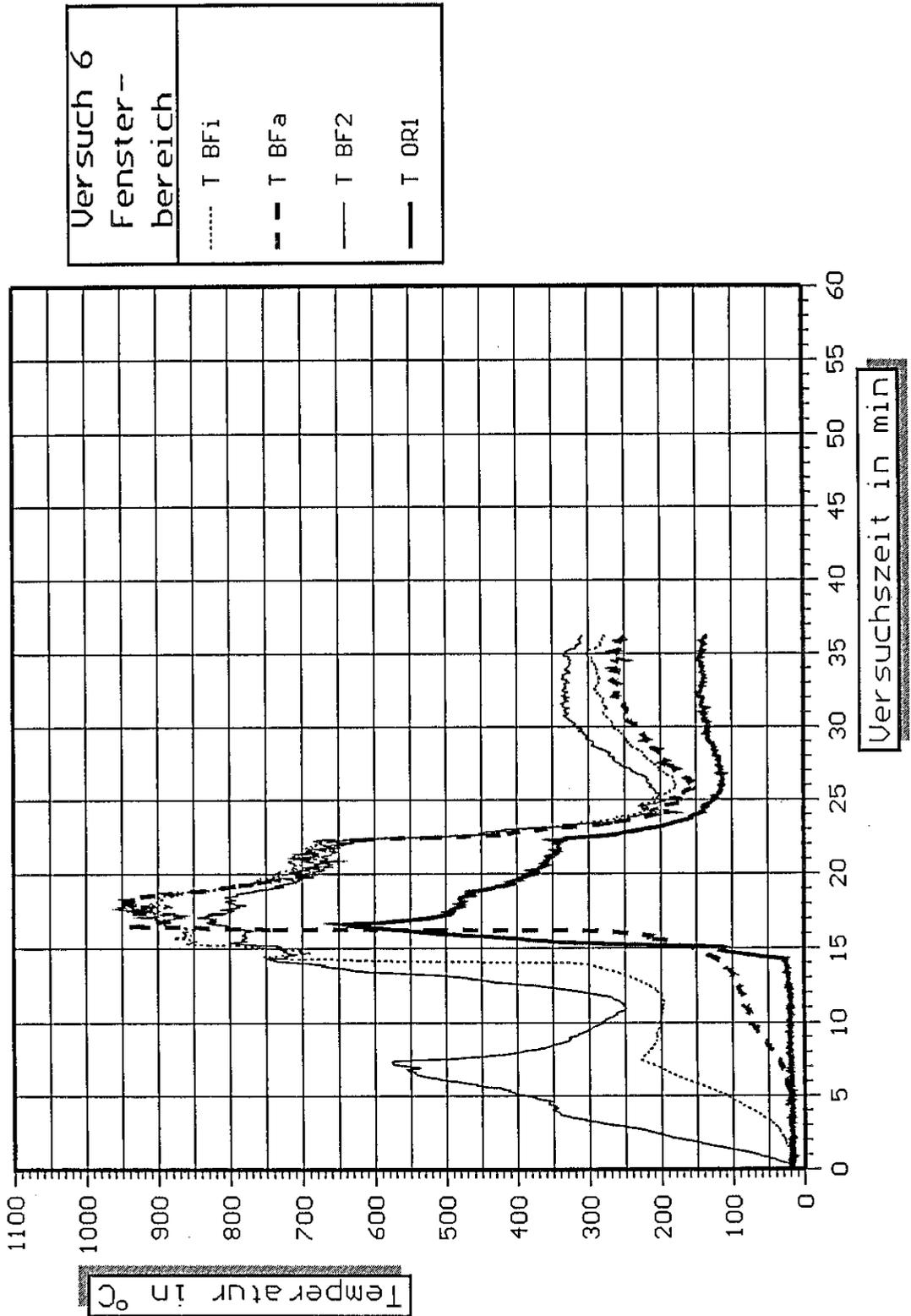


Bild 33 Zeitliche Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade.  
- Versuch 6 -

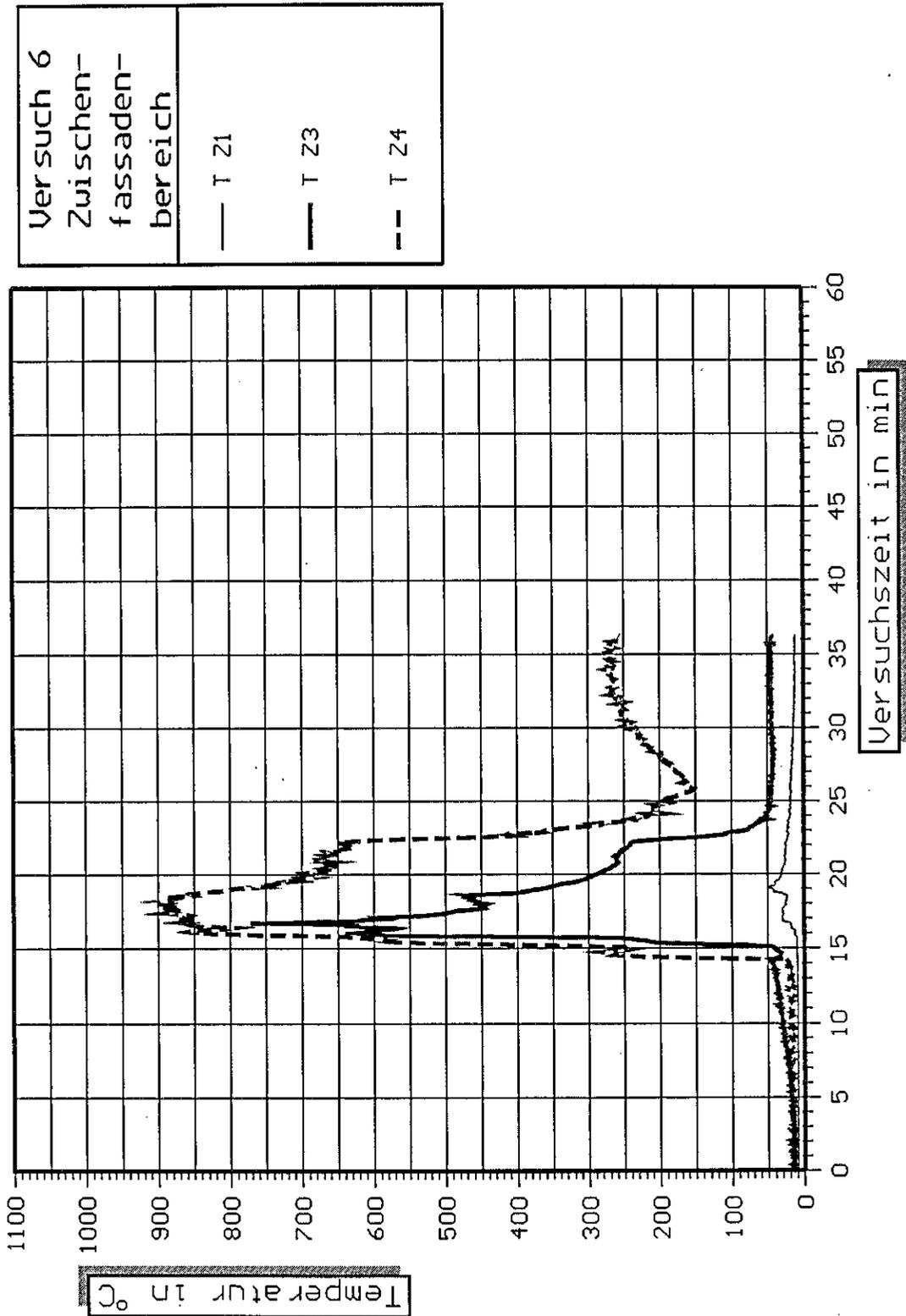


Bild 34 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.  
- Versuch 6 -

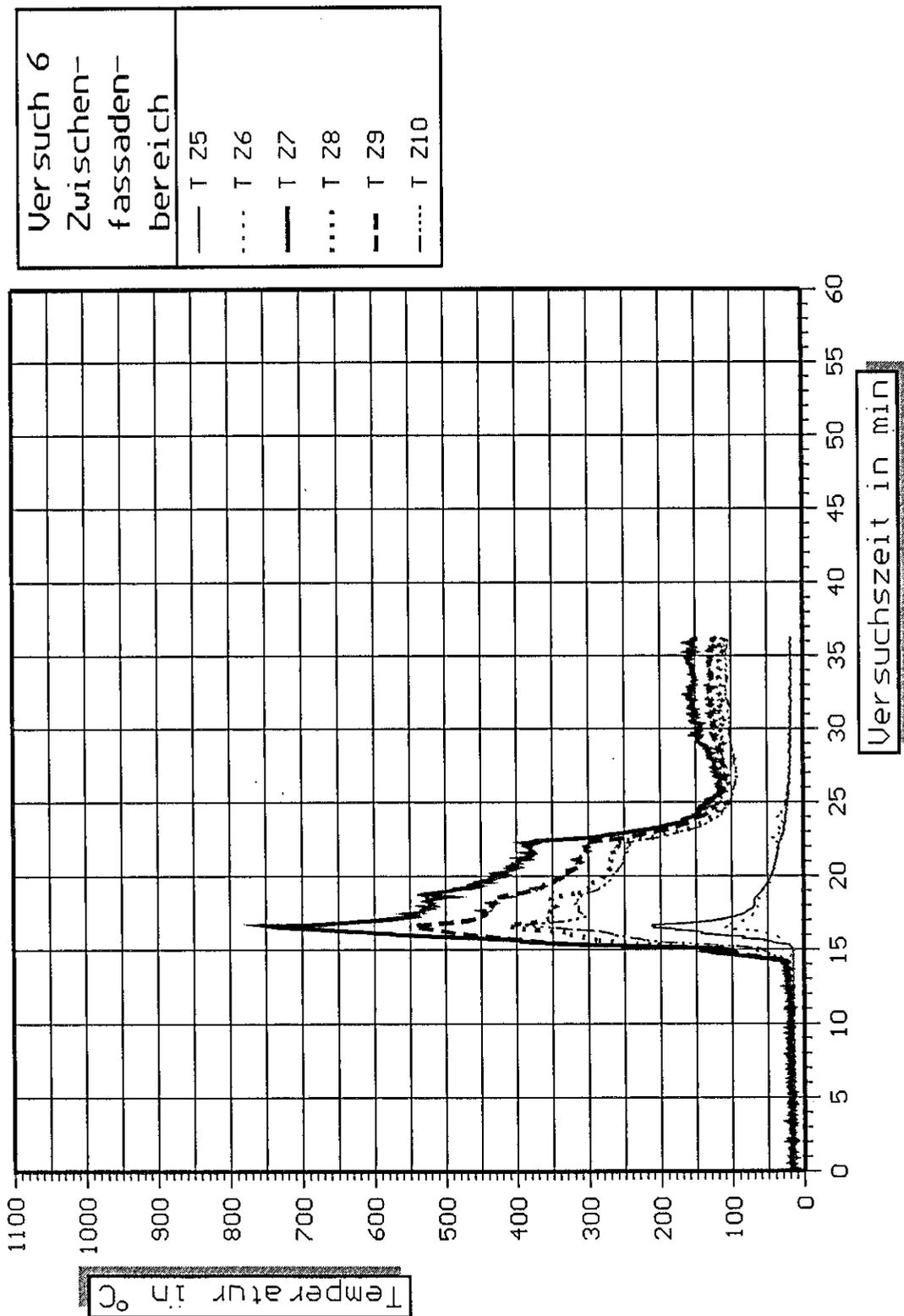


Bild 35 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.  
- Versuch 6 -

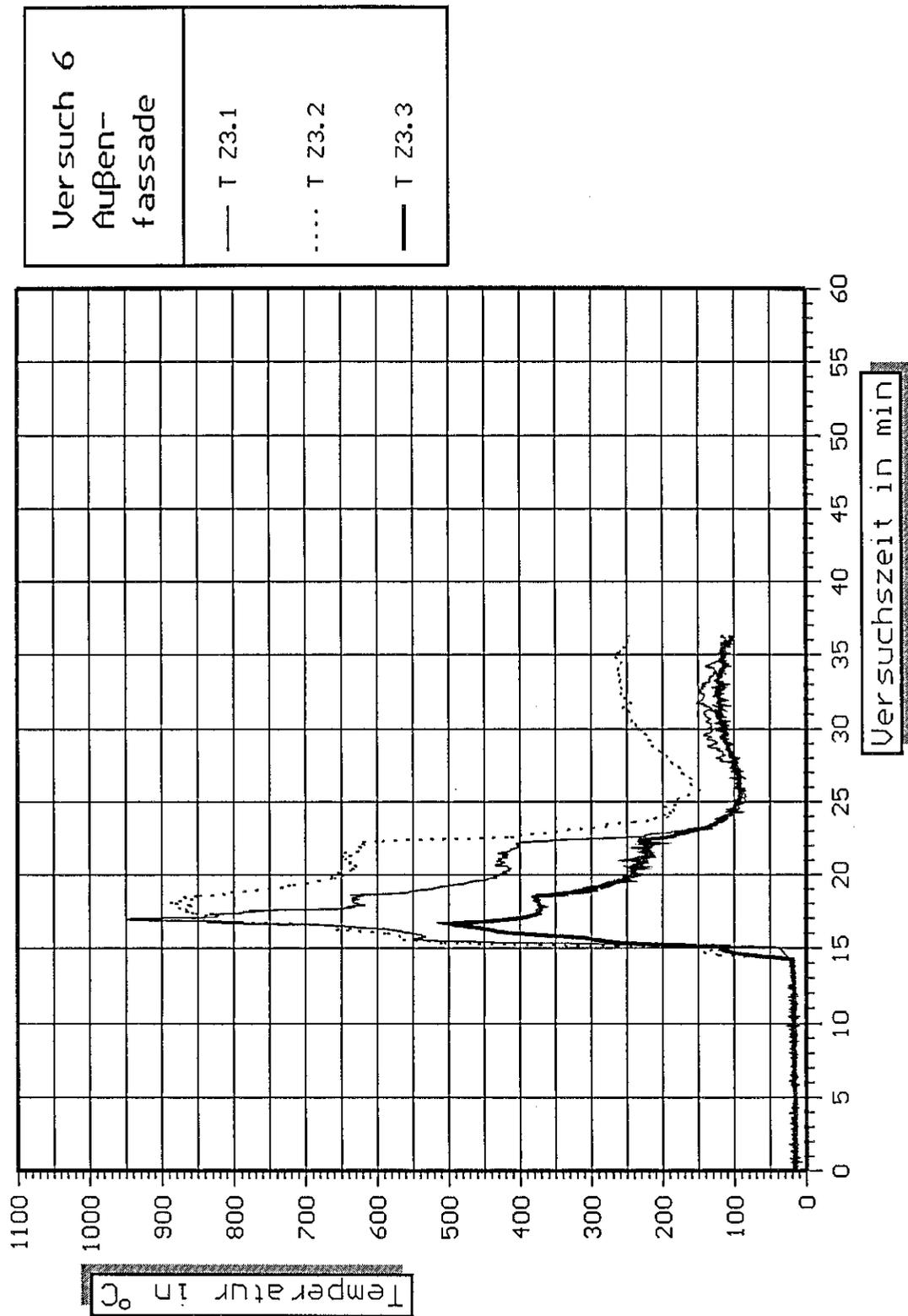


Bild 36 Zeitliche Temperaturverläufe an der ESG-Verglasung der Außenfassade.  
- Versuch 6 -

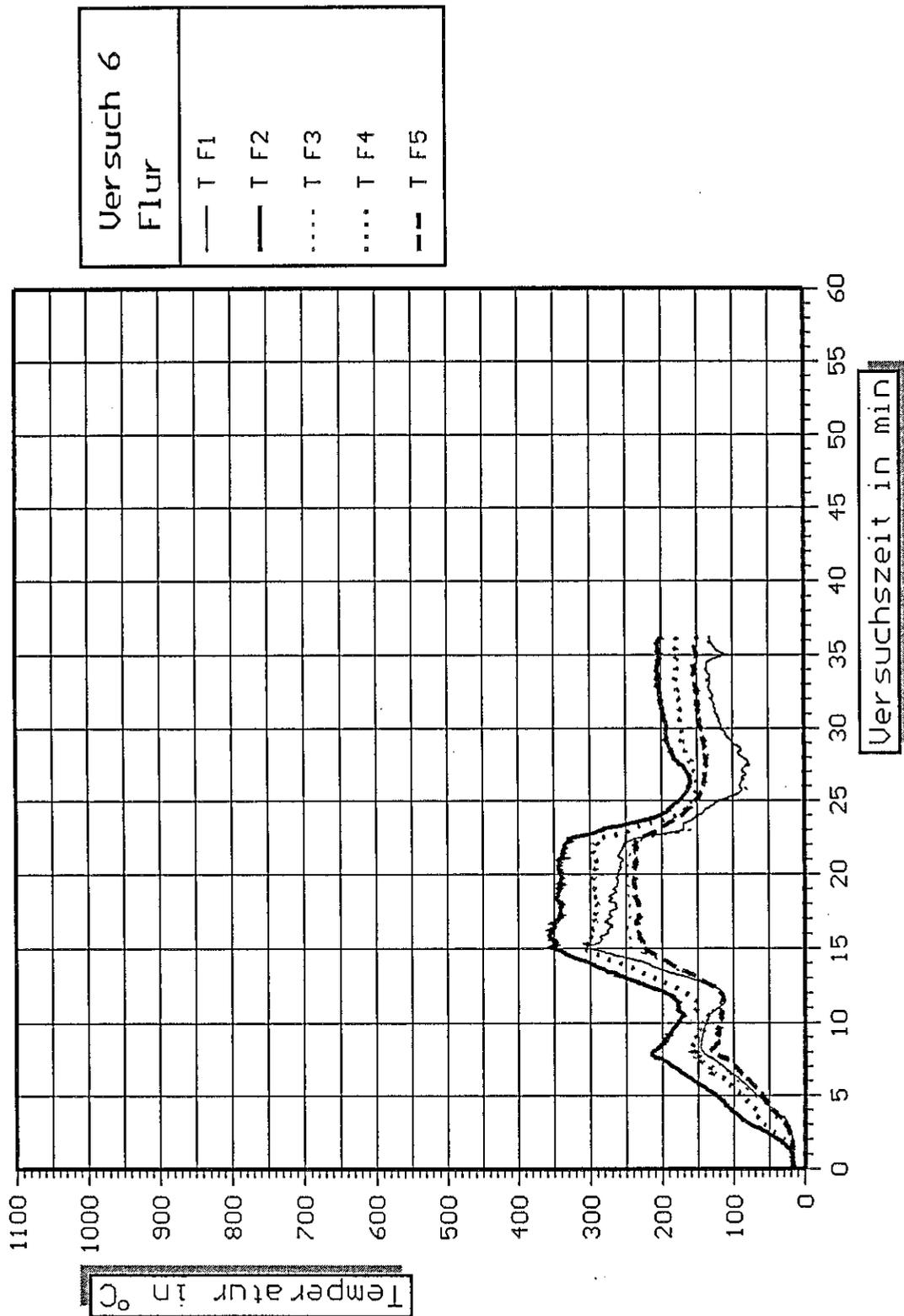


Bild 37 Zeitliche Temperaturverläufe im Flur.  
- Versuch 6 -

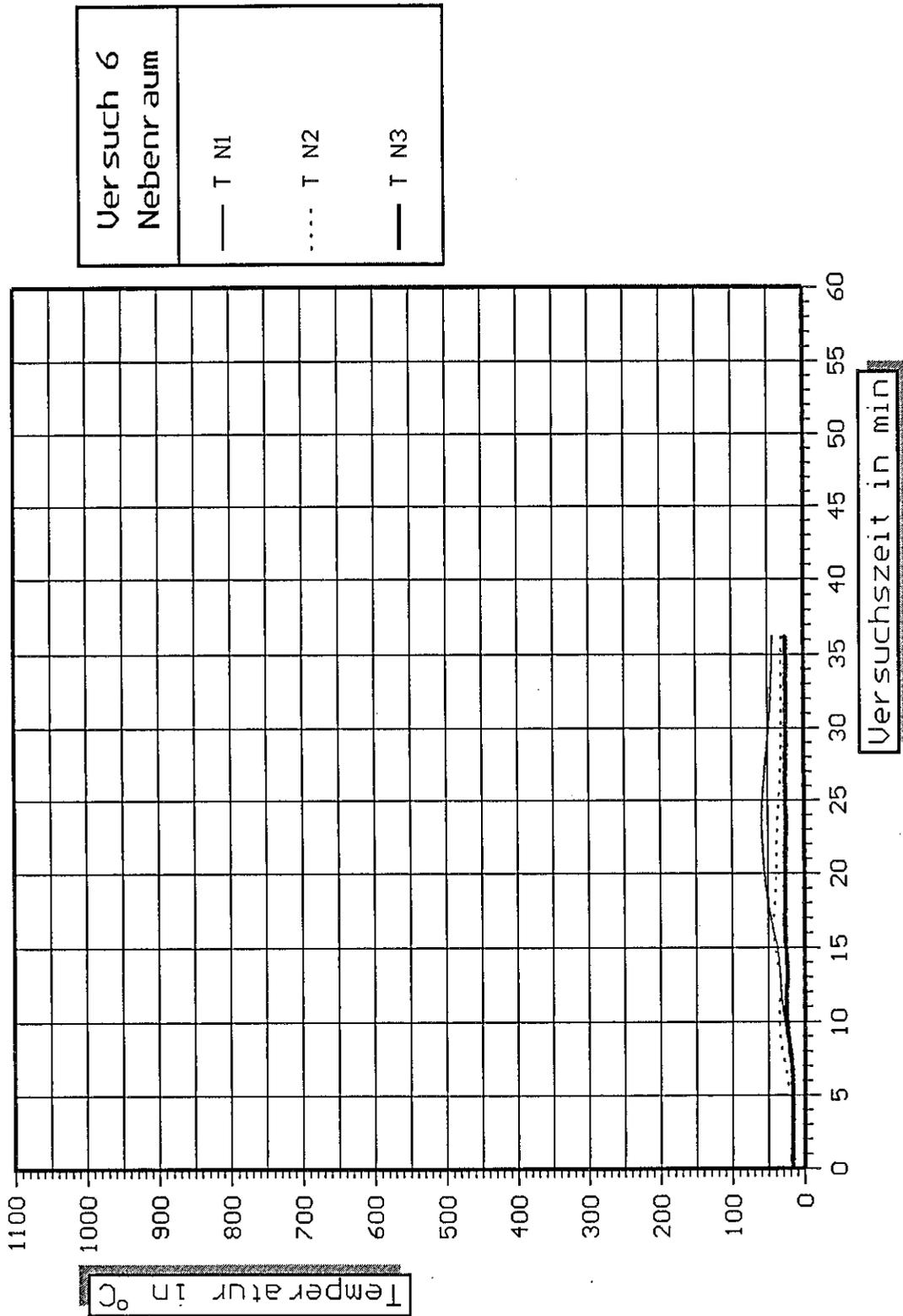


Bild 38      Zeitliche Temperaturverläufe im Nebenraum.  
- Versuch 6 -

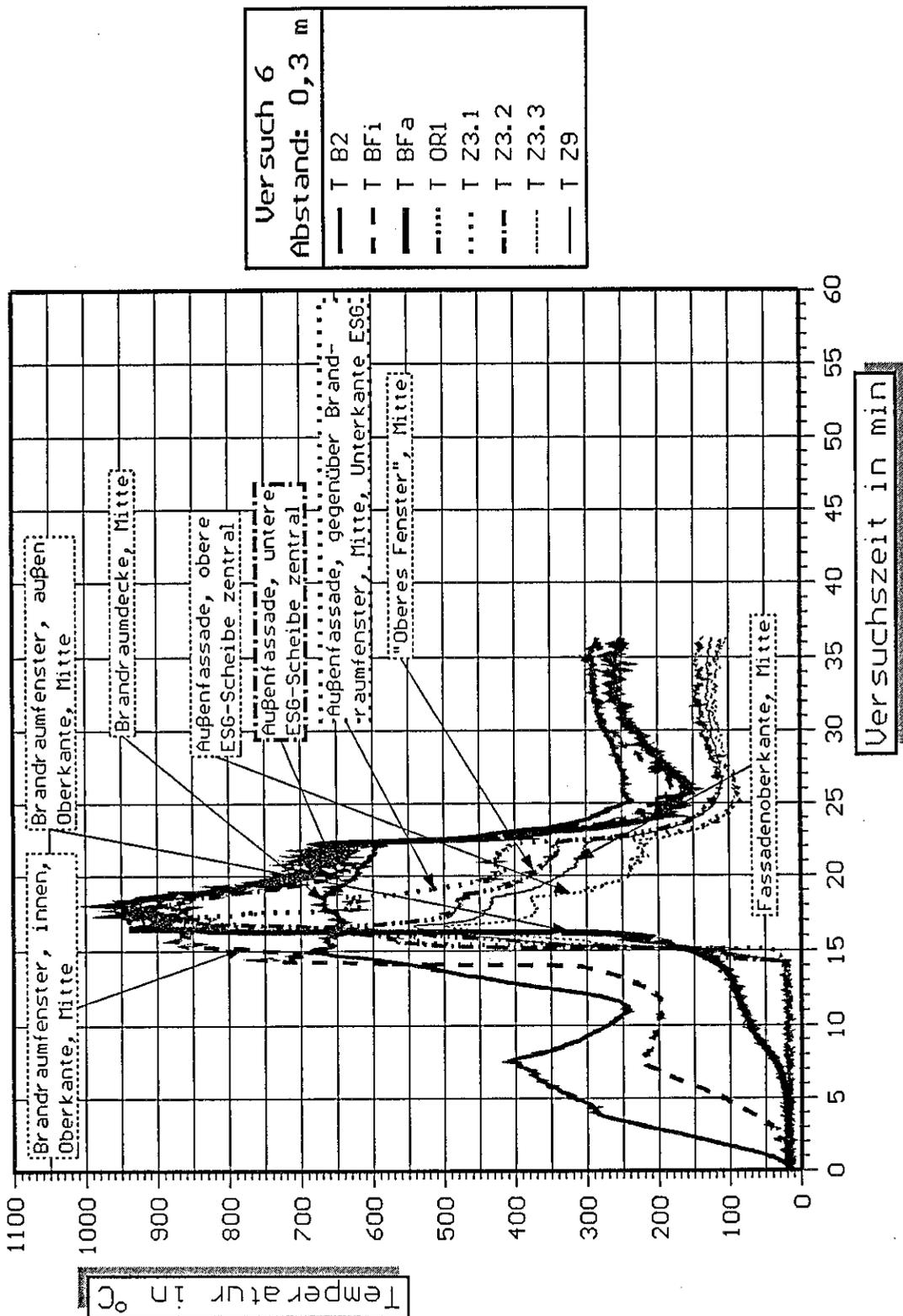
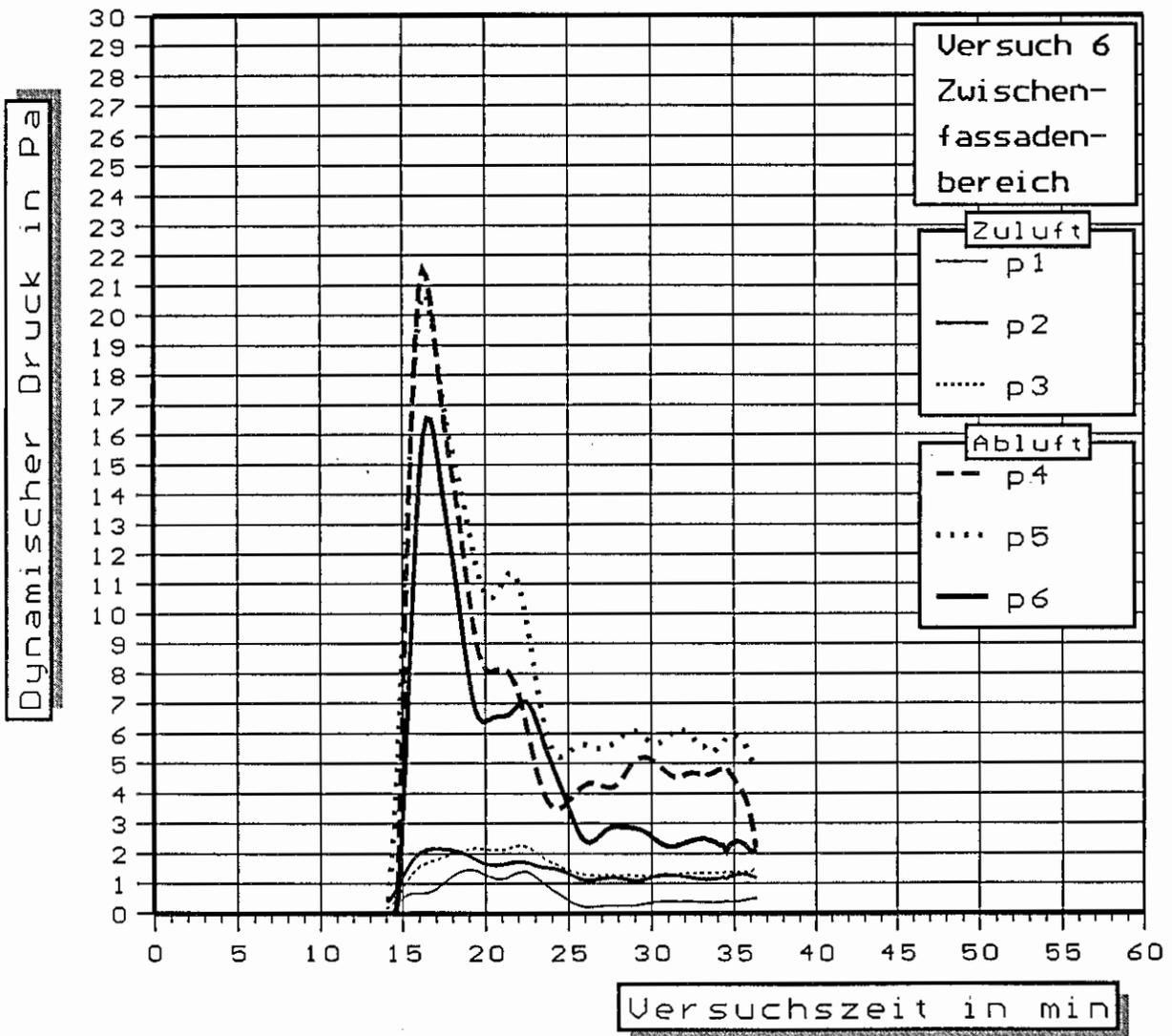
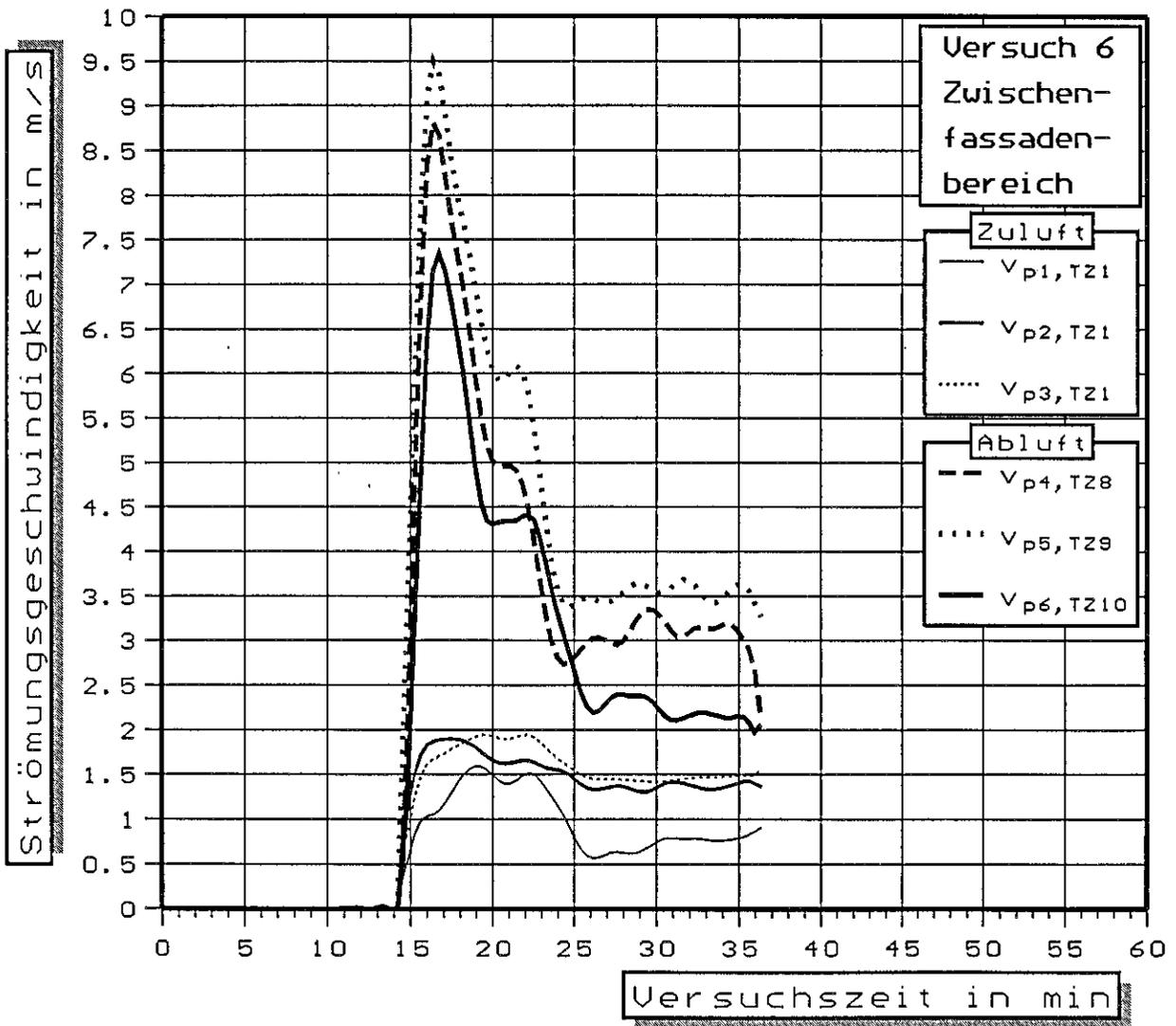


Bild 39 Vergleich ausgewählter zeitlicher Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich, sowie an der Außenfassade. - Versuch 6 -



**Bild 40** Zeitliche Verläufe des dynamischen Druckes an der Zu- und Abluftöffnung.  
- Versuch 6 -



**Bild 41** Zeitliche Verläufe der Strömungsgeschwindigkeit an der Zu- und Abluftöffnung.  
- Versuch 6 -

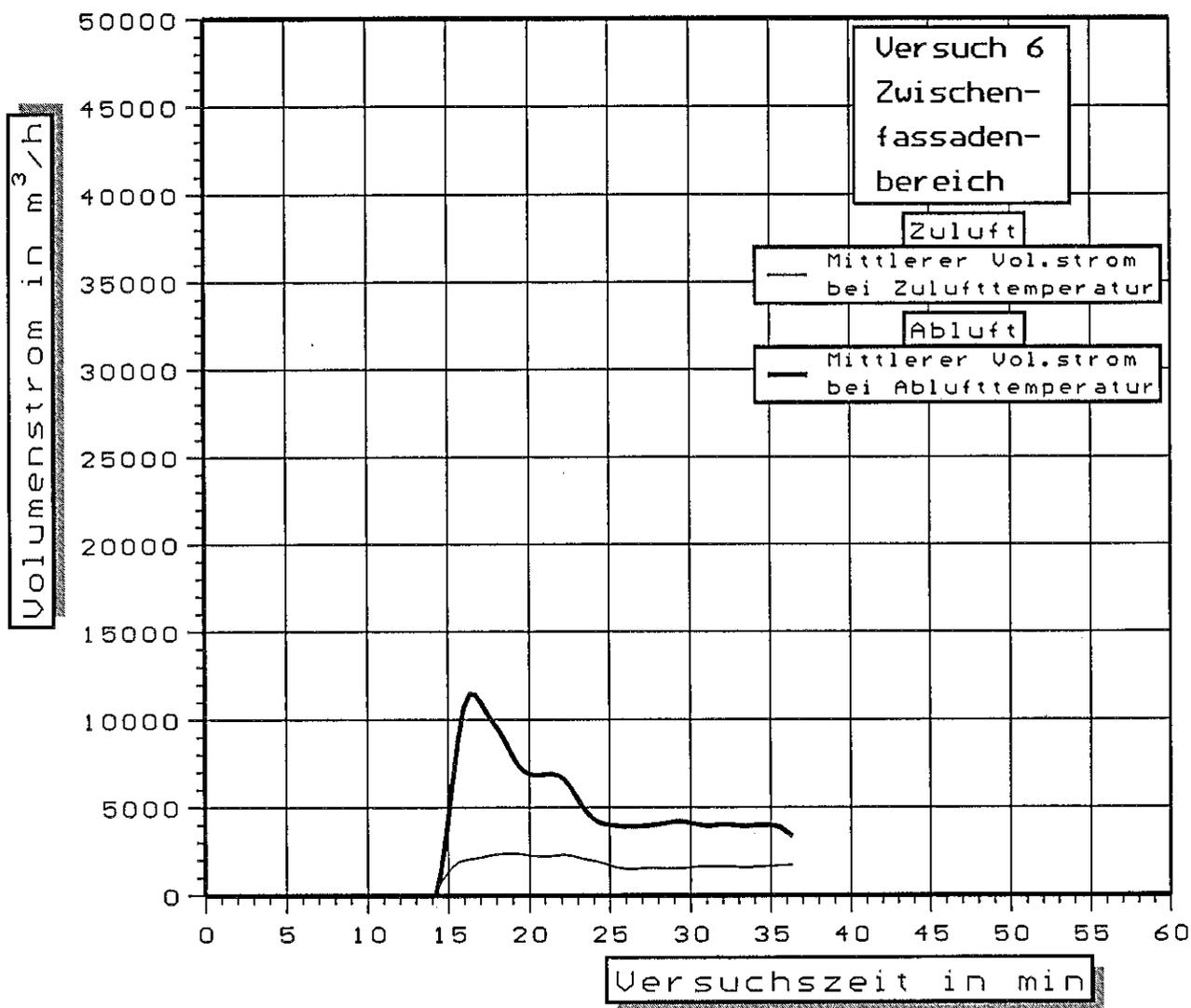
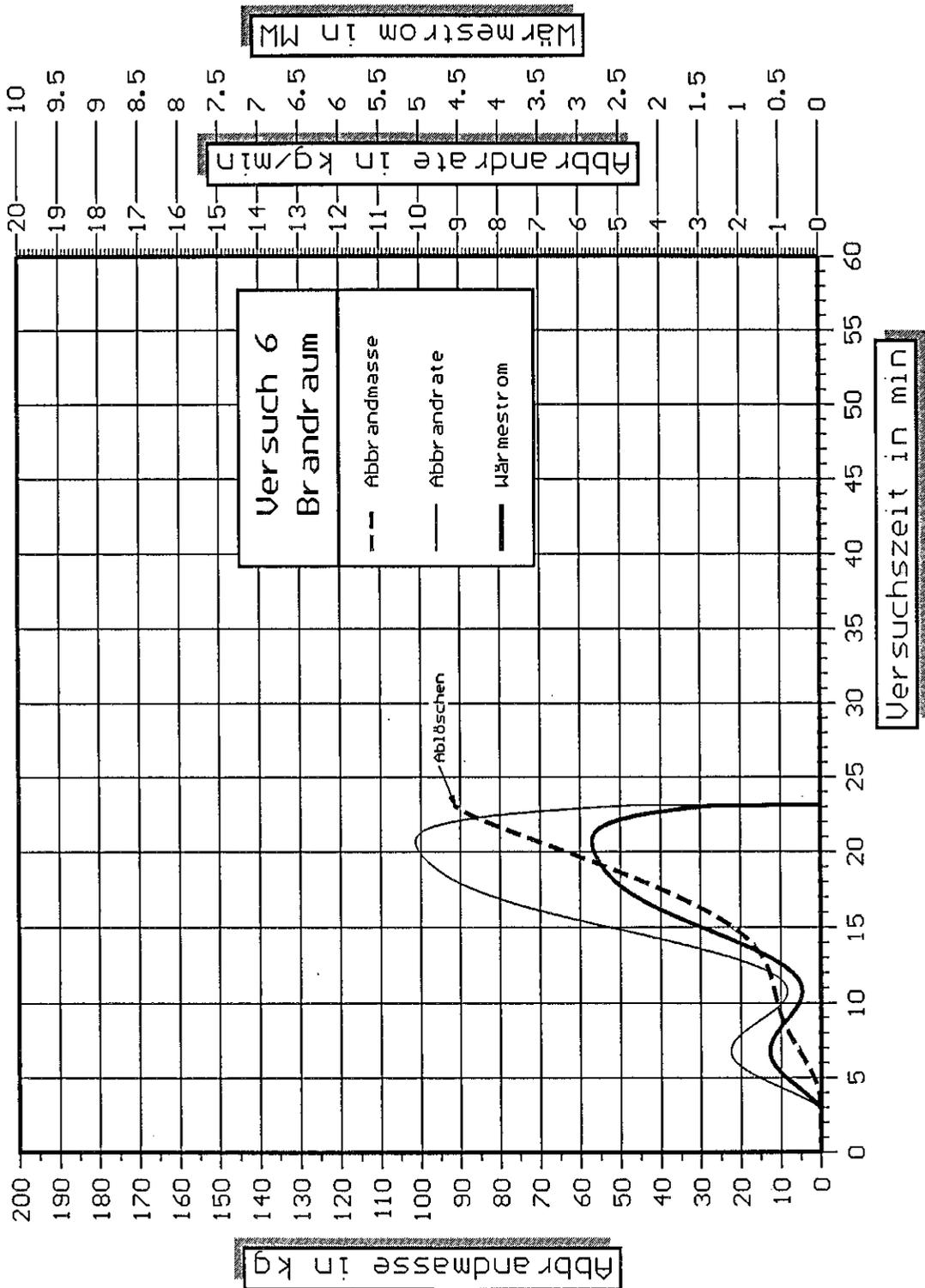


Bild 42 Zeitliche Verläufe der mittleren Volumenströme an der Zu- und Abluftöffnung bei Zu- bzw. Ablufttemperatur.  
- Versuch 6 -



**Bild 43** Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung.  
- Versuch 6 -

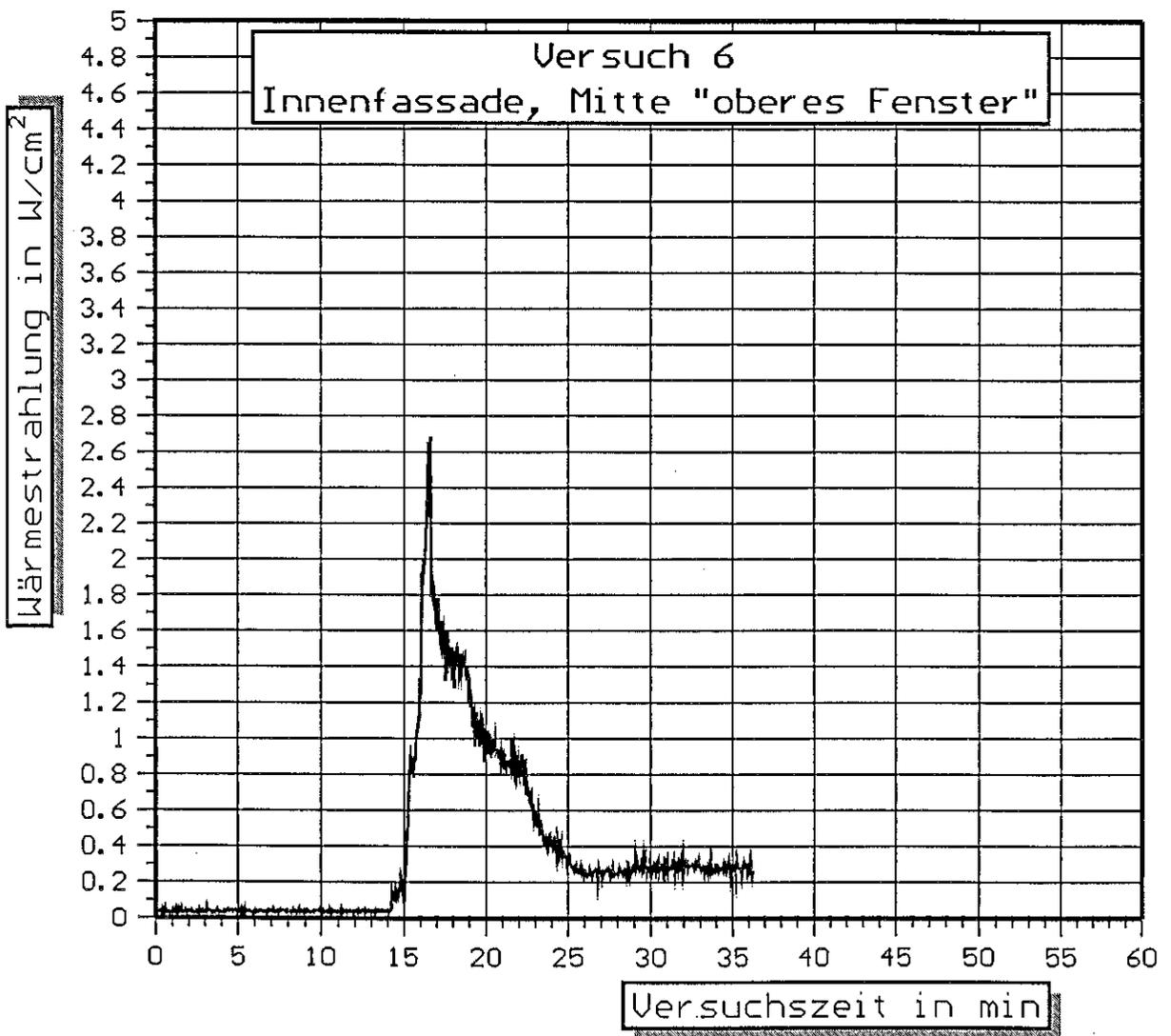


Bild 44 Zeitlicher Verlauf der Wärmestrahlung in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade.  
- Versuch 6 -

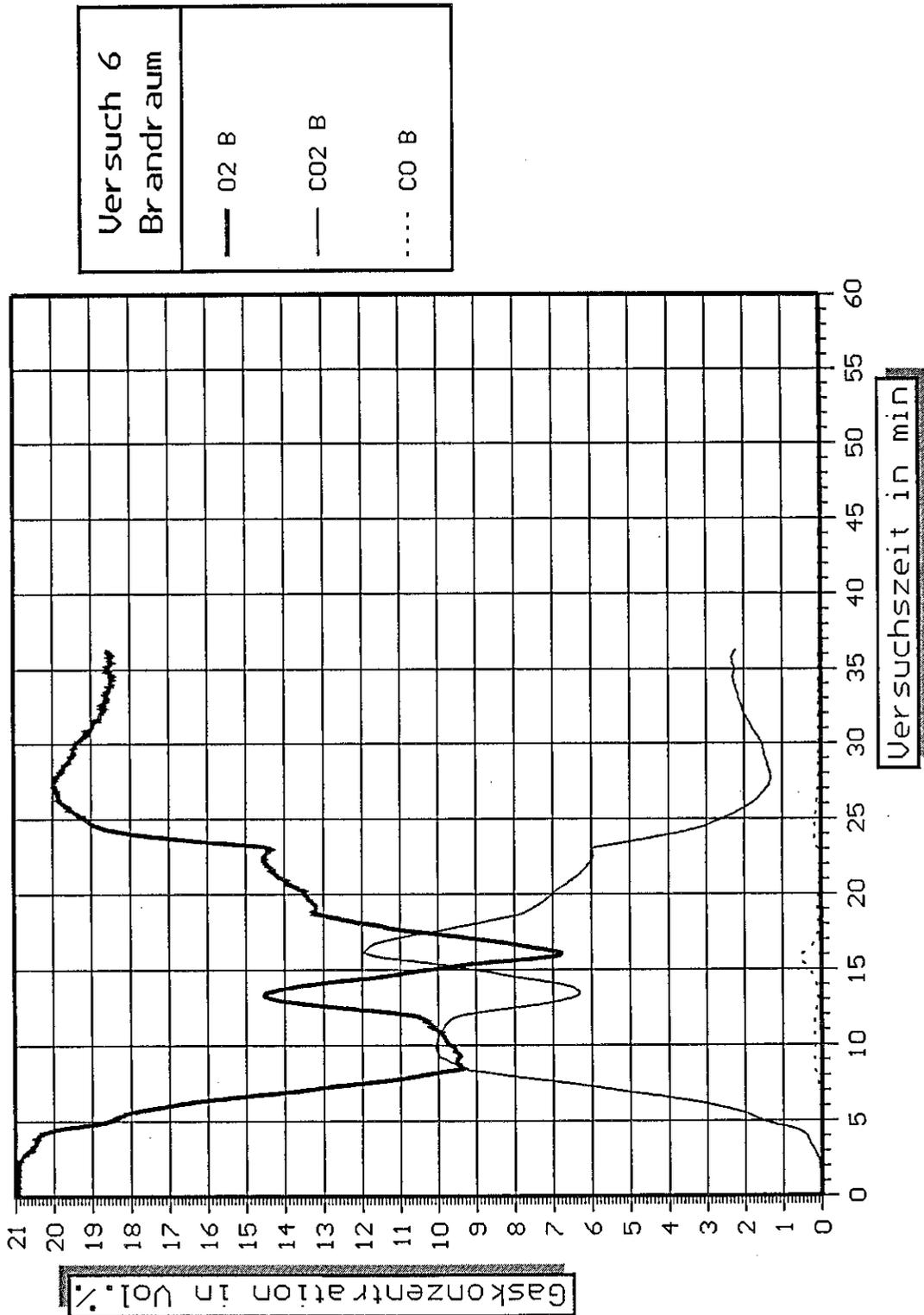


Bild 45.1 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.  
- Versuch 6 -

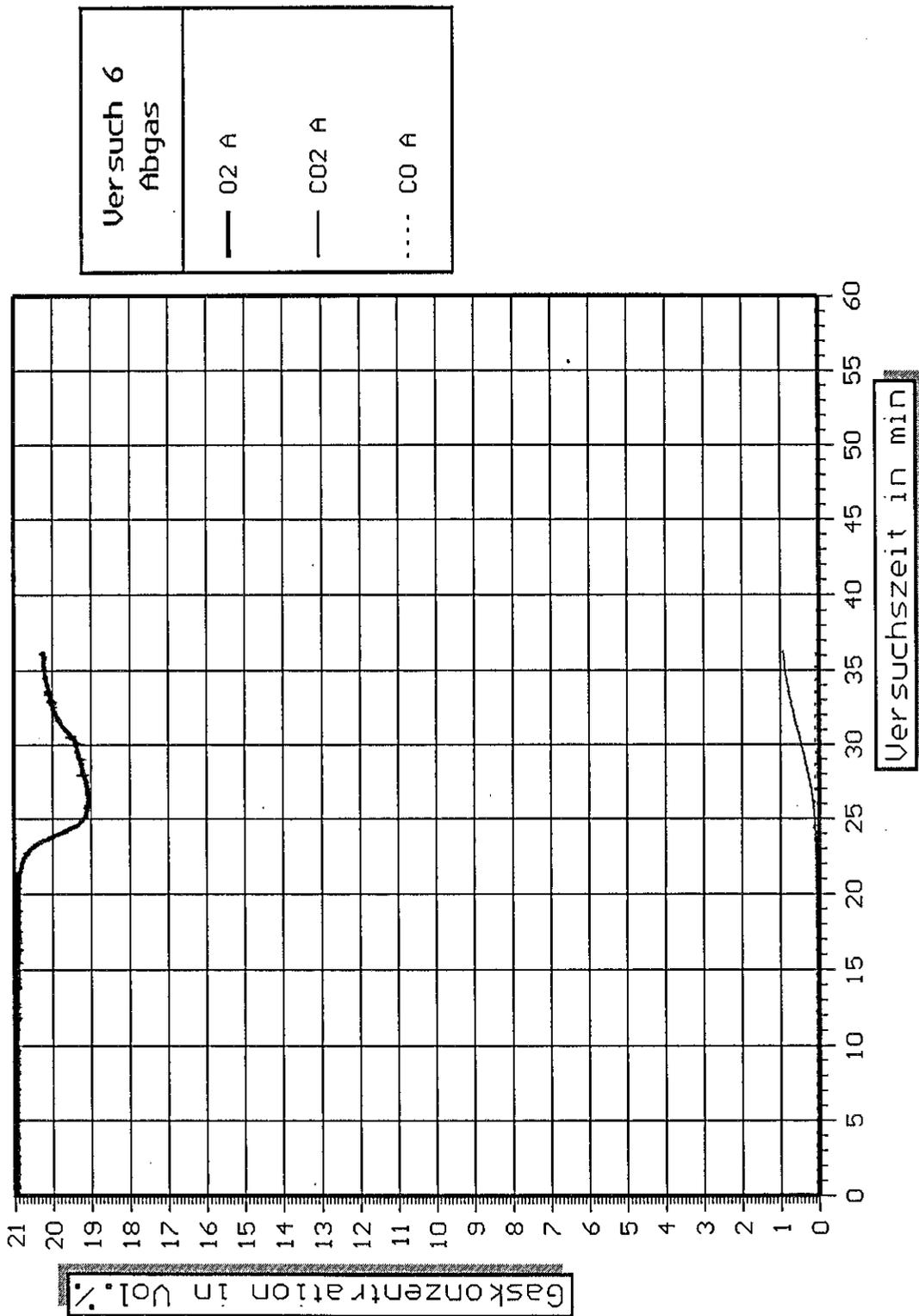


Bild 45.2 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration in dem aus der Versuchshalle abgesaugten Abgasvolumenstrom.  
- Versuch 6 -

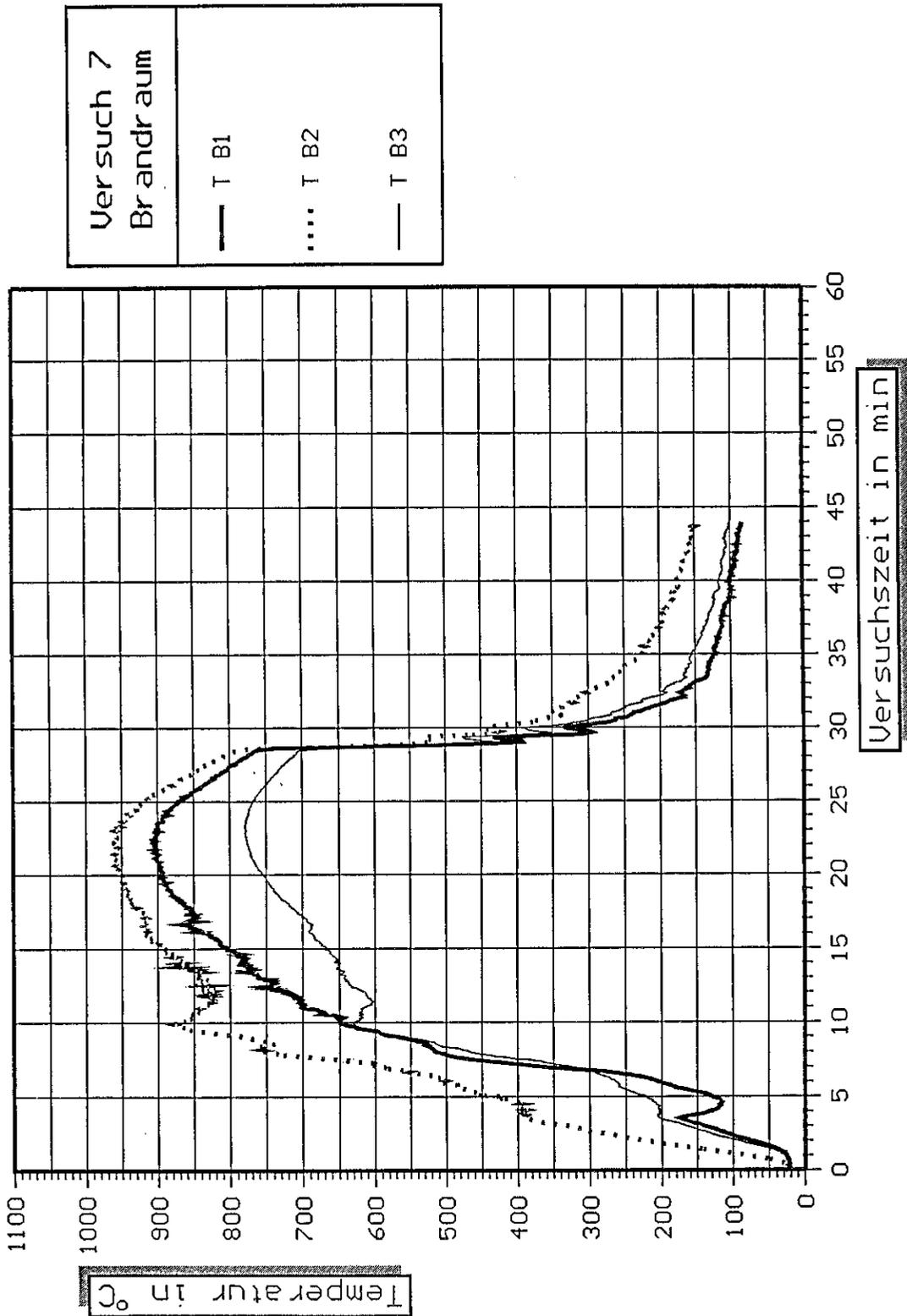


Bild 46 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes.  
- Versuch 7 -

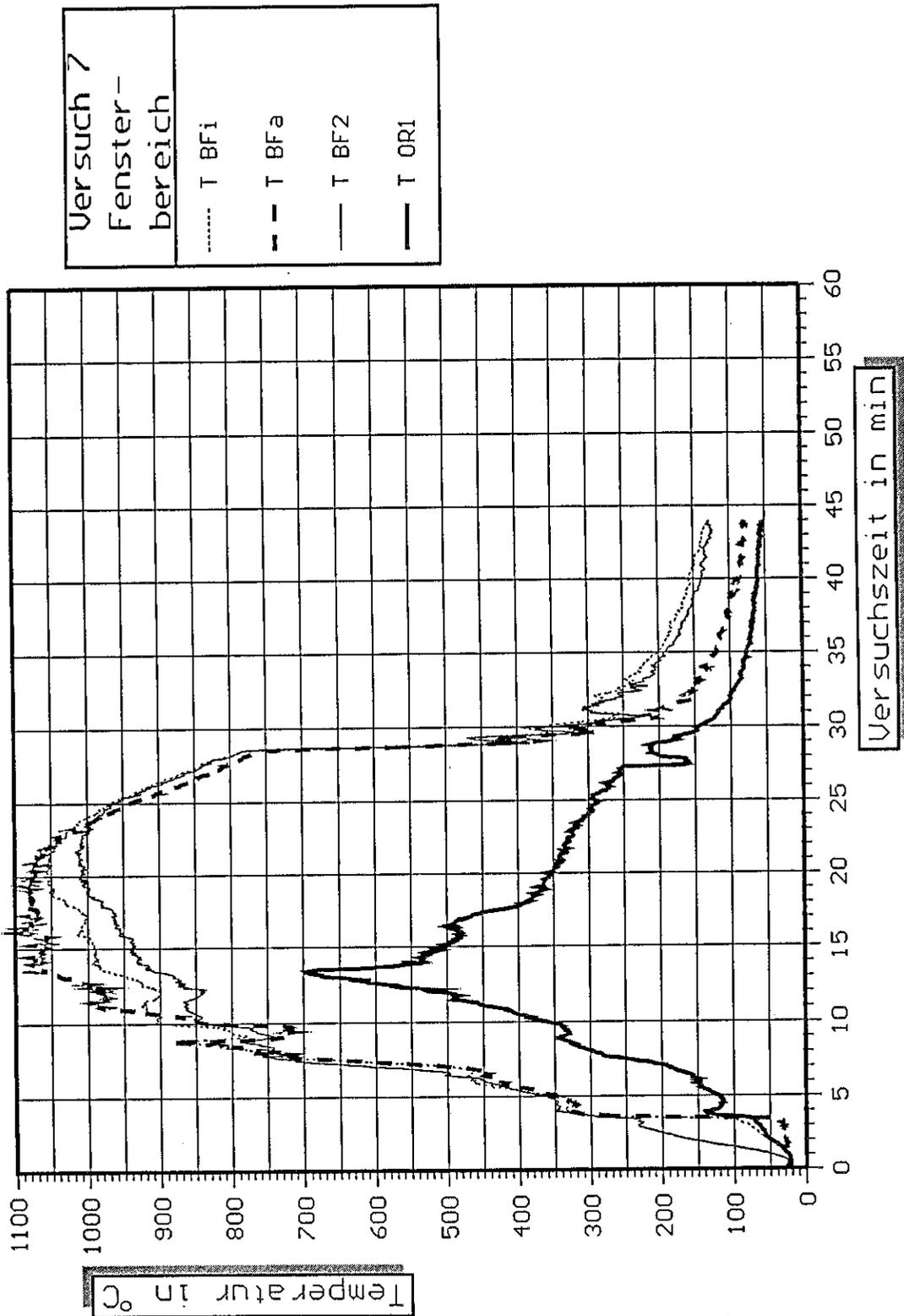


Bild 47 Zeitliche Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade.  
- Versuch 7 -

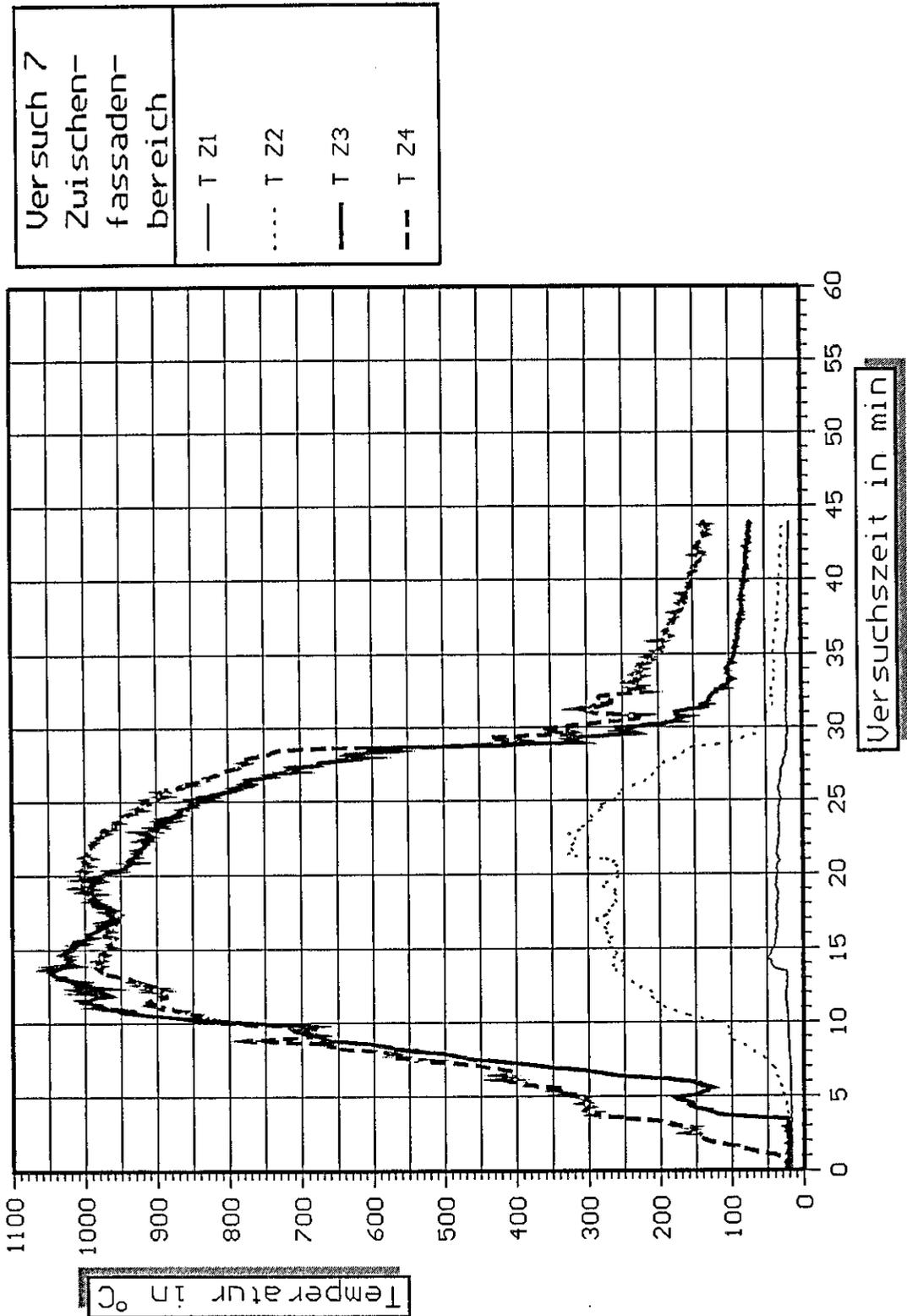


Bild 48 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.  
- Versuch 7 -

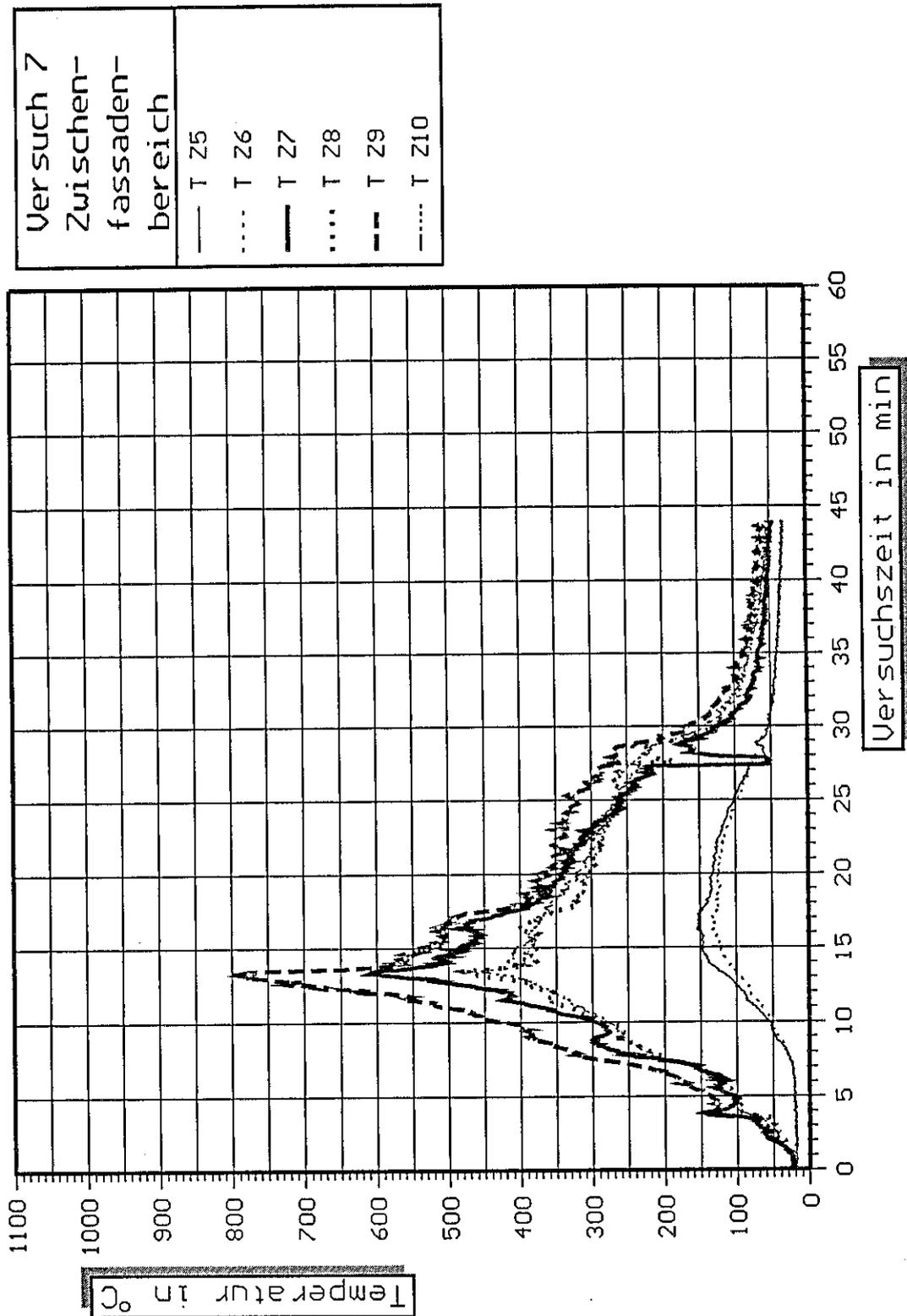


Bild 49 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.  
- Versuch 7 -

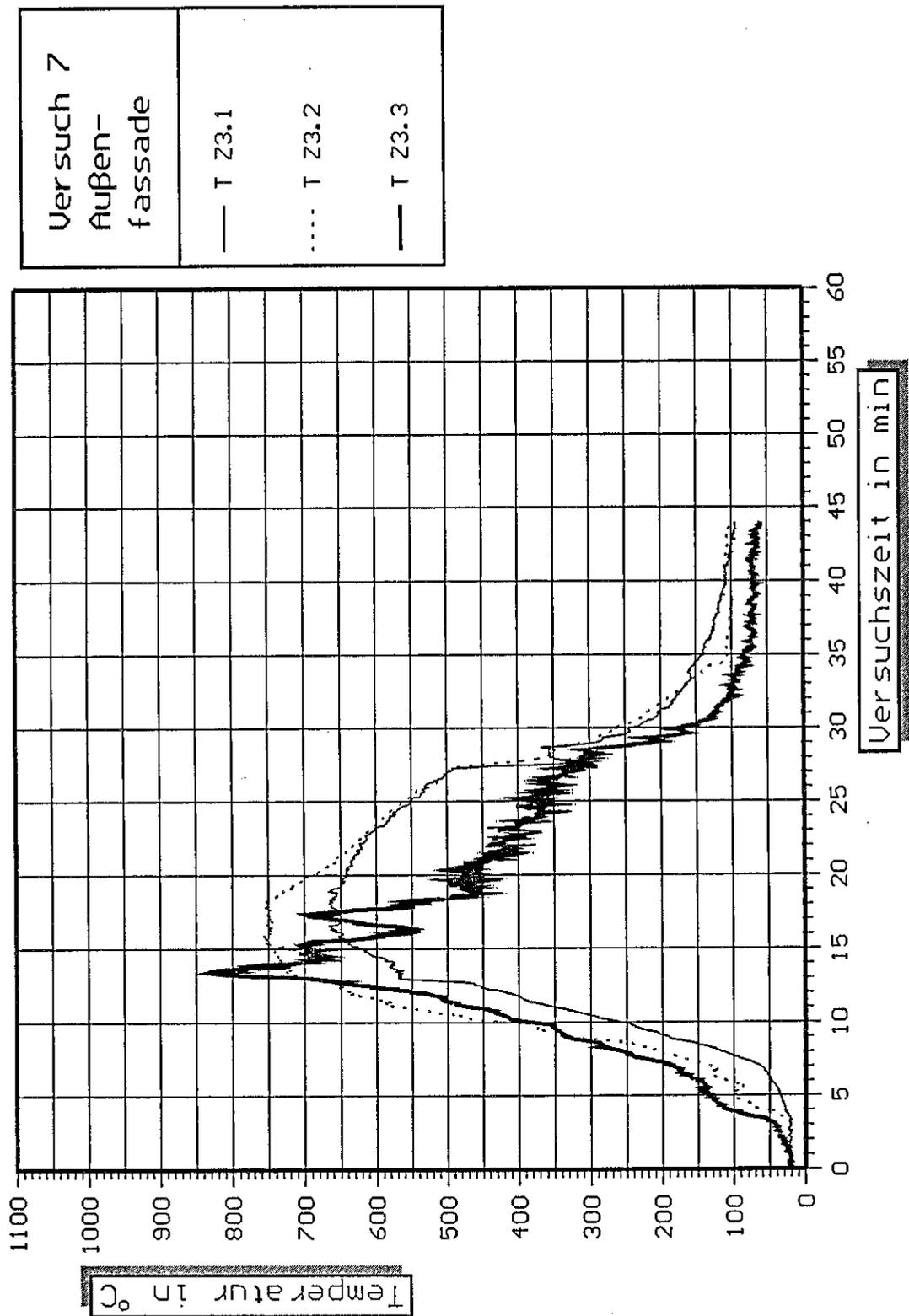


Bild 50 Zeitliche Temperaturverläufe an der ESG-Verglasung der Außenfassade.  
- Versuch 7 -

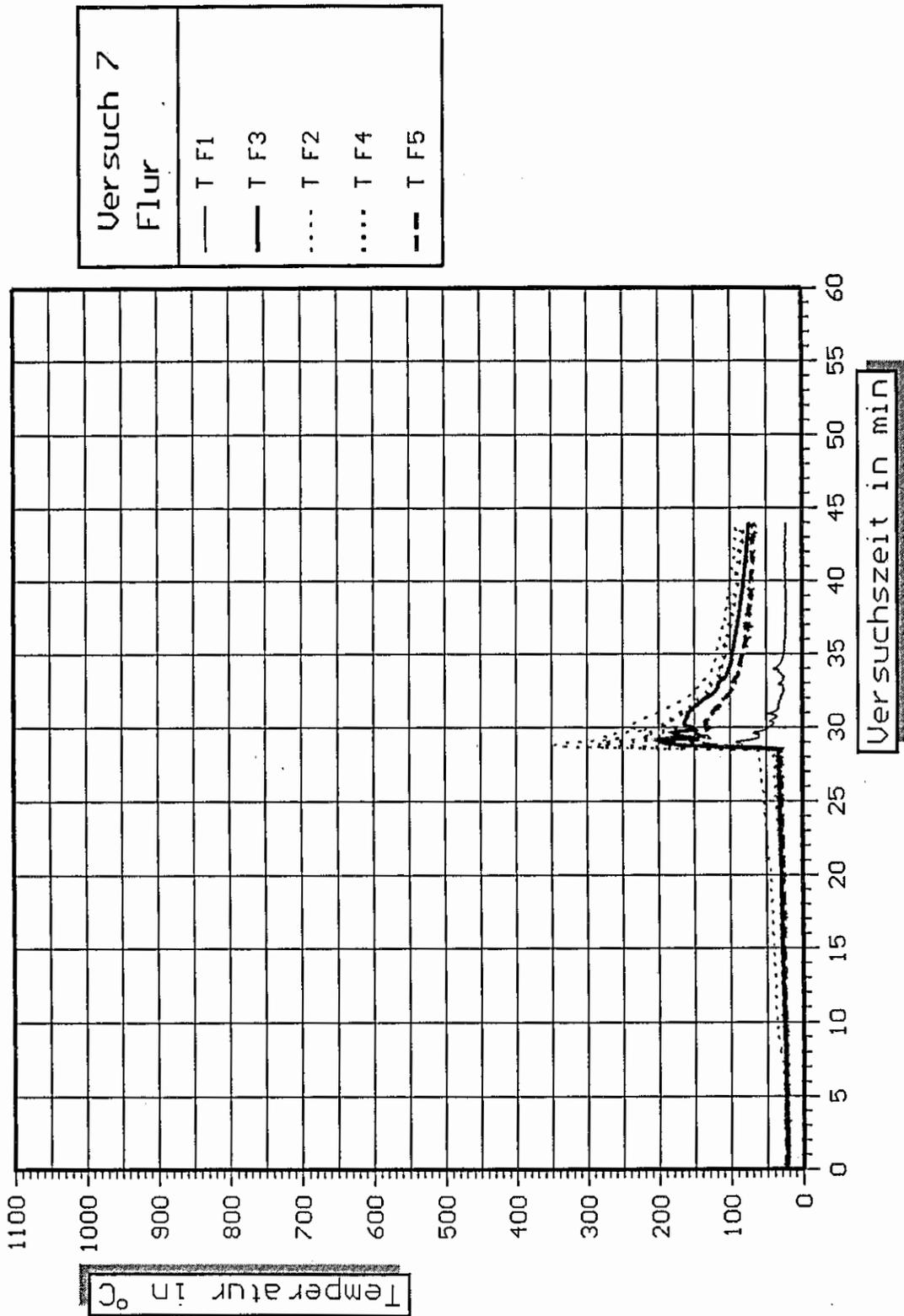


Bild 51 Zeitliche Temperaturverläufe im Flur.  
- Versuch 7 -

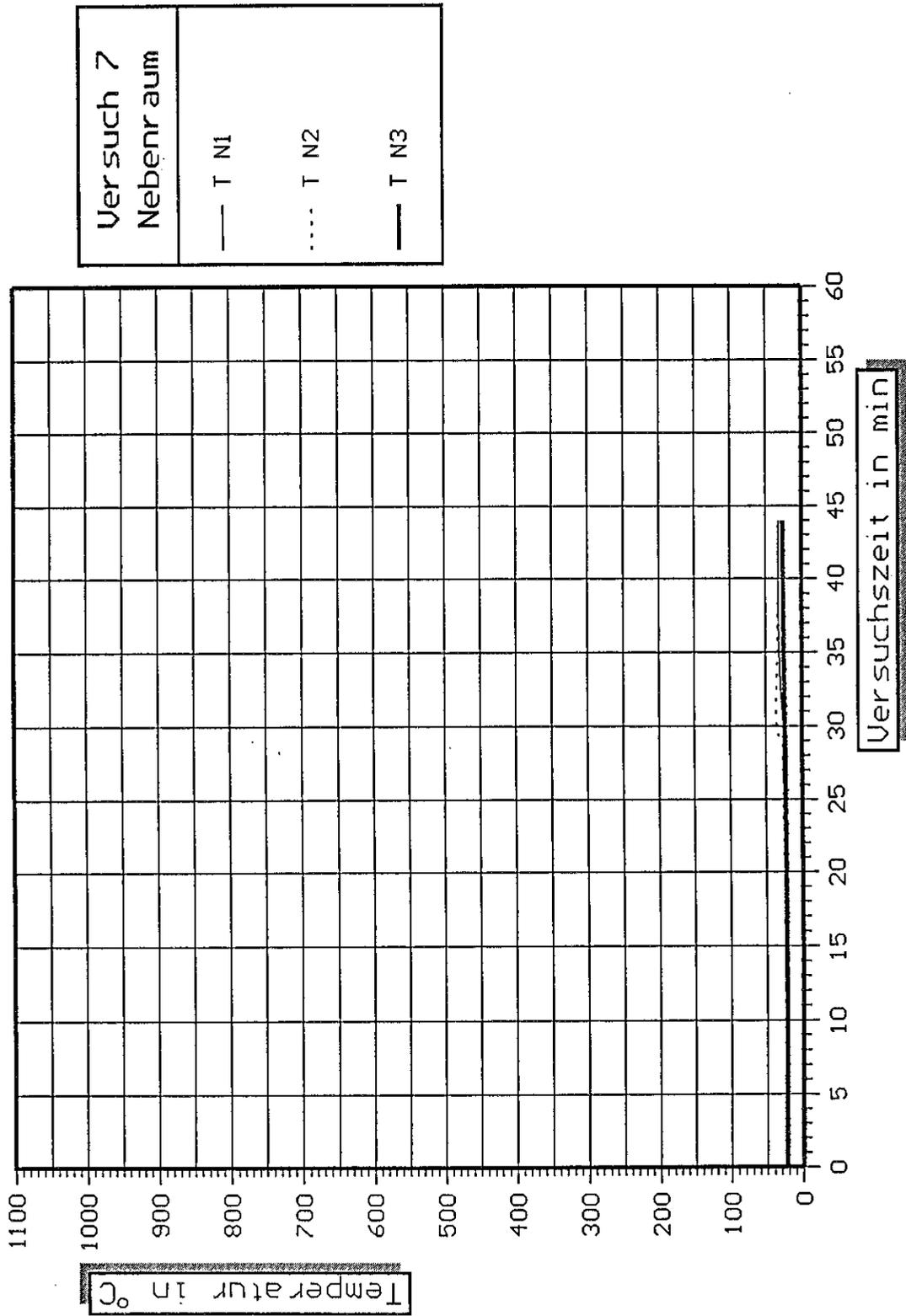


Bild 52 Zeitliche Temperaturverläufe im Nebenraum.  
- Versuch 7 -

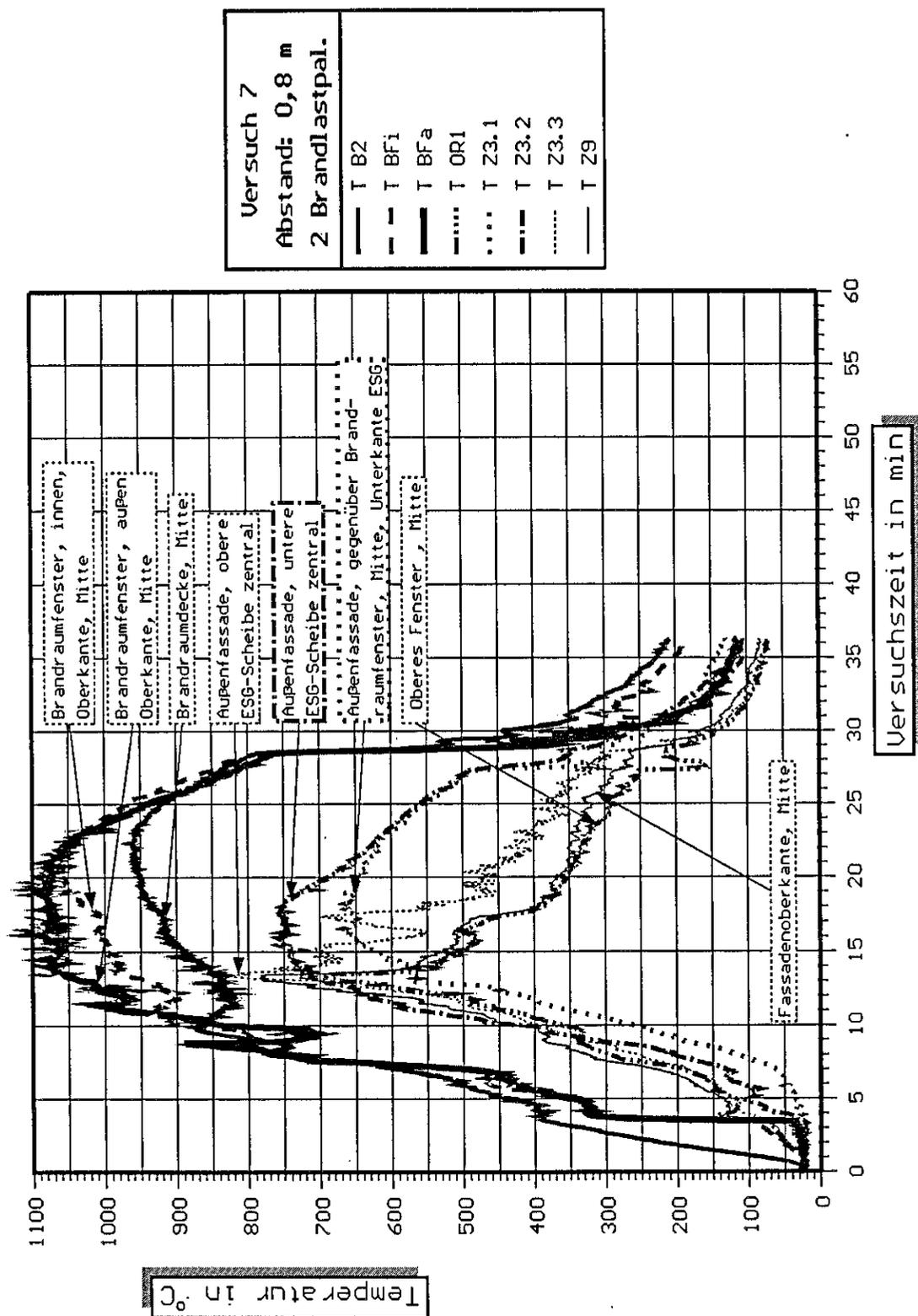
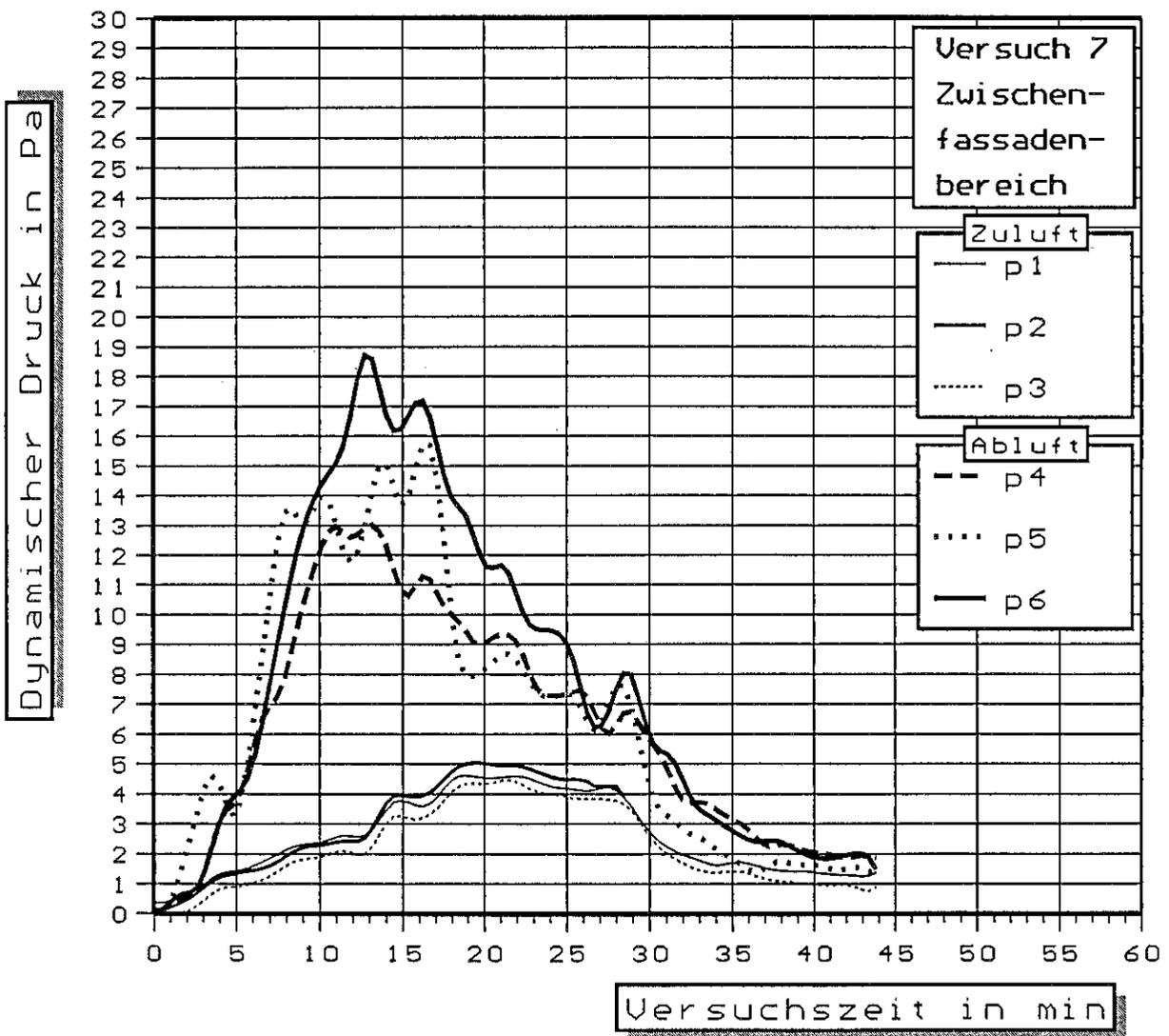


Bild 53 Vergleich ausgewählter zeitlicher Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich, sowie an der Außenfassade.  
 - Versuch 7 -



**Bild 54** Zeitliche Verläufe des dynamischen Druckes an der Zu- und Abluftöffnung.  
- Versuch 7 -

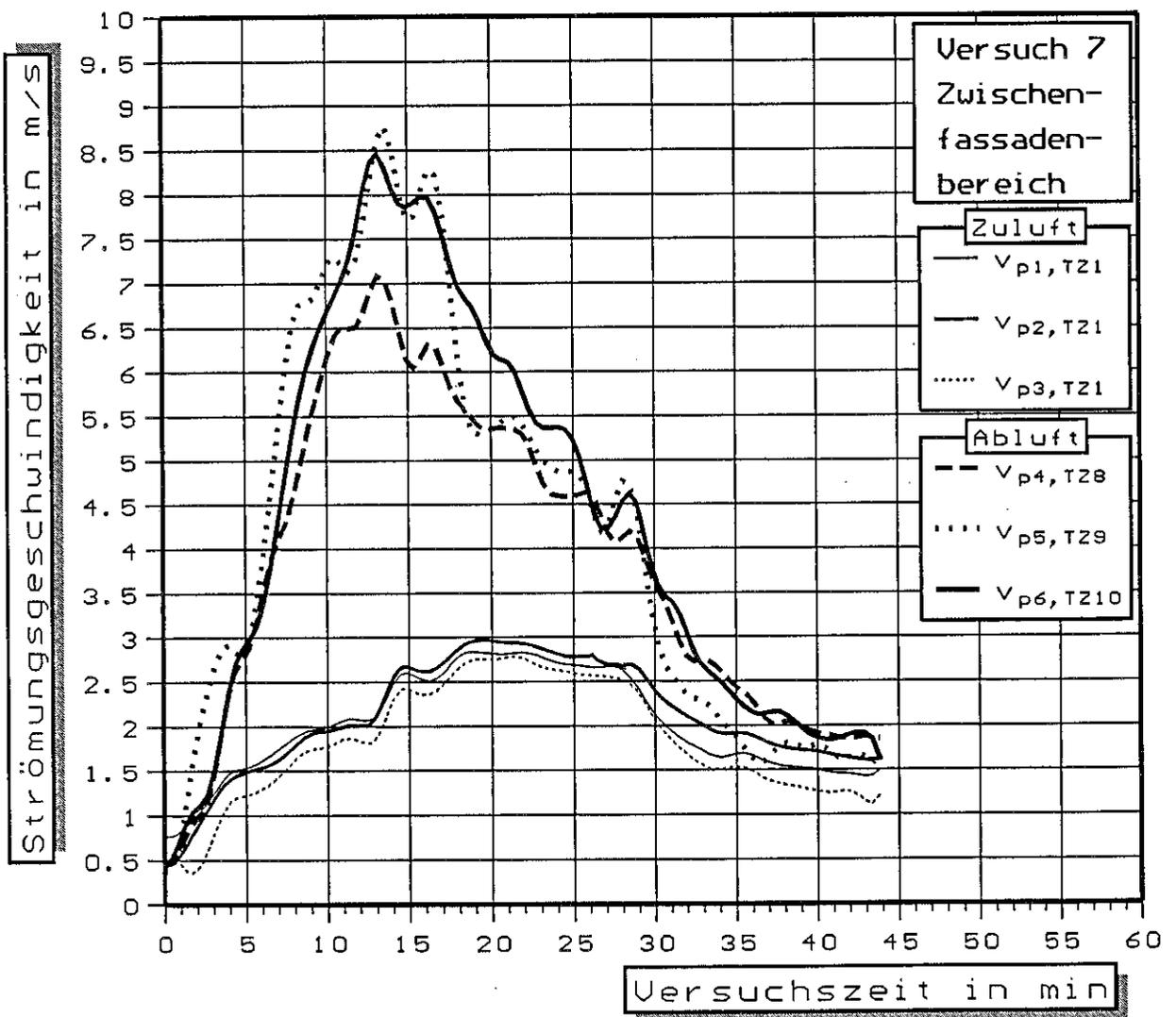
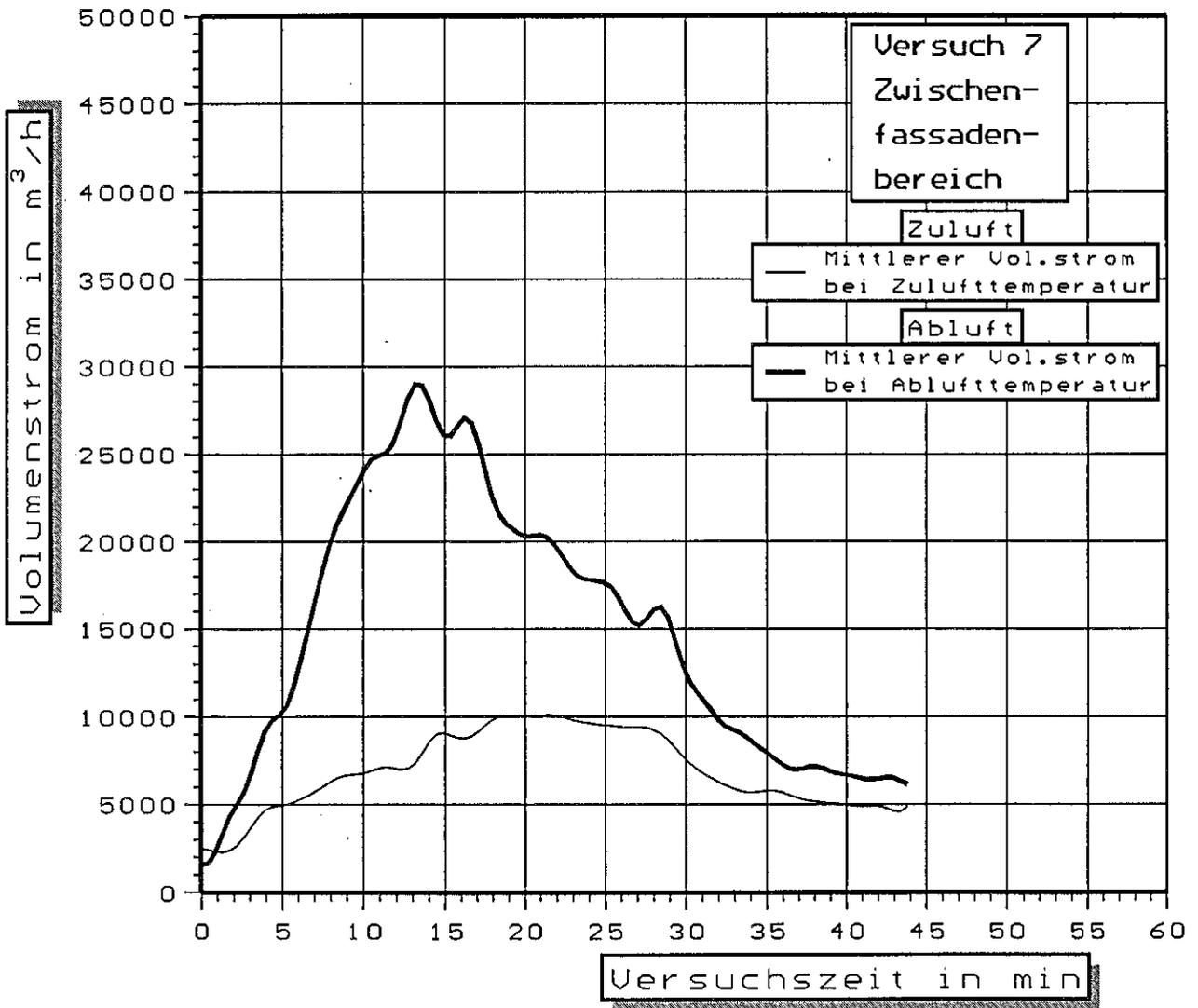


Bild 55 Zeitliche Verläufe der Strömungsgeschwindigkeit an der Zu- und Abluftöffnung.  
- Versuch 7 -



**Bild 56** Zeitliche Verläufe der mittleren Volumenströme an der Zu- und Abluftöffnung bei Zu- bzw. Ablufttemperatur.  
- Versuch 7 -

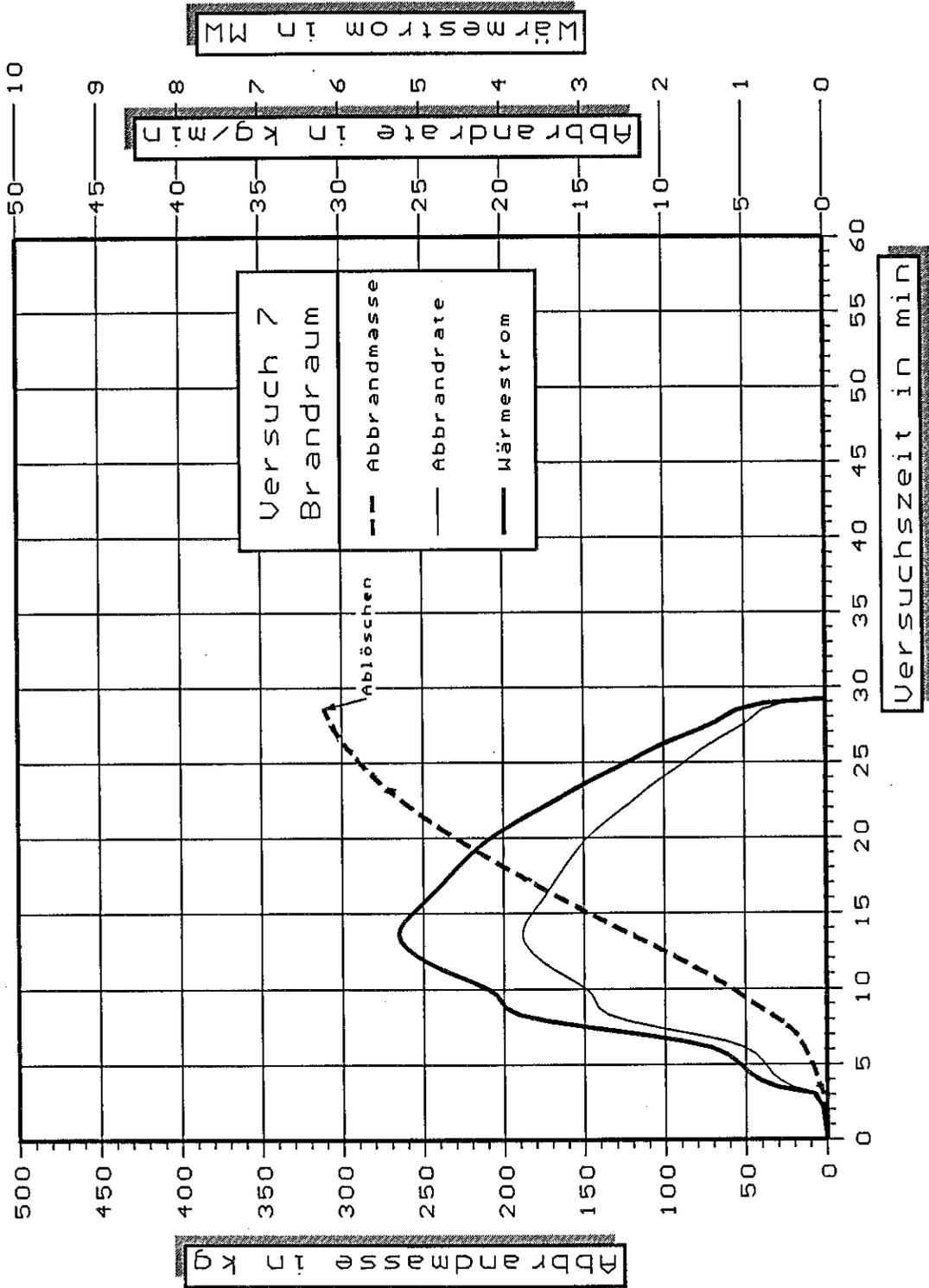


Bild 57

Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung.

- Versuch 7 -

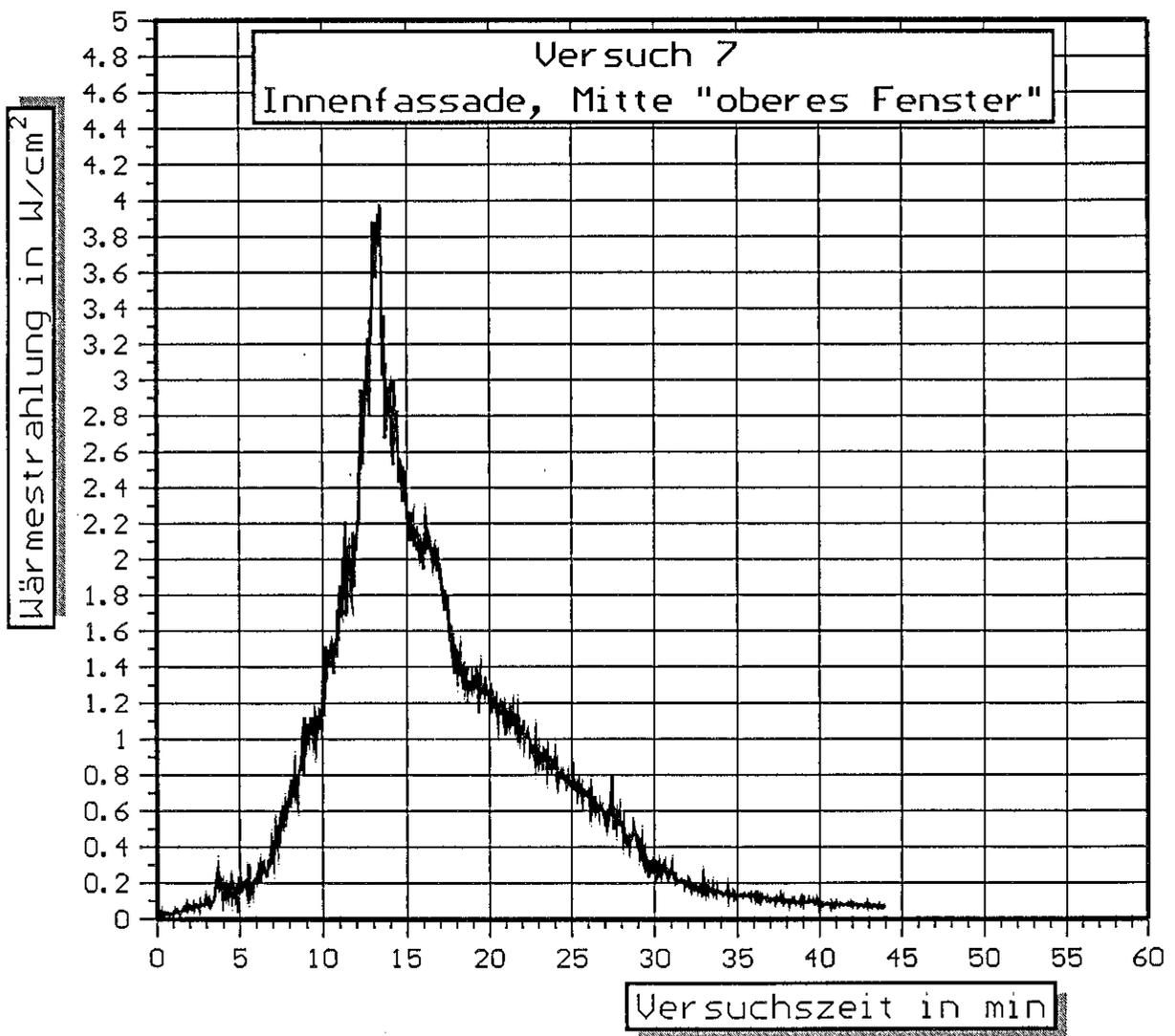


Bild 58 Zeitlicher Verlauf der Wärmestrahlung in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade.  
- Versuch 7 -

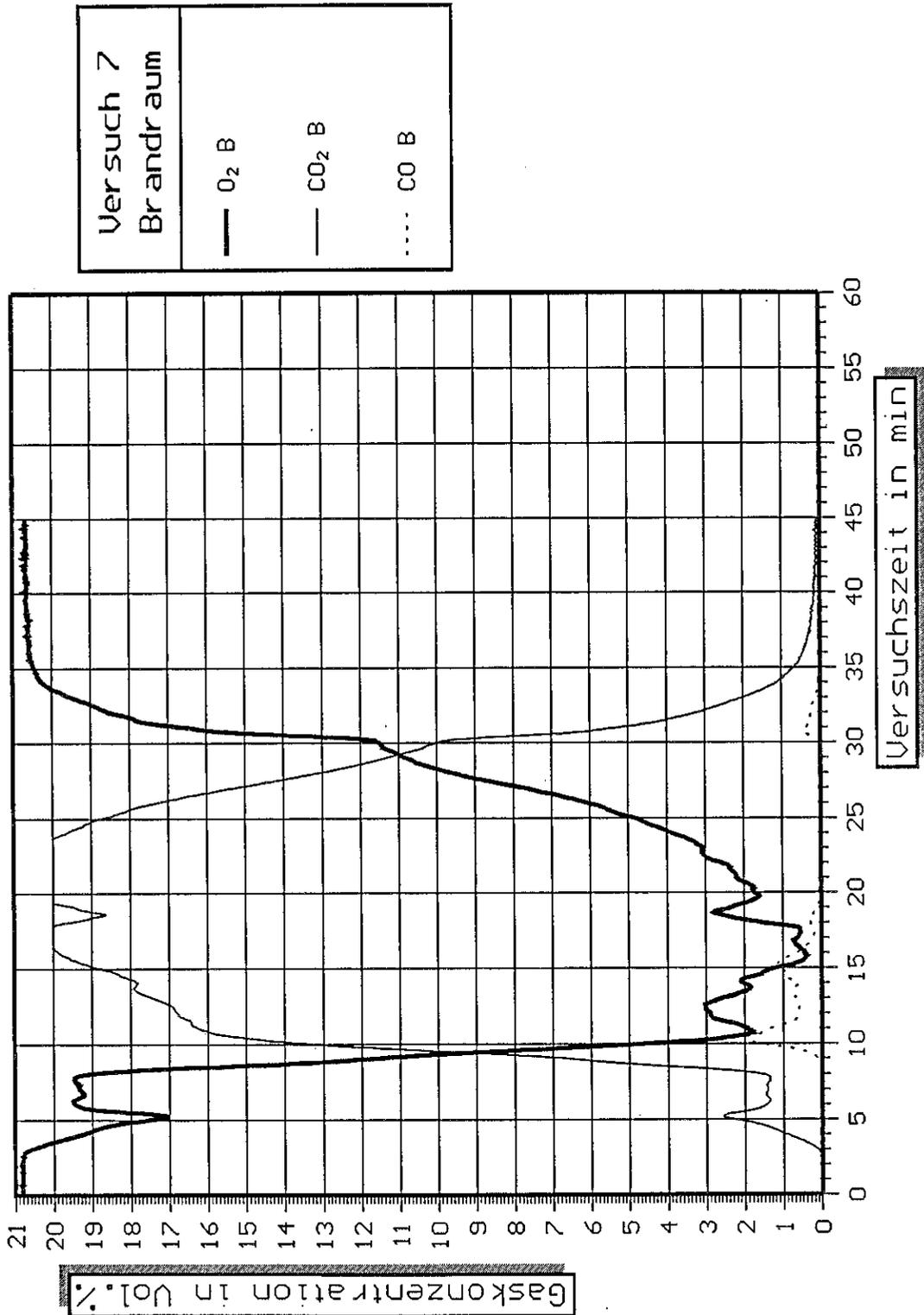


Bild 59.1 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.  
- Versuch 7 -

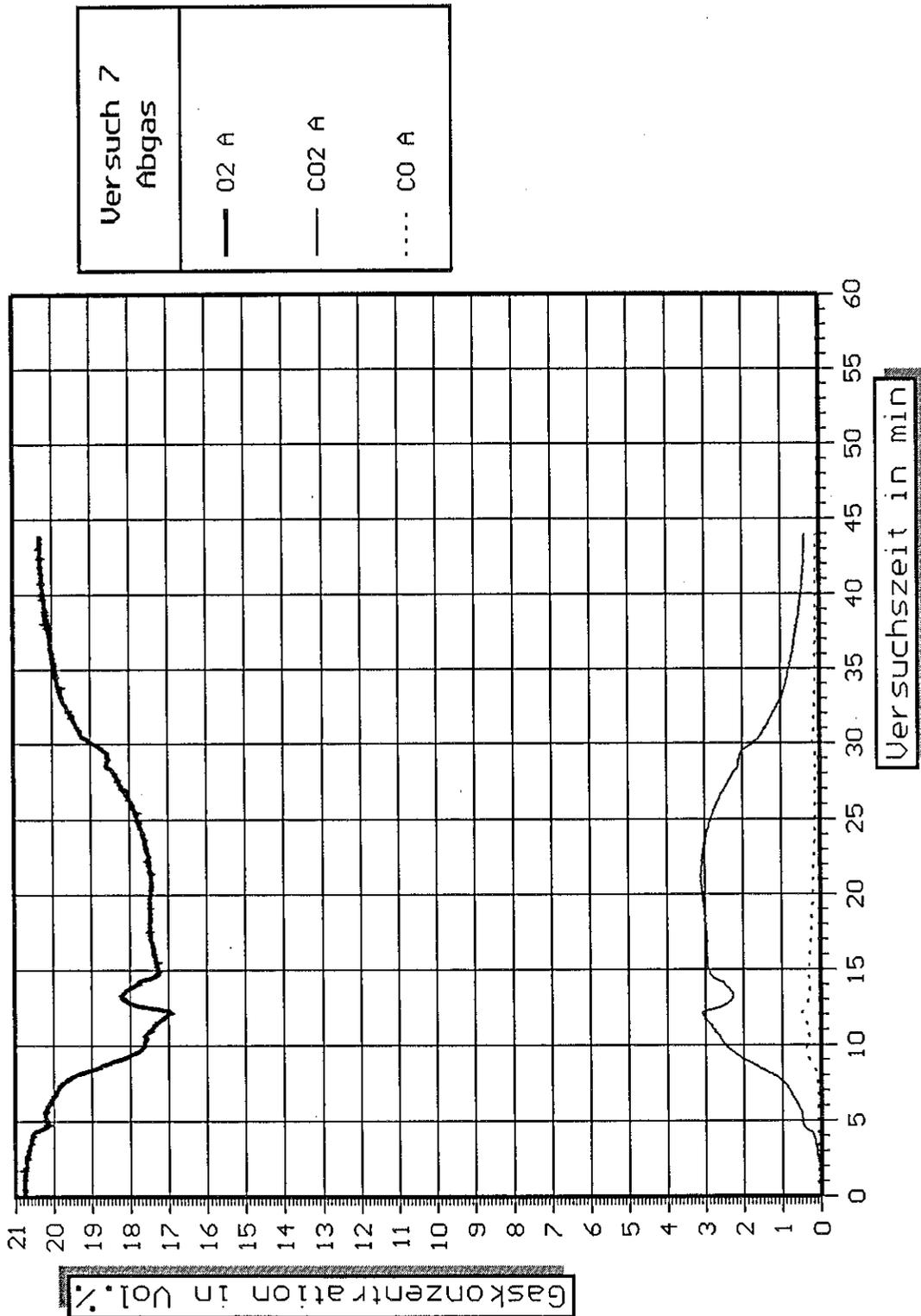


Bild 59.2 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration in dem aus der Versuchshalle abgesaugten Abgasvolumenstrom.  
- Versuch 7 -

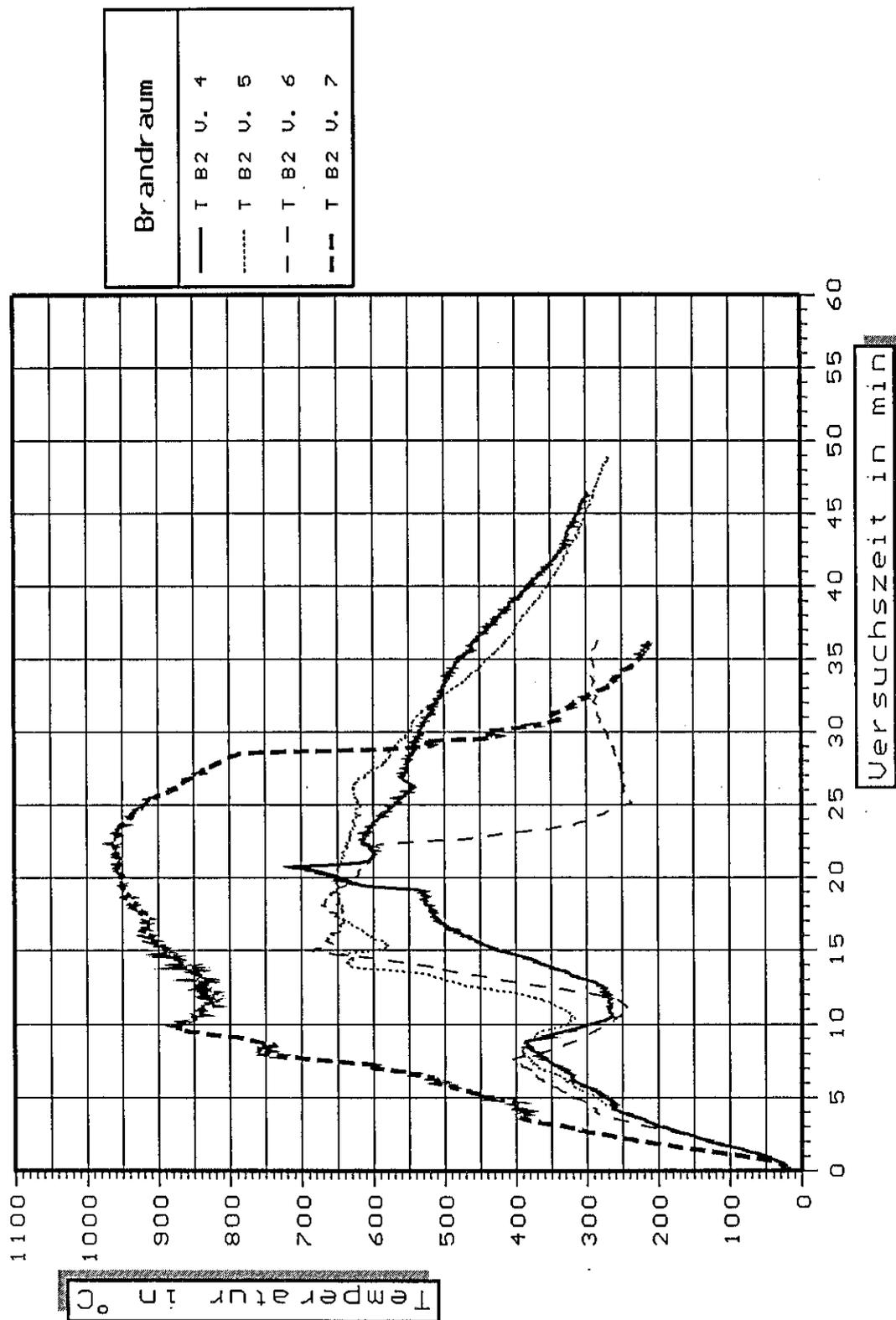


Bild 60 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TB2 im Brandraum bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.

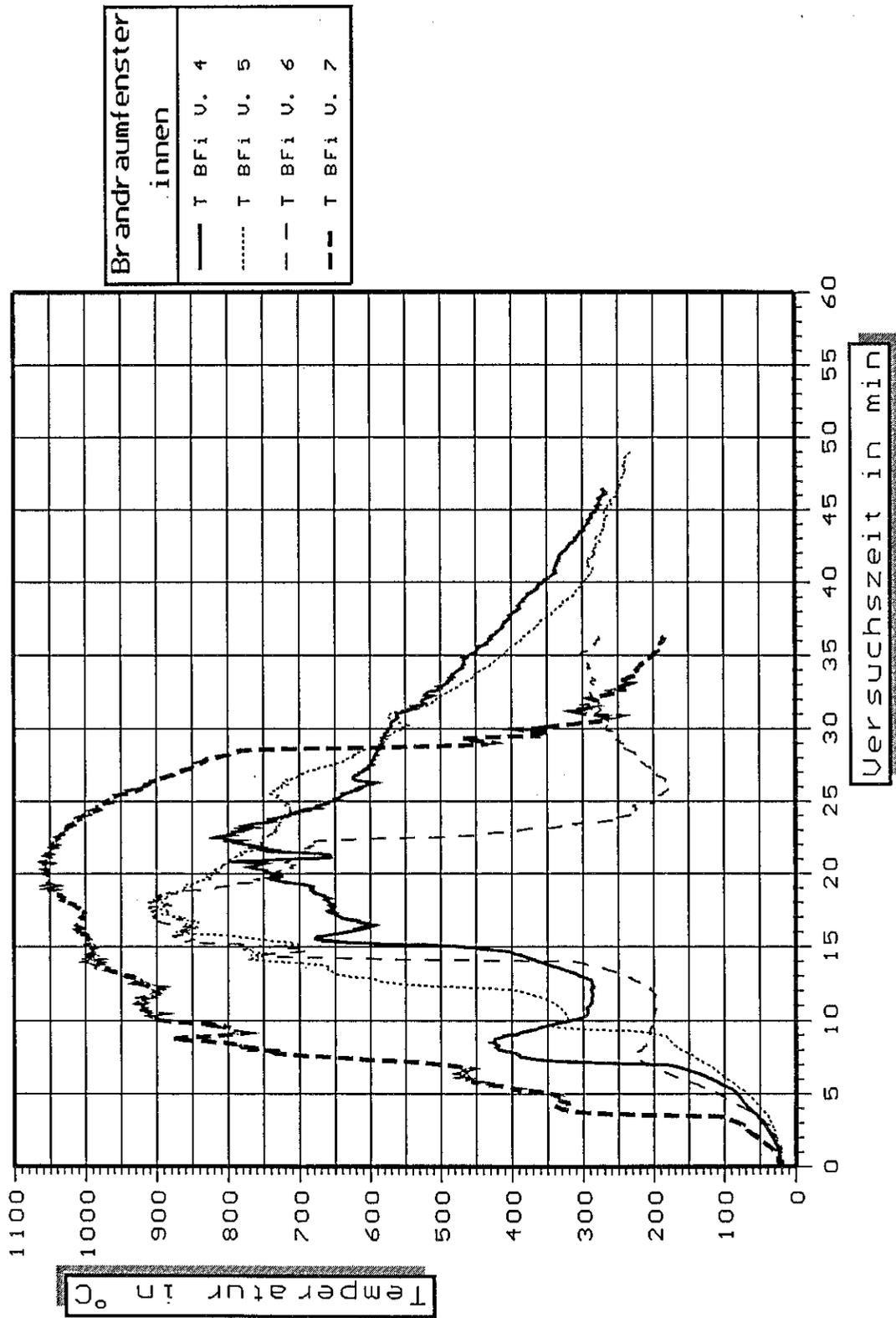


Bild 61 Zeitlicher Verlauf der Temperatur T BFi am Brandraumfenster innen bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.

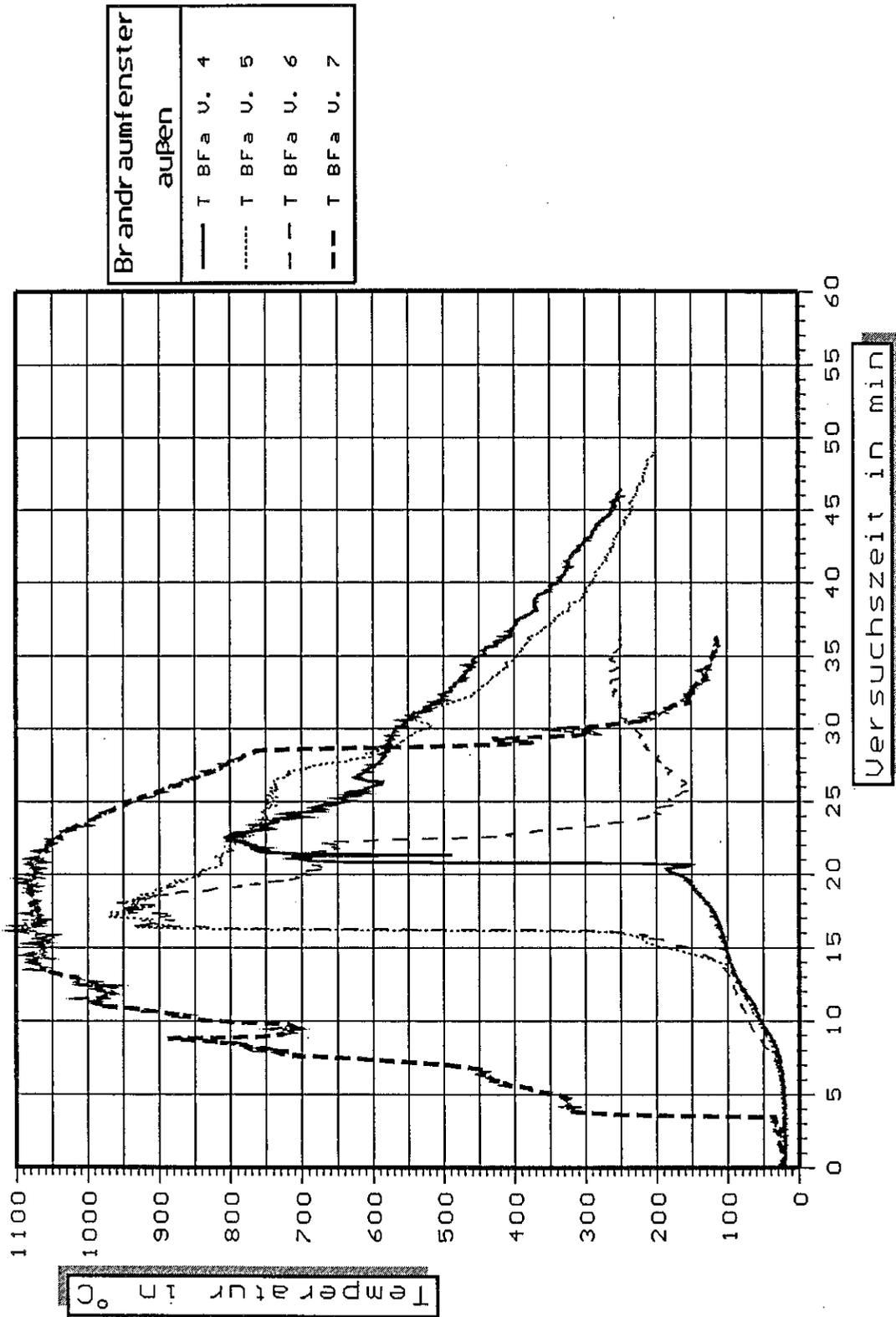


Bild 62 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TBFa am Brandraumfenster innen bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.

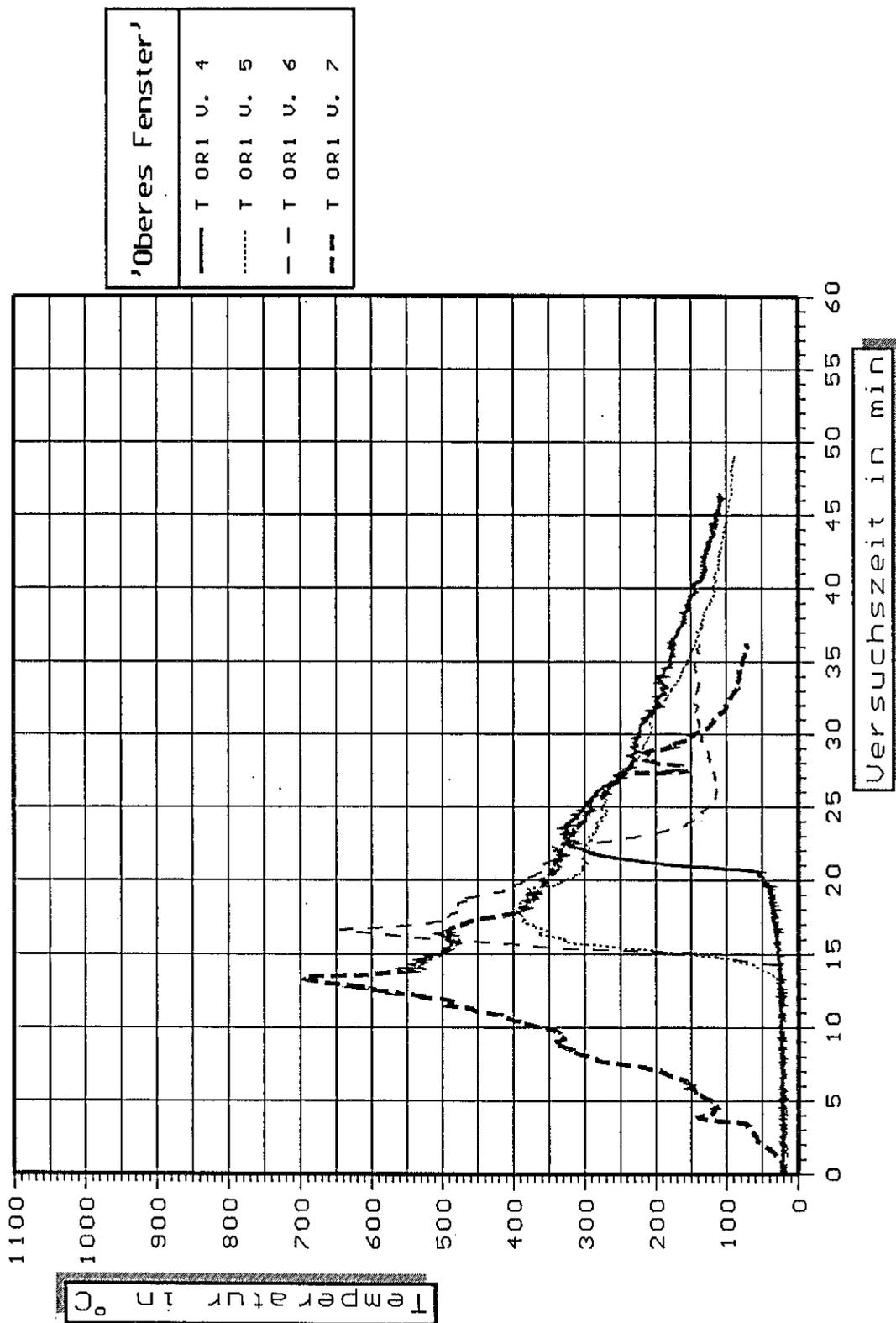
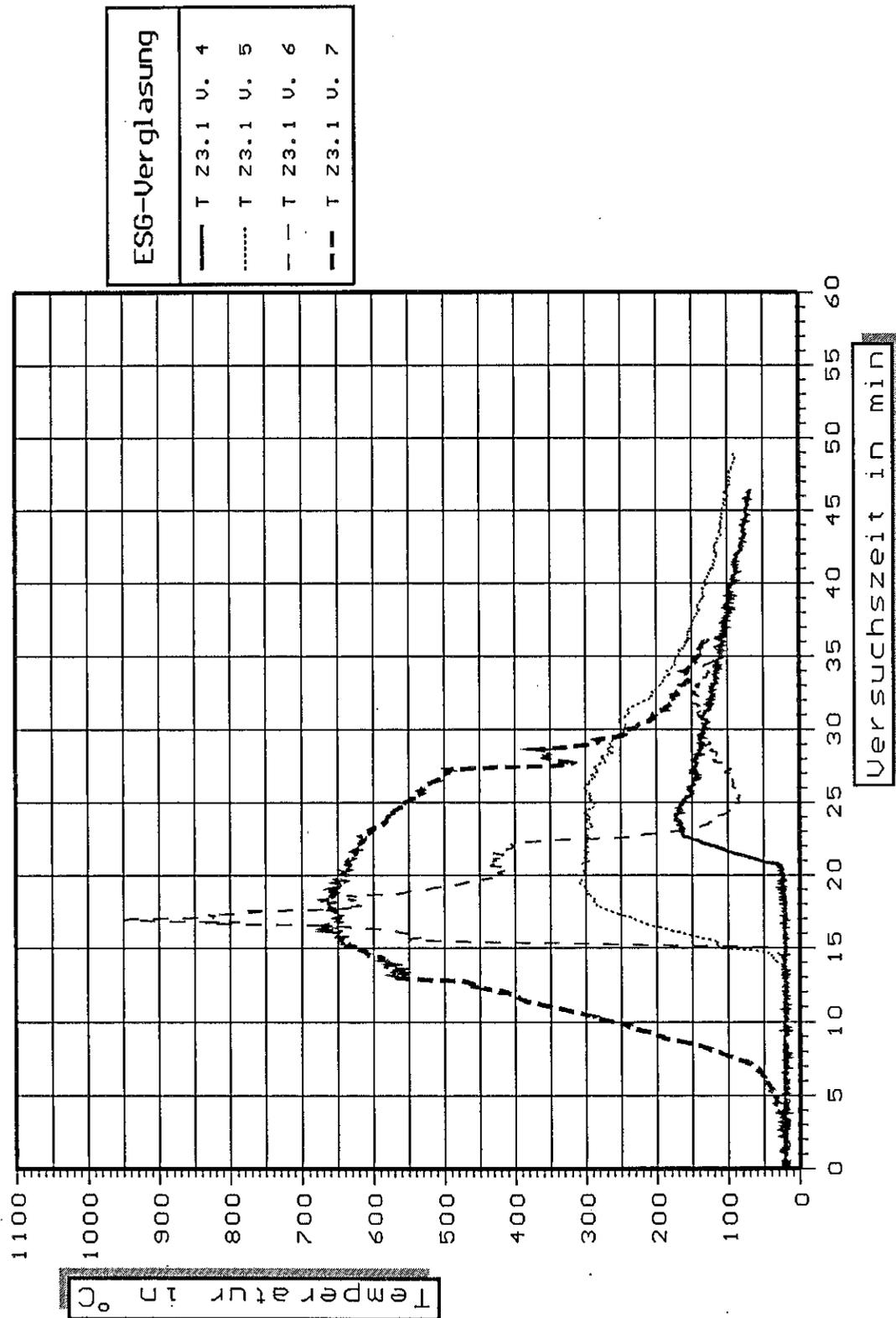
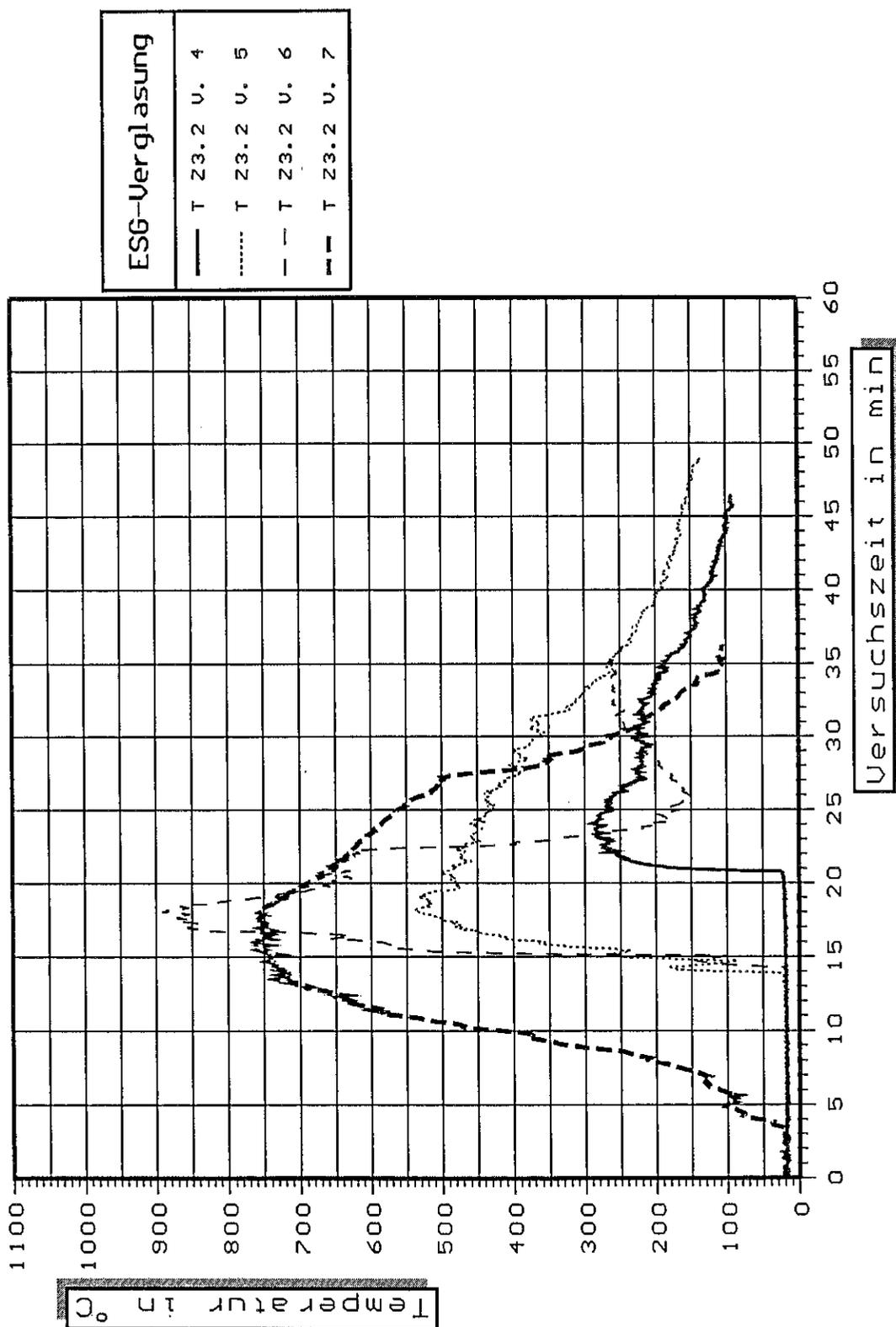


Bild 63 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TOR1 in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.



**Bild 64** Zeitlicher Verlauf der Temperatur TZ3.1 an der ESG-Verglasung der Außenfassade bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.



**Bild 65** Zeitlicher Verlauf der Temperatur TZ3.2 an der ESG-Verglasung der Außenfassade bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.

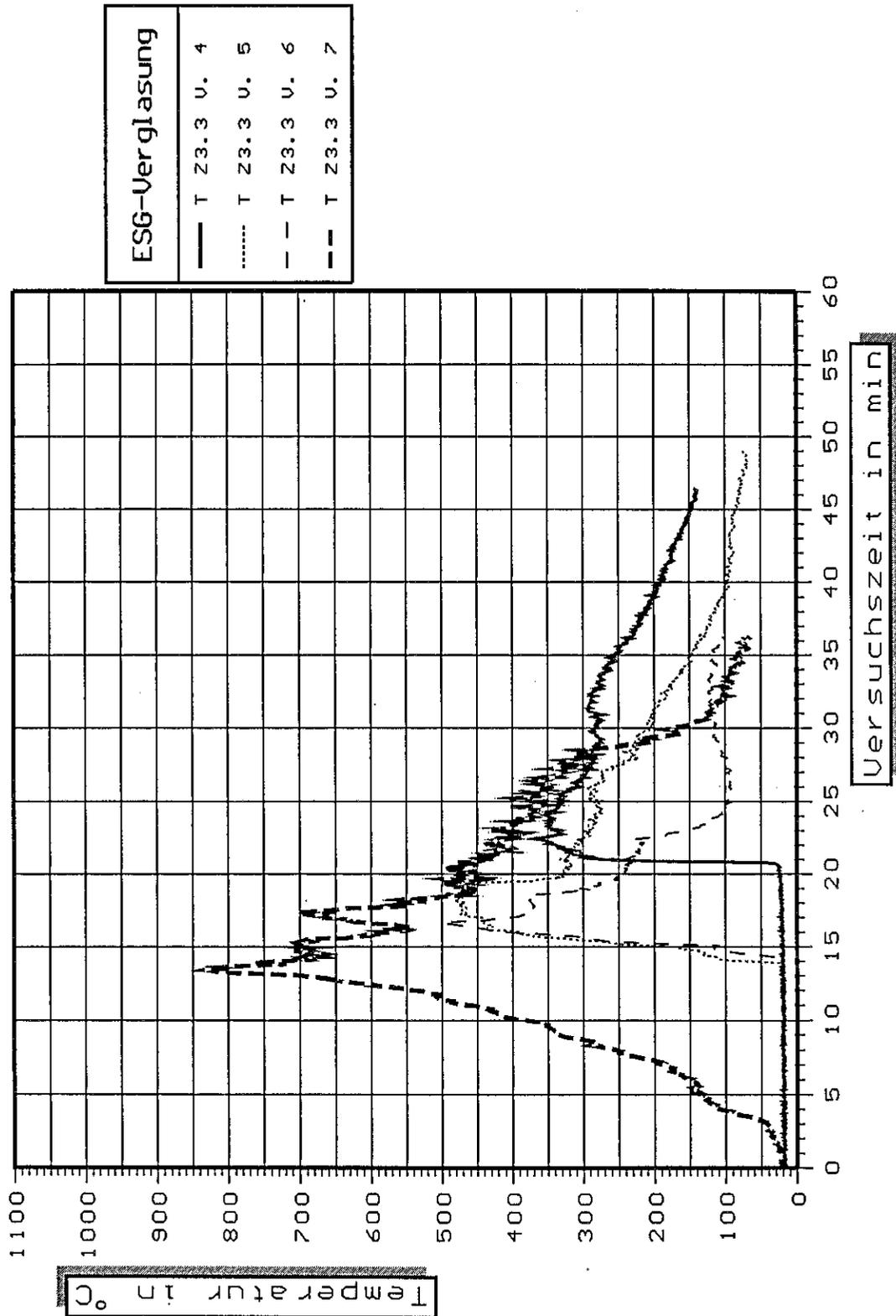


Bild 66 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TZ3.3 an der ESG-Verglasung der Außenfassade bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.

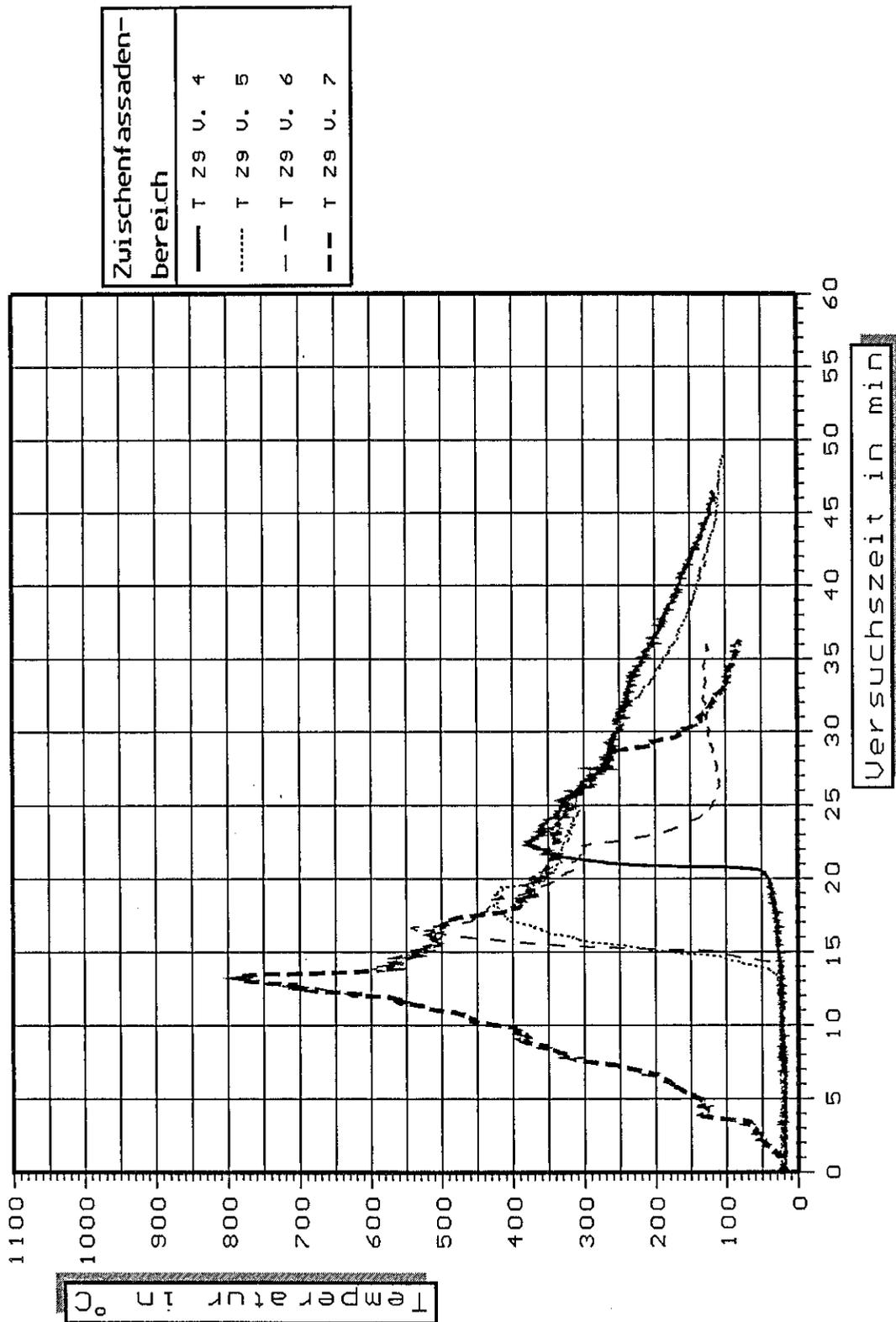


Bild 67 Zeitlicher Verlauf der Temperatur T29 im Zwischenfassadenbereich bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.

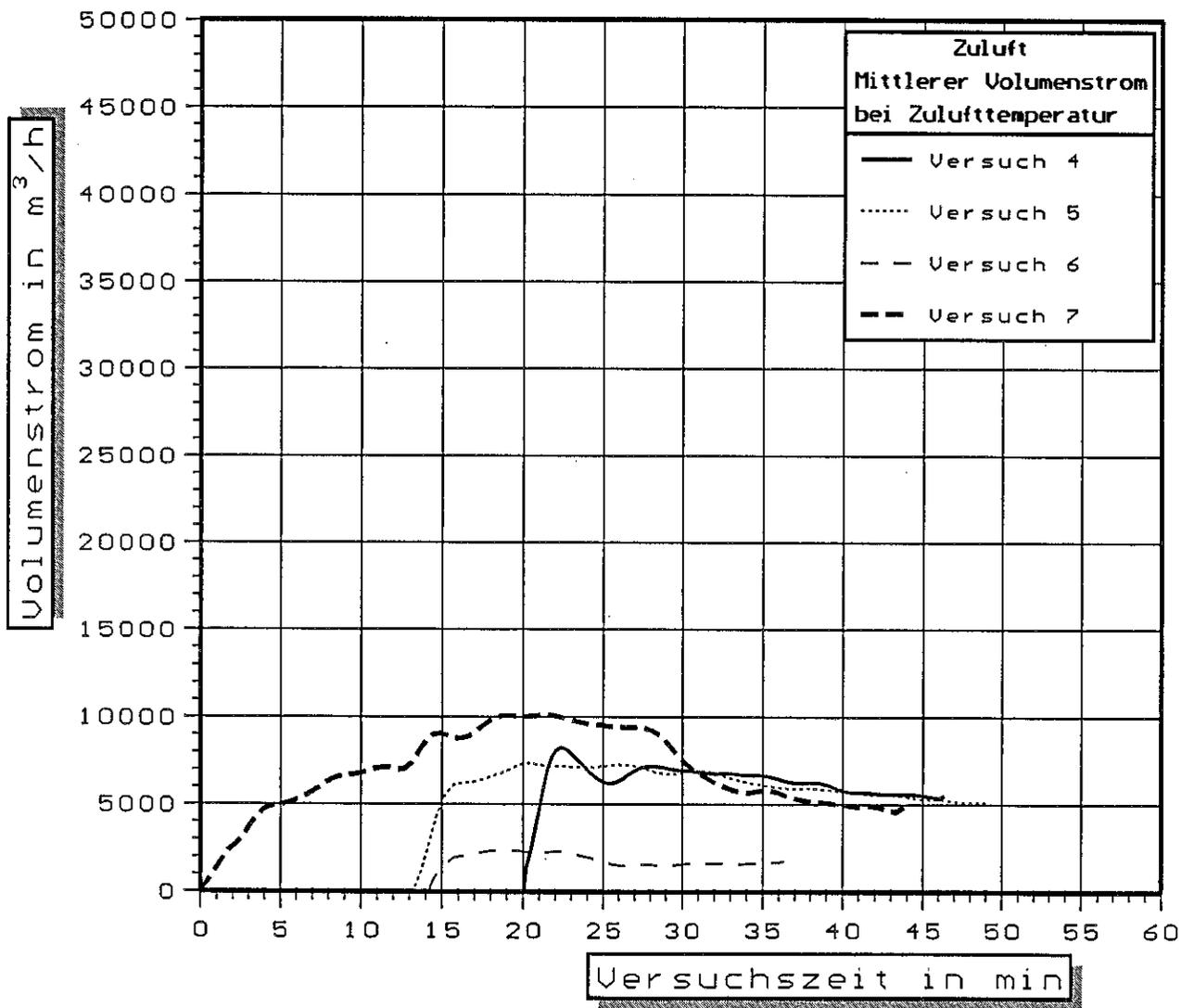
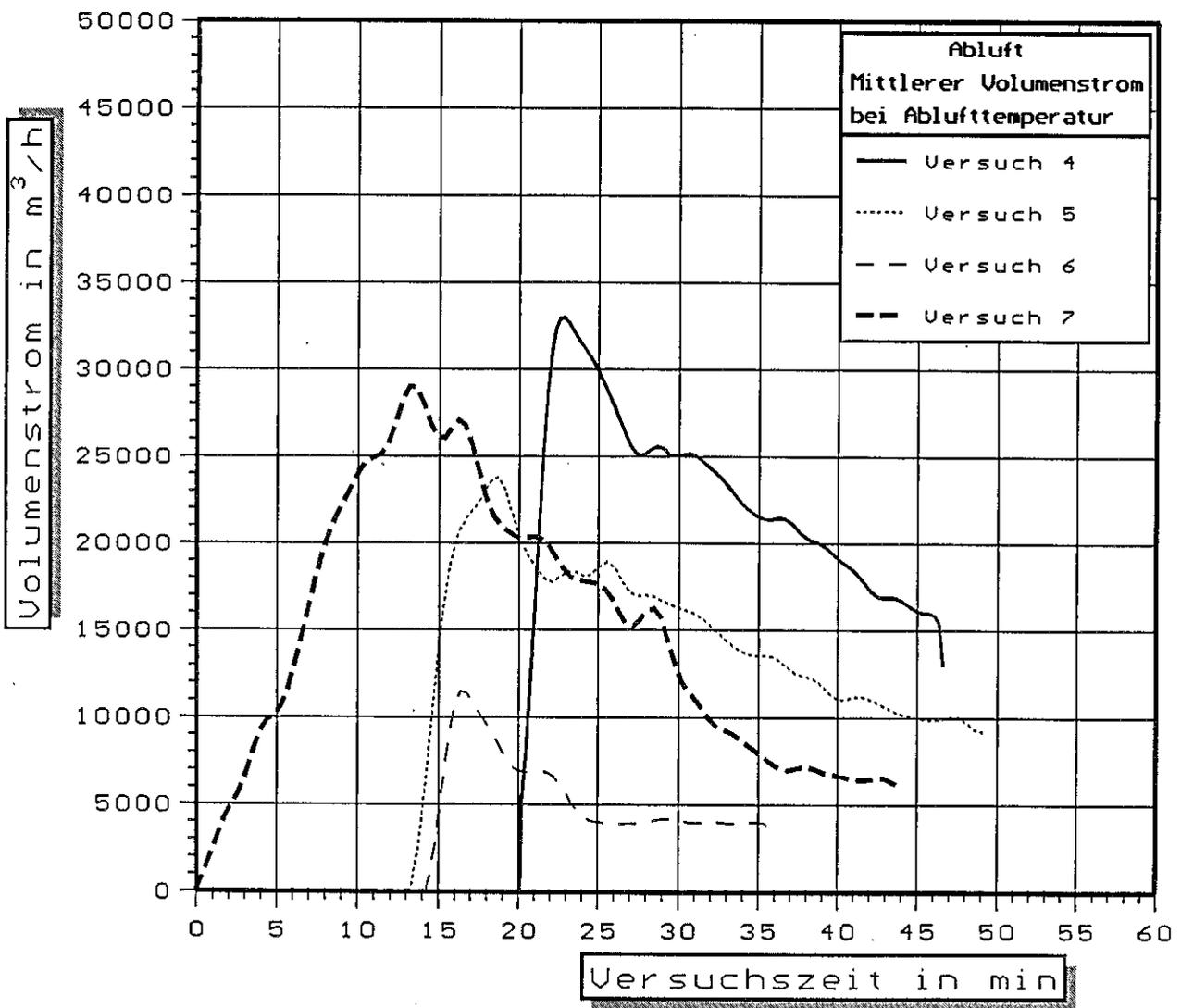


Bild 68 Zeitlicher Verlauf des mittleren Volumenstromes an der Zuluftöffnung bei Zulufttemperatur bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.



**Bild 69** Zeitlicher Verlauf des mittleren Volumenstromes an der Abluftöffnung bei Ablufttemperatur bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.

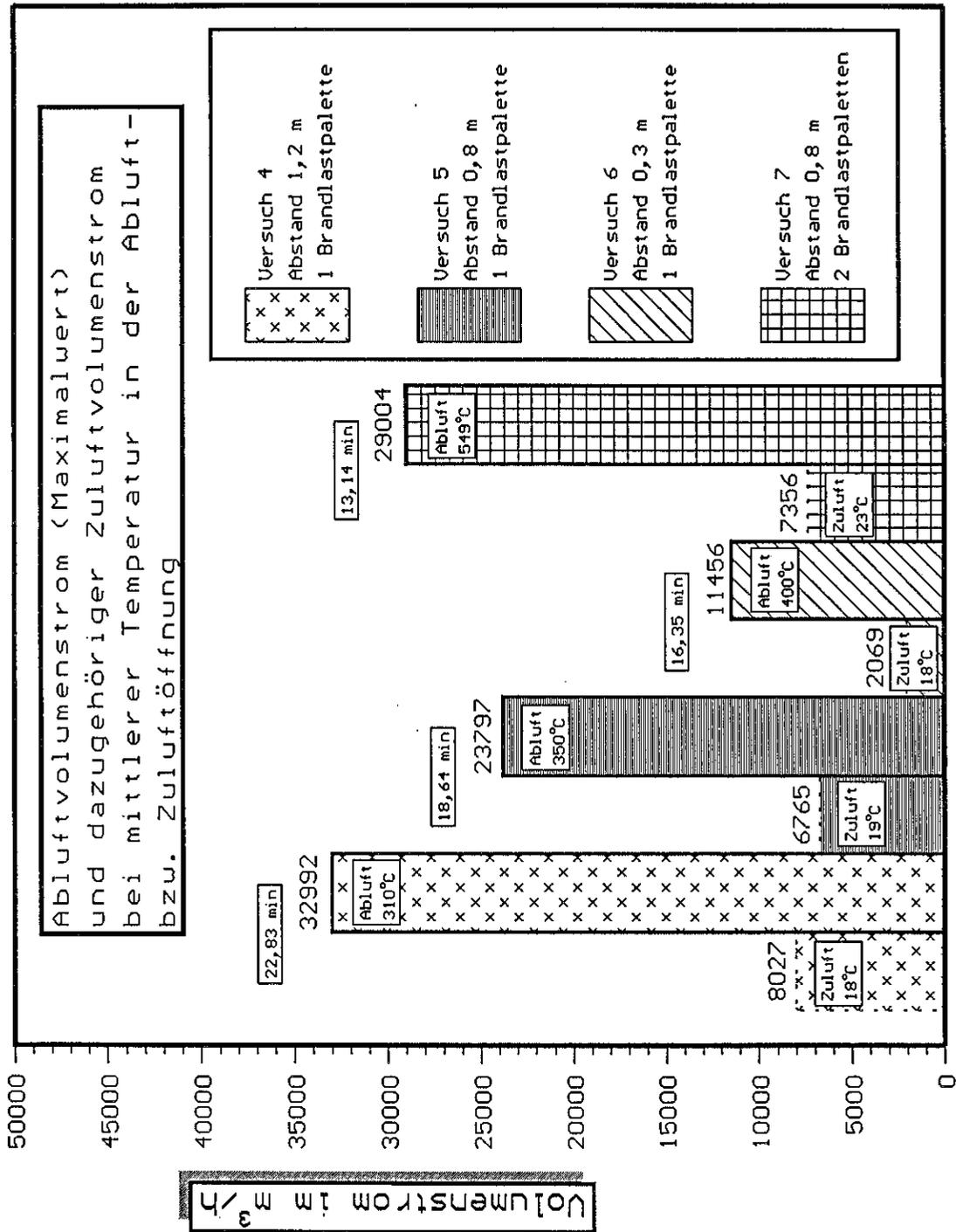
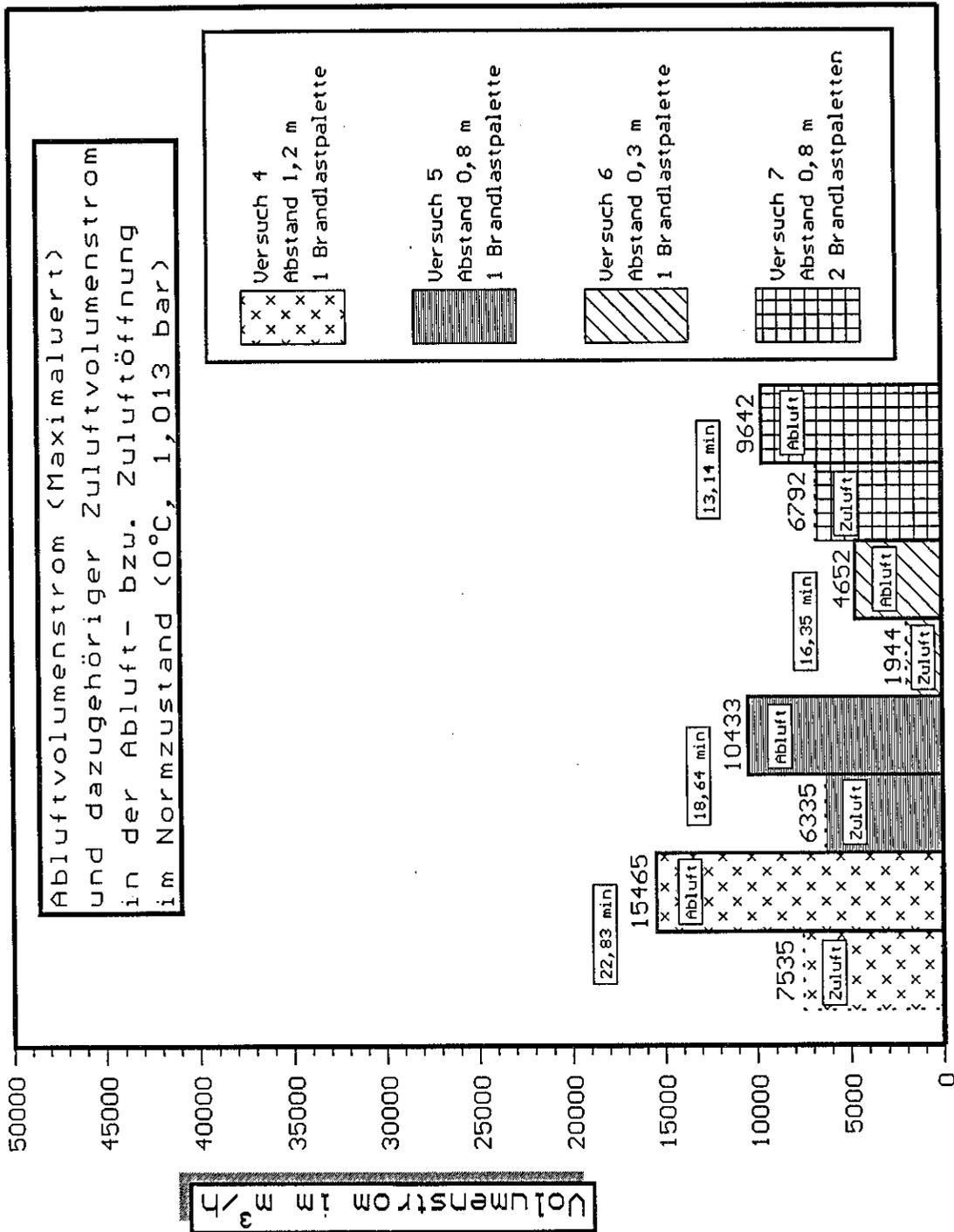
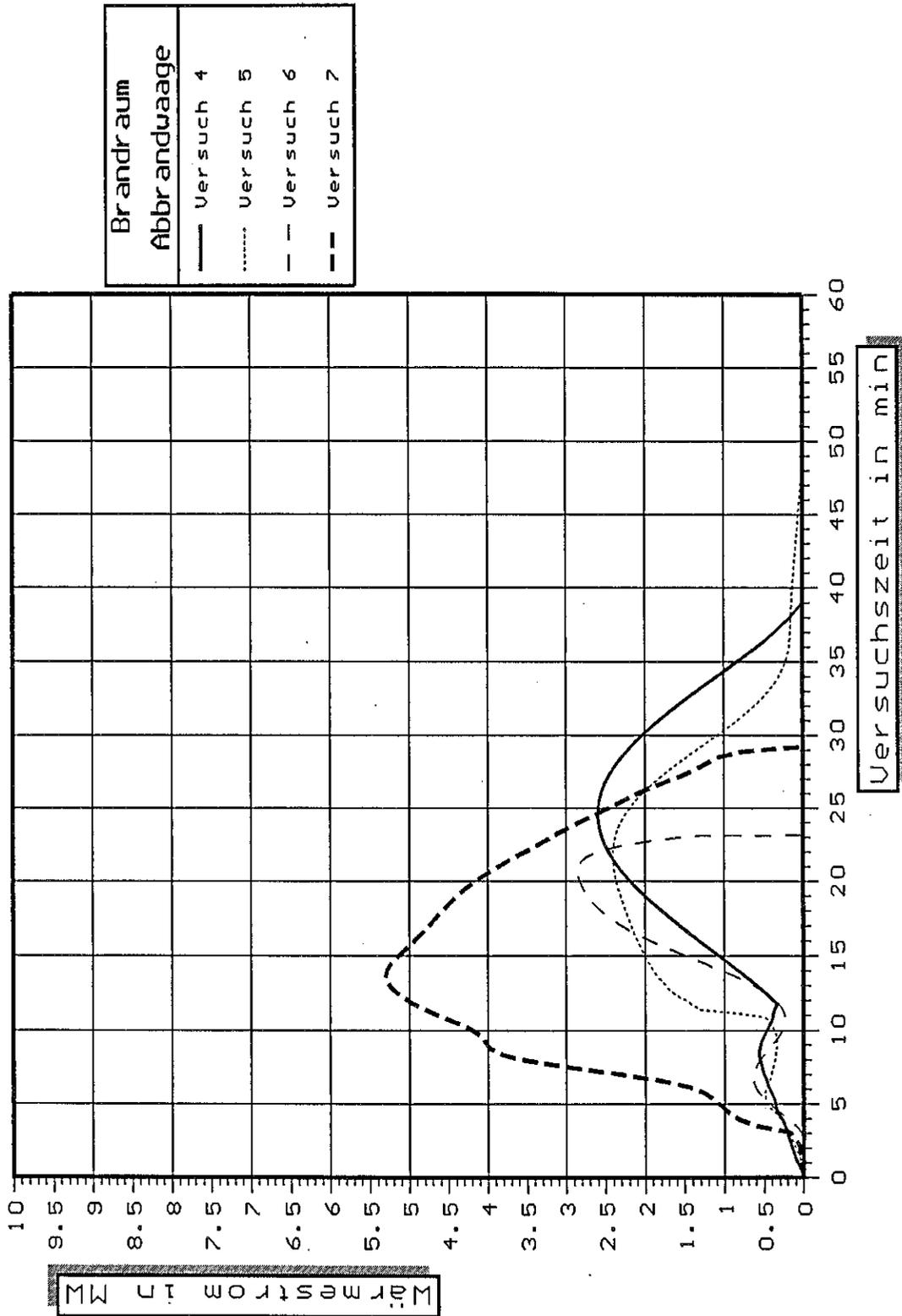


Bild 70

Vergleich der Maximalwerte der Volumenströme aus der Abluftöffnung mit den dazugehörigen Volumenströmen durch die Zuluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches bei einer mittleren Abluft- bzw. Zulufttemperatur.

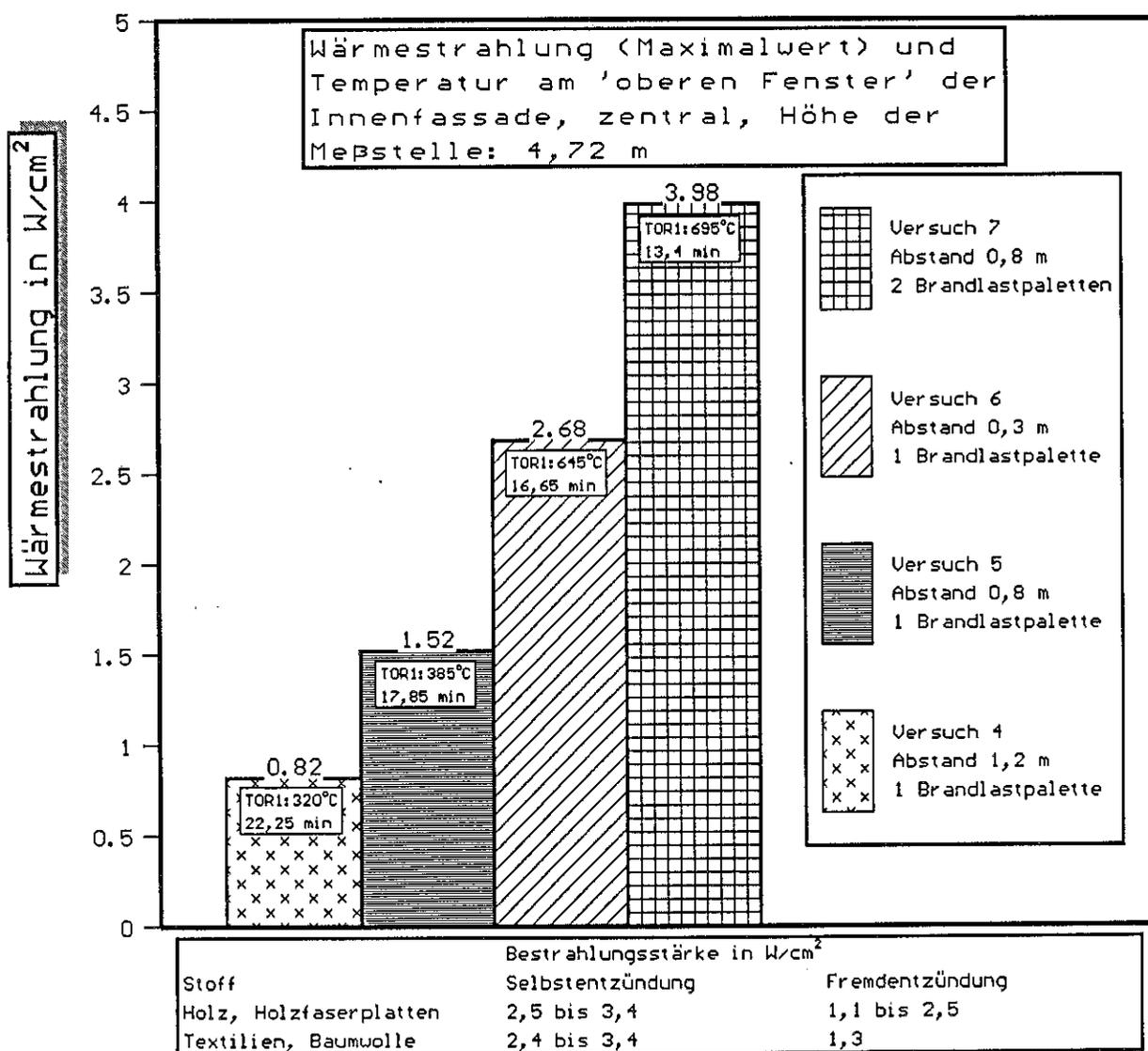


**Bild 71** Vergleich der Maximalwerte der Volumenströme aus der Abluftöffnung mit den dazugehörigen Volumenströmen durch die Zuluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches im Normzustand (0°C, 1,013 bar).



ABBUER47. HGD u. HGS

Bild 72 Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung im Brandraum (Abbrandwaage) bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.



**Bild 73** Maximalwert der Wärmestrahlung in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade bei den Versuchen 4, 5, 6 und 7.

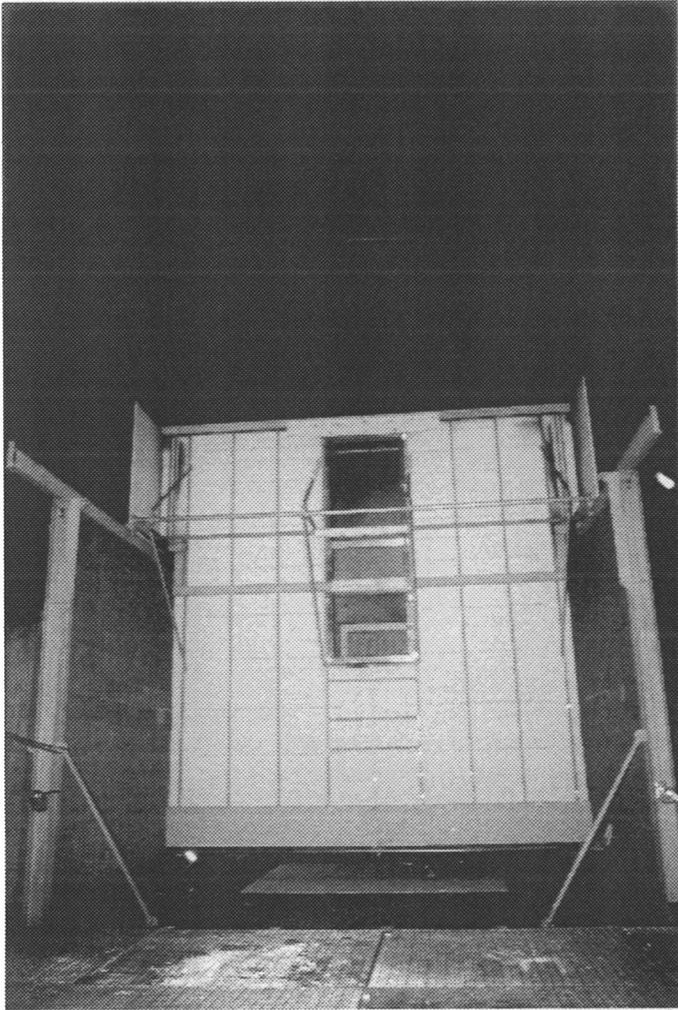
10. FOTOS



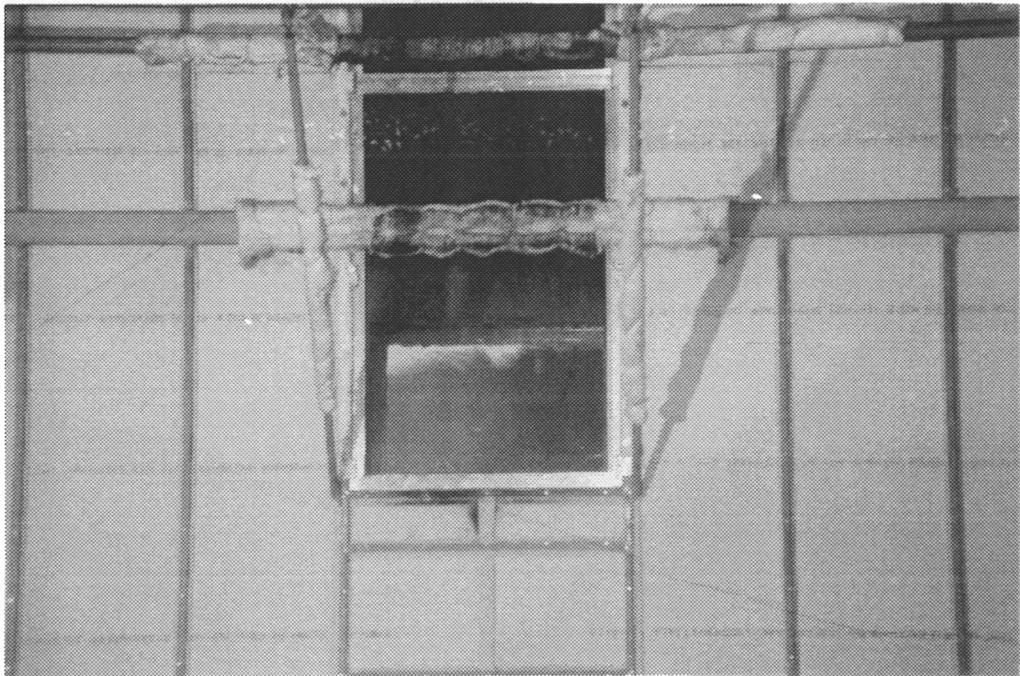
Foto 1 Brandraum bei Versuch 7



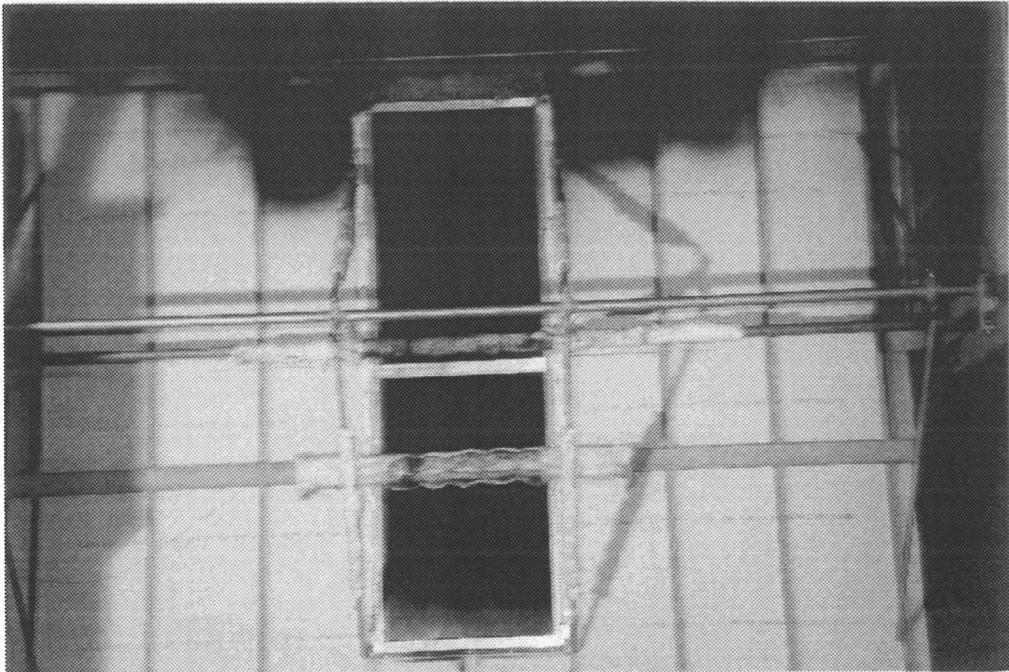
Foto 2 Zwischenfassadenbereich



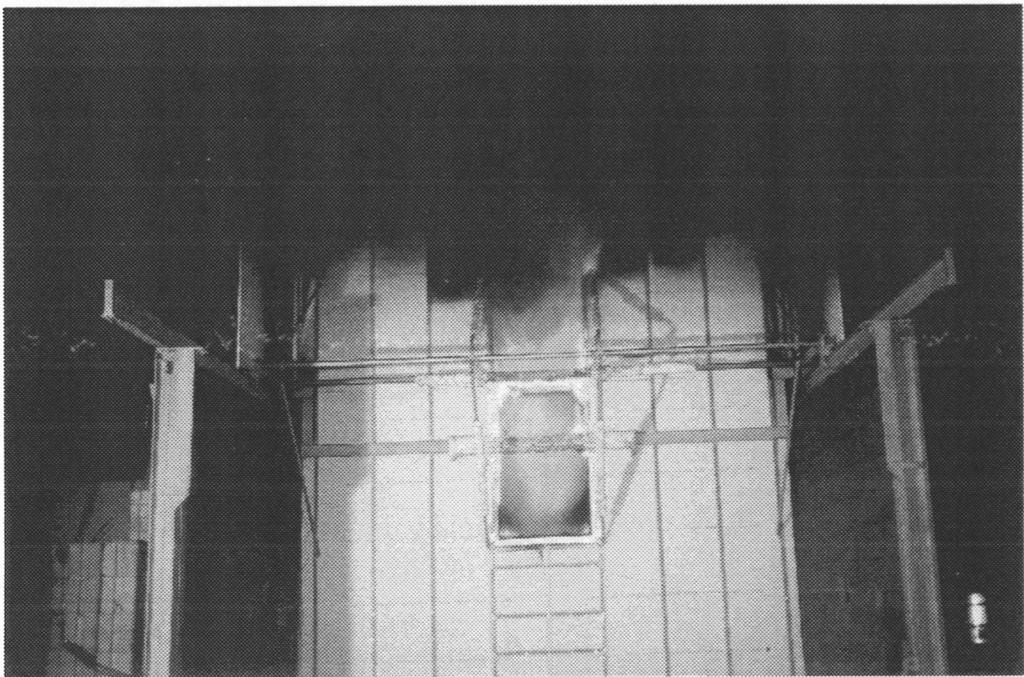
**Foto 3** Außenfassade



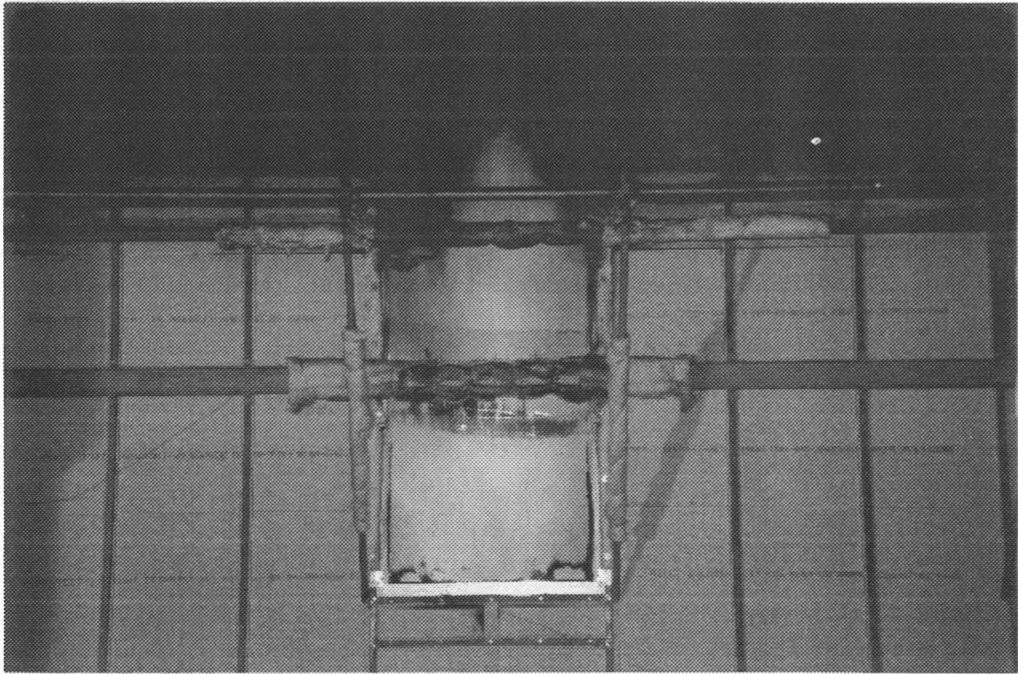
**Foto 4** Versuch 7 - 5 min 27 s nach Zündung



**Foto 5** Versuch 7 - 10 min 10 s nach Zündung



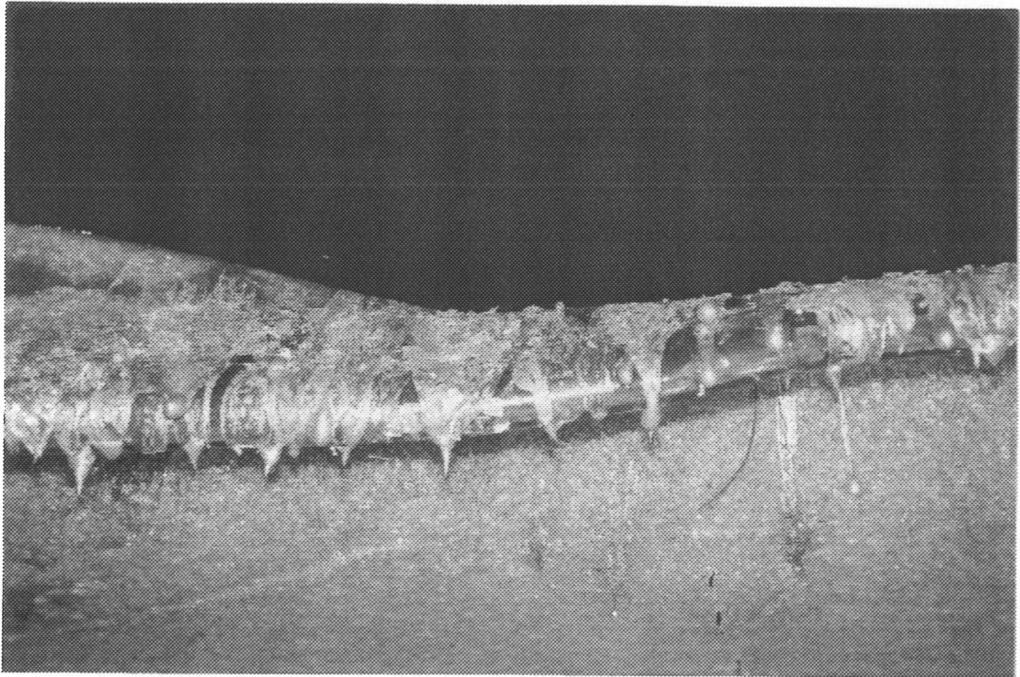
**Foto 6** Versuch 7 - 13 min 37 s nach Zündung



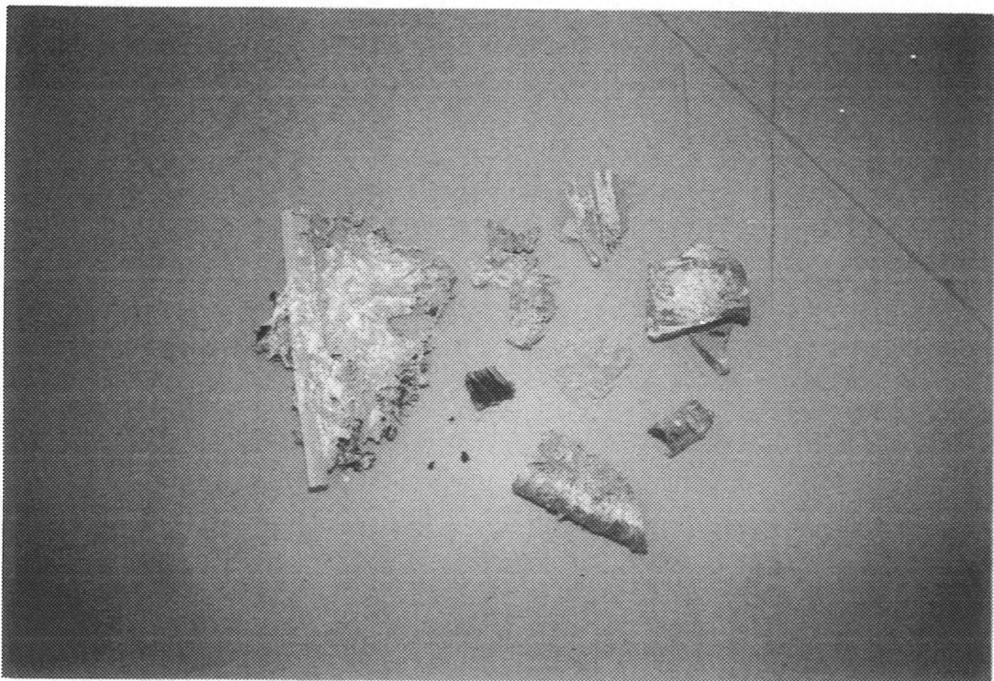
**Foto 7** Versuch 7 - 19 min 38 s nach Zündung



**Foto 8** Versuch 7 - ESG-  
Verglasung nach dem  
Brandversuch



**Foto 9** Versuch 7 - ESG-Verglasung nach dem Brandversuch



**Foto 10** Versuch 7 - Bruchstücke von Wärmeschutz- und ESG-Verglasung