

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

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 Rauch-
ausbreitung
– Brandversuche

100

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN

Forschungsbericht Nr. 100

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

von
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Juli 1996

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. LITERATURAUSWERTUNG	2
3. PROBLEMATIK BEI DER BRANDSCHUTZTECHNISCHEN BEURTEILUNG VON GEBÄUDEN MIT DOPPELTEN FASSADEN	19
4. VERSUCHSPROGRAMM	19
5. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK	20
6. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	23
7. VERSUCHSBEOBACHTUNGEN, MESS- UND VERSUCHS- ERGEBNISSE	24
7.1 VERSUCH 1	24
7.2 VERSUCH 2	28
7.3 VERSUCH 3	31
7.4 VERGLEICH DER BEI DEN 3 VERSUCHEN ERMITTELTEN MESSWERTEN	34
8. ZUSAMMENFASSUNG	35
9. LITERATURVERZEICHNIS	37
10. TABELLEN UND BILDER	38
11. FOTOS	118

Korrekturen

zu

**Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"
Forschungsbericht Nr. 100**

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

**Teil 1: - Literaturoauswertung
 - Einflußgrößen auf die Brand- und Rauchausbreitung
 - Brandversuche**

von Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

In den Bildern 9, 18, 28 sind die Kurven für die Temperaturen
TF2 und TF3 im Flur vertauscht.

In Bild 53 wird die Temperatur TF3 dargestellt.

In Bild 54 wird die Temperatur TF2 dargestellt.

1. EINLEITUNG

Bei mehreren Brandfällen wurde festgestellt, daß die Verglasung von z.B. Schallschutzfenstern eine erhebliche Feuerwiderstandsdauer aufweist. Im Brandfall wurden diese Scheiben durch die hohen Temperaturen im Brandraum nicht zerstört. Dadurch standen die Fenster als Entlastungsöffnungen für Rauch und Wärme nicht zur Verfügung. Als Folge davon ergaben sich im Zugangsbereich zum Brandraum so hohe Temperaturen, daß es den eingesetzten Feuerwehrkräften fast unmöglich war, eine gezielte Brandbekämpfung durchzuführen.

Ähnliche Verhältnisse wie oben aufgeführt sind auch zu erwarten, wenn Brandrauch infolge von vorgehängten oder doppelten Fassaden trotz zerstörter innerer Fensterscheiben nicht bzw. nur ungenügend aus dem Brandraum abziehen kann. Zusätzlich zu dieser Problematik ergeben sich bisher noch nicht abzuschätzende Gefahren bezüglich der Brandausbreitung in benachbarte Räume über Fenster, hervorgerufen durch die im Bereich zwischen den Fassaden brennenden Flammen.

2. LITERATURAUSWERTUNG

Zur Bestimmung der Einflußgrößen, die sich auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden auswirken wurde zunächst eine Auswertung der allgemein zugänglichen Literatur zu diesem Thema vorgenommen.

Klingsch /1/ beschreibt zunächst das Wirkprinzip von Gebäuden mit doppelten Fassaden in Bezug auf die bauphysikalischen Gebäudeeigenschaften. Insbesondere die Gebäude-Gesamtenergiebilanzen können über gezielte Maßnahmen zur Absorption und Reflexion der Sonneneinstrahlung sowie der natürlichen Raumventilation optimiert werden. Die Komfortsteigerung für Gebäudenutzer ergeben sich aus der Möglichkeit einer natürlichen Ventilation über offenbare Fenster und Türen auch im Hochhausbereich, bei gleichzeitiger wirkungsvoller Abschirmung gegenüber beeinträchtigenden Emissionen.

Es wird erwähnt, daß die relativ neue Bauweise der Doppelfassaden bislang in den bauaufsichtlichen Regelungen nicht erfaßt ist und daß über das Verhalten im Brandfall praktisch keine Informationen, die als Hilfe für eine allgemeine brandschutztechnische Sicherheitsbeurteilung dienen können, existieren.

Grundsätzlich besteht eine Doppelfassade aus einer raumseitigen Fassade mit in der Regel offenbaren Fenstern oder Türen und einer durch den Luftraum des Zwischenfassadenbereichs weitestgehend geschlossenen Außenfassade. Die fließende Abgrenzung zu bekannten Fassadenkonstruktionen ergibt sich aus dem variablen Abstand der beiden Fassaden, dem Zwischenfassadenbereich. Raumbezogene Doppelfassadenkonstruktionen mit sehr kleinem Abstand können dem traditionellen Kastenfenster zugeordnet werden, extrem große Abstände (mehrere Meter) stellen den Übergang zu Atrien und ähnlichen Konstruktionen dar.

Unabhängig von den sehr unterschiedlichen Bauweisen können Doppelfassaden unter dem Gesichtspunkt einer brandschutztechnischen

Beurteilung in die nachfolgenden drei Typen A,B,C unterteilt werden:

Typ A: Raumbezogene Doppelfassade

Die Doppelfassade ist auf einen Raum (Zimmer) begrenzt. Es bestehen keine direkten Verbindungen zu den angrenzenden Nachbarräumen.

Hierbei können folgende 2 Untertypen auftreten:

Typ A₁ mit autarker Ventilation des Zwischenfassadenbereiches

Typ A₂ mit Ventilation über einen Ventilationsschacht, der die je Etage beidseitig angrenzenden, raumbezogenen Doppelfassadenbereiche über volle Gebäudehöhe belüftet

Typ B: Eingeschossige Doppelfassade

Im wesentlichen besteht nur eine horizontale Begrenzung (Abschottung) im Bereich der Geschoßplatten. Vertikale Abschottungen sind lediglich über große Entfernungen vorgesehen. Hierbei grenzen mehrere unterschiedliche Räume an einen gemeinsamen Doppelfassadenbereich an. Die Ventilation erfolgt über Frischluft einströmung im Bereich der unteren horizontalen Abschottung, Ausströmen im Bereich der oberen horizontalen Abschottung.

Typ C: Mehrgeschossige Doppelfassade

Die Abschottung erfolgt nicht geschoßweise, d.h. sowohl horizontal als auch vertikal befinden sich unterschiedliche Nutzungsbereiche in einem Doppelfassadenbereich.

Es wird aufgeführt, daß die Innenfassade in der Regel aus einer öffenbaren Mehrfachverglasung und die Außenfassade aus ein Einfachverglasung, die zum Teil luftdurchlässig ist, besteht und aus Sicherheitsgründen aus Einscheibensicherheitsglas (ESG) (splittert nicht bei Bruch) hergestellt werden sollte.

Einzelne Verglasungselemente müssen untereinander unabhängig gehalten werden und Haltekonstruktionen müssen ausreichend vernetzt sein, damit beim Versagen eines Halteelementes Lastumlage-

rungen mit ausreichender Sicherheit möglich sind (Vermeidung eines großflächigen Versagens). Die Innenfassade besteht teilweise auch aus brennbaren Baustoffen, z.B. Fensterrahmen. Horizontale und vertikale Abschottungen bestehen aus nichtbrennbaren Baustoffen wie Stahl, Aluminium, vertikale Glasschottungen (in der Regel G 30) sind ebenfalls möglich.

Klingsch sieht folgende brandschutztechnischen Risiken bei Doppelfassaden: Die optische Lokalisierung des Brandraumes von außen durch die Feuerwehr kann bei Doppelfassaden dann erschwert sein, wenn bei niedriger Energiefreisetzung des Brandes keine thermische Zerstörung der Außenfassade erfolgt. Personen in Räumen mit Doppelfassaden sind kaum in der Lage, im Gefahrenfall auf sich aufmerksam zu machen. Das Einschlagen eines Verglasungselementes einer Außenfassade dürfte für ungeschulte Personen kaum möglich sein. Die relativ hohe Widerstandsfähigkeit der Verglasungselemente der Außenfassade erschwert auch den Zugang der Feuerwehr über die Fassade. Bei Rauchaustritt durch die Innenfassade kann es zu großflächigen Verrauchungen des Zwischenfassadenbereiches kommen. Die Ausdehnung einer solchen Verrauchung hängt im wesentlichen von der Bauart der Doppelfassade ab. Mit dem Austritt von Heißgasen und Flammen durch die Innenfassade hindurch kann es zu einer vertikalen und horizontalen Brandausbreitung innerhalb des Zwischenfassadenbereiches kommen.

Diese Risiken werden zumindest in der Anfangsphase von der Bauart der Doppelfassade bestimmt. Mit zunehmender Brandraumtemperatur und zunehmender Branddauer gilt dieses Risiko jedoch auch unabhängig von der Bauart, da die horizontalen und vertikalen Abschottungen des Zwischenfassadenbereiches in der Regel keine Feuerwiderstands-Klassifizierungen aufweisen.

Die wesentliche Besonderheit des Brandgeschehens innerhalb des Zwischenfassadenbereiches liegt in der Kanalisierung der Brandgase. Je nach Bauart der Doppelfassade kann dieser Kanalisierungseffekt sehr unterschiedlich sein. Dieses ist am ausgeprägtesten bei Bauart C, aber auch bei Bauart A₂ zu erwarten.

Zur Vermeidung von bauphysikalisch unerwünschten großen Strömungsgeschwindigkeiten im Zwischenfassadenbereich sind die Zu-

und Abluftöffnungen so dimensioniert, daß sie für eine wirkungsvolle Entrauchung des Zwischenfassadenbereichs in der Regel nicht ausreichend sind. Der durch das Fenster der Innenfassade ausströmende Rauchvolumenstrom kann somit zu einem Rauchstau im Zwischenfassadenbereich mit horizontaler Rauchausbreitung führen. Zur Vermeidung des Staus von Brandrauch im Zwischenfassadenbereich werden thermisch wirkende Rauchabzugsöffnungen und Rauchabzüge mit einer mechanischen Unterstützung durch Ventilatoren vorgeschlagen, wobei aber zusätzliche Zuluftöffnungen erforderlich werden. Hierbei wird ein Verhältnis von Zuluftfläche zu Abluftfläche von 1:1 vorgeschlagen. Die Aktivierung dieser Installationen muß automatisch angesteuert werden (Rauchüberwachung des Zwischenfassadenbereiches).

Weiterhin erwähnt **Klingsch**, daß die Versagenstemperaturen von Glasscheiben im wesentlichen von der Glashalterung bestimmt werden. Mit zunehmend steiferen Halterungen (Rahmenkonstruktionen) ergeben sich größere, thermisch bedingte Zwängungen, die dann zum Bruch der Glasscheiben führen. Unterschiede in der Glashalterung erklären dann die beobachteten Versagenstemperaturen von Glasscheiben zwischen ca. 200°C und 600°C.

Die Verglasungselemente der Außenfassade werden aus statischen Gründen bewußt zwängungsarm gelagert. Mit dem lokal begrenzten Versagen der Außenfassade wird das Strömungsverhalten im Zwischenfassadenbereich wesentlich verändert und ein großer Teil der Brandgase strömt direkt ins Freie. Dennoch sollte der Anteil der Brandgase nicht unterschätzt werden, der weiterhin in den Zwischenfassadenbereich abströmt. Durch die intensivere Frischluftzumischung kann es hierbei dann zu den bekannten Effekten einer Nachverbrennung im Fassadenbereich kommen, was zu einer Vergrößerung der zerstörten Fassadenfläche führt.

Für eine brandschutztechnische Risikoabschätzung sind die Brandszenarien in Bezug auf Bauweise und Nutzung des Gebäudes differenziert zu beurteilen:

Bezüglich der Gebäude-Bauweise wird eine Risikounterteilung in Abhängigkeit von der Gebäudehöhe vorgeschlagen:

- Typ I Gebäude geringer Höhe
- Typ II Gebäude nicht geringer Höhe (ohne Hochhäuser)
- Typ III Hochhäuser

Entsprechend der Gebäudenutzung wird folgende Abgrenzung vorgeschlagen:

- Typ a Büronutzung und vergleichbar
- Typ b Wohnungen
- Typ c Sondernutzungen mit großen Personenzahlen oder besonderen Personengruppen wie z.B. Versammlungsstätten, Hotels, Schulen, Krankenhäuser, Altenheime

Die Auswirkungen einer geringen Brandlastbelegung der Räume sollte nur in solchen Fällen berücksichtigt werden, wo eine definierte und dauerhafte Sondernutzung gesichert ist, da die Risiken einer späteren Veränderung der Nutzung mit Auswirkung auf die Brandlastbelegung sonst zu kritischen Fehleinschätzung führen kann.

Entsprechend den Risiken sollte eine automatische Brandfrüherkennung auf der Basis von Rauchmeldern vorgesehen werden.

Ein Sprinklerschutz der an die Fassade angrenzenden Räume ist bei hohen resultierenden Gesamtrisiken unvermeidlich. Zur Absicherung einiger Annahmen bei den bisherigen Untersuchungen besteht noch Forschungsbedarf. Die Fragestellungen betreffen sowohl das Brandverhalten einer Doppelfassaden-Konstruktion als auch die Risiken bezüglich Rauch- und Brandweiterleitung im Zwischenfassadenbereich. Brandversuche in Anlehnung an DIN 4102 sind jedoch ungeeignet.

Greven und Schlich /2/ beschreiben zunächst ähnlich **Klingsch /1/** den Aufbau und die bauphysikalischen Vorteile eines Gebäudes mit doppelter Fassade. Anhand von Wärmebilanzen wird das System beschrieben. Weiterhin werden ausgeführte und projektierte Gebäude aufgeführt, wobei verschiedene Bauweisen und Abschottungsvarianten erläutert werden. Hierunter finden sich Gebäude mit Raumsprinklerung, Sprinklerung des Zwischenfassadenbereiches, unterschiedliche Abschottungsvarianten ohne Abschottung, mit

horizontalen und vertikalen Abschottungen, mit nur horizontaler Abschottung, mit und ohne maschineller Entrauchung, mit Rauchmeldeanlage.

Die aufgeführten Bauwerke lassen sich anhand folgender Kriterien klassifizieren:

- **Nutzung** (Büronutzung, Wohnhaus)
- **Gebäudehöhe** (Problematik der Anleiterbarkeit über Drehleitern, Frage nach dem durch die Feuerwehr gestellten 2. Rettungsweg)
- **Umfang der Doppelfassade** (Gebäude ganz oder teilweise mit Doppelfassade)
- **Spaltbreite** (einige Zentimeter bis 2 m)
- **Abschottungssystem** (ohne Abschottung oder mit unterschiedlichen vertikalen und/oder horizontalen Abschottungen)
- **Funktion der Doppelfassade** (zur Klimatisierung oder als Immissionsschutz)

Die beiden Autoren gehen in Ihrer Arbeit auch auf die Verstöße gegen das Baurecht ein.

Bautechnische Neuerungen (hier Doppelfassaden) erfordern eine kritische Überprüfung anhand der Bauordnung und der Sonderbauvorschriften. In der Bauordnung des Landes Nordrhein-Westfalen sind folgende Ziele des vorbeugenden Brandschutzes aufgeführt:

- **Verhinderung der Brandentstehung**

Dies ist bei der Doppelfassade unproblematisch, da meist nicht-brennbare Baustoffe (Metall, Glas) verwendet werden.

- **Verhinderung der Ausbreitung von Feuer und Rauch**

Einige Ausführungen können zur Ausbreitung von Feuer und Rauch beitragen, oft handelt es sich um große repräsentative Bauwerke

mit vielen Menschen.

- Rettung von Menschen

Evtl. ergibt sich eine erhebliche Behinderung, wenn Einsatzkräfte zunächst mehrere Scheiben zerstören müssen um den Brandort oder gefährdete Menschen zu finden. Die Verglasung spielt hierbei eine wesentliche Rolle. Nach der Bauordnung sind Öffnungen in Decken unzulässig, wenn für diese Decken eine Feuerwiderstandsklasse vorgeschrieben ist. Das ist für alle Gebäude bis auf freistehende Wohngebäude mit nur einer Wohnung der Fall. Den Decken kommt aus brandschutztechnischer Sicht erhebliche Bedeutung als abschottendes Bauteil zu, da eine vertikale Brandausbreitung hierdurch verhindert werden soll. Öffnungen sind deshalb nur unter bestimmten Voraussetzungen ausnahmsweise zulässig, wenn die Nutzung des Gebäudes dies erfordert. Der senkrechte Fassadenspalt wird jedoch zur Nutzung der Gebäude nicht benötigt. Einige Ausführungen der Doppelfassaden verstoßen eindeutig gegen diese Regelung. Die Bauordnung ordnet den Wänden ebenso eine abschottende Funktion als Bauteil zu. Gegen diese Forderung wird insbesondere dann verstoßen, wenn die Wände nicht bis an die äußere Verglasung herangeführt werden. Nach der Hochhausverordnung ist ein senkrechter Feuerüberschlagsweg von mindestens 1 m mit Feuerwiderstandsklasse W 90-A (Alternativ dazu: Anbau von mindestens 1,5 m auskragenden Bauteilen in F 90-A) erforderlich. Wird die äußere Fassade als Außenwand betrachtet, dann verstoßen sämtliche vorgestellten Fassadenkonstruktionen gegen diese Regel.

- Löschung eines Brandes

Folgende Gefahren treten bei Bauwerken mit Doppelfassade auf:

- Verrauchung des Fassadenspalt es je nach Abschottung (Teilbereich oder gesamte Fassade)
- Rauch kann sich über mehrere Geschosse über zur Fassade hin geöffnete Fenster ausbreiten
- Brandrauch wird "kanalisiert" gegenüber gewöhnlicher Hochhausfassade
- Rettung von Personen durch den verrauchten Spalt unmöglich

- Verqualmte Doppelfassade erschwert die Lokalisierung des Brandortes von außen, so daß die Feuerwehr im ungünstigsten Fall das Gebäude vollständig absuchen muß, wenn die Scheiben der äußeren Fassade nicht zerstört werden.
- Tragwerk der äußeren Fassade wird durch herausschlagende Flammen aus einem Raum thermisch stark beansprucht (Herunterfallen kompletter Scheiben)
- bei noch intakter Fassade werden die herausschlagenden Flammen kanalisiert und können zu einer Brandausbreitung in über dem Brandherd liegende Geschosse führen.
- thermische Aufheizung der anderen Büros durch Kaminwirkung

In der Arbeit wird auch auf einige Versuchsergebnisse der **Brandversuche Lehrte /4/** (Temperaturprofile an der Fassade) hingewiesen. Die Doppelfassade schließt die Ereignisse innerhalb des Fassadenspalt es zunächst von den äußeren klimatischen Einflüssen ab. Dadurch ist ein Hereindrücken der Flammen und des Rauches in über dem Brandherd gelegene Räume durch Windeinflüsse ausgeschlossen. Dieser Vorteil entfällt erst mit der großflächigen Zerstörung der Fassade wieder.

Als brandschutztechnischen Vorkehrungen werden folgende Maßnahmen vorgeschlagen:

- Sprinklerung des Gebäudes oder von Gebäudeteilen:

Ein Entstehungsbrand kann so mit großer Wahrscheinlichkeit auf den Raum, in dem er entsteht, begrenzt werden. Die Menge und die Temperatur der freiwerdenden Brandgase werden hierdurch deutlich vermindert. Die Sprinklerung ist insbesondere für Räume, die an der Doppelfassade liegen, vorzusehen, damit ein möglicher Entstehungsbrand an dieser kritischen Stelle auf einen engen Raum begrenzt wird. Der Sprinklerschutz für Bereich des Fassadenspalt es kann jedoch zu einem kritischen Ausbreitungsverhalten des Rauches führen, wenn dieser so stark abgekühlt wird, daß er nicht mehr genügend Auftrieb entwickelt, um den Fassadenspalt nach oben hin zu verlassen.

- Entrauchungsanlagen

Die Verrauchung des Fassadenspalt es stellt eine der größten Gefahren der Klimafassaden dar. Eine wirksame Entrauchung durch freie oder erzwungene Konvektion ist deshalb eine wirkungsvolle Maßnahme zur Erhöhung der Sicherheit dieser Gebäude. Die Wirkung der erzwungenen Konvektion durch maschinelle Rauchabzüge wird bei komplizierten Fassadenabschottungen oder bei einer geschlossenen Außenfassade erforderlich. Je nach Größe des Luftspaltes und der Brandintensität sind sehr hohe Förderleistungen nötig.

- Schließanlage für Fenster

Fenster von Büroräumen, die an einer nicht - oder nur teilweise - geschotteten Klimafassade liegen, sollten im Brandfall geschlossen werden, damit es nicht zu einer weiteren Rauchausbreitung kommen kann. Hierbei wird auf brandmeldergesteuerte Schließanlage verwiesen.

- Besondere Anforderungen an die Verglasung

Der Flammenaustritt aus einem an der Doppelfassade gelegenen Raum in den Fassadenspalt belastet sowohl die innere als auch die äußere Glaswand. Sollte die Glaswand der inneren Fassade bis auf die Decke heruntergezogen werden, dann muß ein Flammenüberschlagsweg in Form einer Kragplatte oder eine Glasqualität mit Feuerwiderstandsklasse eingebaut werden. Die äußere Fassade sollte nicht großflächig zerstört werden und aus Glastafeln bestehen, die bei thermischer Belastung kleinstückig zerfallen, um anrückende Einsatzkräfte nicht unnötig zu gefährden.

- Anforderungen an der Tragwerkskonstruktion

Durch die Kaminwirkung droht insbesondere eine freistehende Fassade ohne Abschottung zu versagen, wenn sie nicht entsprechend überdimensioniert ist oder mit einem Feuerschutzanstrich versehen ist. Ebenso geschützt muß die Halterung der Glastafeln sein, um ein Heruntersegeln der Scheiben im großen Stil zu vermeiden.

- Zweiter Rettungsweg

Auch Gebäude mit einer Doppelfassade, die noch unterhalb der Hochhausgrenze liegen, sollten einen zweiten baulichen Rettungsweg haben, denn eine Rettung über eine Klimafassade scheint problematisch. (Ausnahmen evtl. bei Gebäuden, die nur zum Teil von einer Klimafassade eingehüllt sind, oder deren Fassade offenbar ist.)

Für die Autoren von /2/ birgt die Doppelfassade ohne jede Abschottung und großem Luftspalt das höchste Gefährdungspotential in sich.

Siegfried /3/ beschreibt zunächst den prinzipiellen Aufbau eines Gebäudes mit einer doppelten Fassade, wobei vor einer konventionellen Fassade eine zusätzliche Fassade aus Sicherheitsglas angeordnet wird. Der Zwischenraum kann von Luft durchströmt werden. Die einfachste Anordnung besteht ohne vertikale und horizontale Abschottung im Zwischenraum. Kompliziertere Varianten verwenden horizontale und/oder vertikale Abschottungen, um bestimmte Lüftungskonzepte zu realisieren. Dabei kann grundsätzlich eine mechanische Be- und Entlüftung der Räume und des Fassadenzwischenraumes zum Einsatz kommen. Im allgemeinen wird jedoch eine natürliche Be- und Entlüftung bevorzugt. Die Fenster der Innenfassade sind dann wenigstens teilweise offenbar oder verfügen über Belüftungsklappen, so daß zwischen dem Fassadenzwischenraum und den angrenzenden Räumen ein Luftaustausch stattfinden kann. Die Lüftung erfolgt aufgrund von Druckdifferenzen, die durch den thermischen Auftrieb oder eine Überlagerung von Wind und thermischem Auftrieb hervorgerufen werden kann. Es wird darauf hingewiesen, daß es bezüglich des Brandschutzes keine für alle Varianten gültige Beurteilung geben kann und daß sich eine angemessene Beurteilung daher um die Details der konkreten Ausführung kümmern muß.

Bei der Beurteilung von Gebäuden mit doppelten Fassaden treten folgende Fragen und Probleme auf:

- Rauchabfuhr im Brandfall,

- Brandausbreitung über den Fassadenzwischenraum in andere, vom Brand nicht betroffene Räume
- In den Fassadenzwischenraum eintretende Flammen und Rauchgase können häufig nicht so viel Umgebungsluft einmischen wie bei einer Normalfassade.
- Evtl. schnellerer Flammenüberschlag als bei einer normalen Fassade. Das vertikale Temperaturprofil hängt jedoch von den geometrischen Randbedingungen, der Zuluft über diverse Öffnungen und dem Verhalten der Außenverglasung ab. Bei Bestimmung des Versagenszeitpunktes der Fenster der Innenfassade können nur Experimente weiterhelfen.

Siegfried geht in seiner Arbeit auf Ergebnisse der Brandversuche Lehrte /4/ ein. Die Brandversuche wurden in einem leerstehenden Mehrfamilienhaus durchgeführt. Als Brandlast wurden Holzkrippen, Mobiliar und Heizöl verwendet. Bei 8 Versuchen, die mit Holzkrippen als Brandlast durchgeführt wurden, betrug die Brandbelastung je nach Ziel des Versuches und Art des Raumes innerhalb des Brandabschnittes 15, 30, 60 und 90 kg Holz/m². Bei den Versuchen mit Mobiliar als Brandlast wurde eine Einheit mit Büromöbeln und Einrichtungsgegenständen ausgestattet und eine Wohnung komplett möbliert. Die Brandbelastungen in den einzelnen Räumen lagen zwischen ca. 20 und 50 kg/m² Holzgleichwert. Bei den Versuchen mit Heizöl als Brandlast wurde im oberen Drittel der Brandräume die Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102 als Temperatur-Zeit-Verlauf des Brandes gewählt. Gemessen wurden die Temperaturen in den Versuchsräumen und vor der Außenfassade. In Abhängigkeit von den Lüftungsverhältnissen wurden recht unterschiedliche Temperaturverläufe im Brandraum gemessen. Die Temperaturen im Deckenbereich lagen zwischen 600°C und 900°C. In allen Fällen wurde ein relativ hohes Temperaturniveau vor dem 1,5 m hohen Fenster des über dem Brandraum gelegenen Raumes gemessen (ca. 500°C - 800°C). Der Abstand von Fenstersturz des Brandraumes bis zur Unterkante des darüberliegenden Fensters betrug 1,34 m. Die Türen zwischen den Räumen waren geöffnet, die Fenster waren bei der Mehrzahl der Versuche geöffnet oder in Kippstellung. Bei Querlüftung der Brandräume hatte der Wind einen

erheblichen Einfluß auf die Flammenlänge. Bei einer Windkomponente parallel zur Frontwand konnten die Flammen erheblich in die horizontale Richtung ausgelenkt werden. Waren die Fenster des über dem Brandraum liegenden Raumes geöffnet oder die Scheiben zerstört, dann konnten bei einer Windkomponente rechtwinklig zur Hauswand Rauchgase in diesen Raum einströmen. Die Scheiben der Fenster bestanden aus normalem Fensterglas ($d = 3\text{mm}$). Sie hielten dem Feuer im allgemeinen zwischen 5 und 15 Minuten stand. Als Fazit der Brandversuche in Lehrte wurde folgendes festgestellt:

- Die Temperaturen vor einem oberhalb des Brandraumes liegenden Fensters sind bei einem Vollbrand relativ hoch und reichen bereits für die Entzündung bestimmter Stoffe aus.
- Die Temperatur vor dem Fenster ist zwar primär von der Brandraumtemperatur abhängig, sie wird aber auch durch eine Querlüftung infolge von Wind beeinflusst.
- Bei einer Windkomponente senkrecht zur Hauswand können Heißgase durch geöffnete oder zerstörte Fenster wieder in das Gebäude einströmen.
- Ein Feuerüberschlagsweg von 1 m, der in höheren Gebäuden normalerweise gefordert wird, kann eine Brandweiterleitung in das nächste Geschoß nicht sicher ausschließen, aber länger hinauszögern. Ist die Brandraumtemperatur oder die Einwirkungsdauer der hohen Temperaturen geringer als bei den Brandversuchen in Lehrte, dann kann ein Feuerüberschlagsweg von 1 m als Sicherheitsabstand ausreichen.
- Die Windeinflüsse in Verbindung mit den Lüftungsbedingungen des Brandraumes können die Gefahr eines Feuerüberschlags in das nächste Geschoß deutlich verschärfen.

Siegfried untersuchte in Brandversuchen einen Doppelfassadentyp, bei dem der Luftzwischenraum zwischen innerer und äußerer Schale durch vertikale und horizontale Abschottungen in übereinanderliegende Fensterkästen und vertikal durchlaufende Lüftungsschächte unterteilt. Die Lüftungsschächte können an der untersten und an der obersten Stelle geöffnet werden. Die Fensterkästen sind durch seitliche Überströmöffnungen im oberen Bereich

mit den Lüftungsschächten verbunden. Die Fenster in der Innenfassade können als Dreh- oder Kippflügel geöffnet werden oder verfügen über Belüftungsklappen am oberen und unteren Rand der Fensterflügel. Die Außenfassade besteht meist aus 8 mm Einscheibensicherheitsglas (ESG) mit innenliegendem Sonnenschutz und befindet sich ca. 25 cm - 30 cm vor der Innenfassade. Sie enthält im Bereich der Quersprossen Belüftungsschlitze, über die Außenluft in die Fensterkästen einströmt.

Zur Untersuchung des Brandverhaltens dieser Doppelfassade wurde ein zweigeschossiger Fassadenausschnitt in einen bestehenden Prüfstand eingebaut. Der Prüfstand hatte die Innenmaße Länge * Breite * Höhe = 3,61 m * 3,59 m * 5,6 m. Der Fassadenausschnitt hatte etwa die gesamte Breite und Höhe des Prüfstandes. Der Brandraum des Versuchsaufbaus befand sich im unteren Geschoß und hatte die Innenmaße Länge * Breite * Höhe = 3,24 m * 1,8 m * 2,75 m. Die Belüftung des Brandraumes erfolgte über Öffnungen in der Rück- und Seitenwand und über Öffnungen im Boden des Brandraumes.

Insgesamt wurden die folgenden vier Versuche durchgeführt:

Versuch 1: Fenster aus Kiefernholz mit Isolierglas, Klappe offen, 160 kg Holzkrippen, Außenfassade aus Leichtmetallprofilen und 8 mm ESG (ca. 25 - 30 cm vor der Innenfassade), Horizontalschotte aus 6 mm Silikat-Brandschutzbauplatten (Promatect^R), Vertikalschotte aus 8 mm ESG

Versuch 2: wie Versuch 1 jedoch ohne Außenfassade bzw. Abschottungen

Versuch 3: Fenster aus Aluminium mit Isolierglas, linkes Fenster in Drehstellung ca. 20 cm offen, 8 kg Holzkrippen + Rauchkörper, Außenfassade aus Leichtmetallprofilen und 8 mm ESG (ca. 25 - 30 cm vor Innenfassade), Horizontalschotte aus Aluminium, Vertikalschotte

aus 12 mm ESG

Versuch 4: wie Versuch 3, jedoch Fenster geschlossen, 160 kg Holzkippen

Der Abstand der Holzkippen zu der Fensterfront betrug ca. 0,38 m. Die Zündung erfolgte an einer Holzkippe mittels zweier Schälchen mit je 0,3 l Brennspritus. In der Arbeit werden die zeitlichen Temperaturverläufe für die Brandraumtemperatur (0,45 m unterhalb der Brandraumdecke) und vor dem Schachtfenster des darüberliegenden Raumes (0,3 m oberhalb der Fensterunterkante) wiedergegeben. Die Brandraumtemperatur erreichte einen Wert bis 700°C. Die Temperatur vor dem Schachtfenster erreichte ebenfalls, abhängig von der Versuchsdurchführung, einen maximalen Wert bis zu 600°C. Die doppelt verglasten Fenster der Innenfassade verhielten sich bei Brandbeanspruchung derart, daß die ersten Sprünge bei Differenztemperaturen um 60 K an den Innenscheiben auftraten. Sowohl die Innen- als auch die Außenscheiben bleiben dabei aber noch intakt. Die Zerstörung der Fensterscheiben trat bei den Versuchen zwischen der 21. und 29. Minute auf. Dabei befand sich eine Brandlast von ca. 160 kg Holzkippen praktisch unmittelbar vor der Fensterfront. Die Oberflächentemperaturen auf den Scheiben lagen in fast allen Fällen über 300°C. Weiterhin wurde eine Temperaturmessung am Rand der Scheibe durchgeführt. Es ergaben sich Temperaturdifferenzen von annähernd 300 K für das Schachtfenster. Die Raumtemperaturen vor den Fenstern lagen in allen Fällen über 500°C. Im Gegensatz zu dem Glas der Doppelfenster (Innenfassade) versagte das Einzelscheibensicherheitsglas der Außenfassade vor dem Schachtfenster innerhalb von 3 min - 8 min nach der Zerstörung des Glases der Doppelfenster. Die Außenverglasung im Brüstungsbereich sprang ca. 11 min - 28 min nach der Zerstörung des Schachtfensters. Auch hier wurde eine Oberflächentemperatur von ca. 300°C als Versagenskriterium angesehen. Wie Versuch 1 gezeigt hat, nahmen die Temperaturen im Fassadenzwischenraum nach einer teilweisen Zerstörung der Außenverglasung nicht ab, sondern stiegen im Brüstungsbereich und vor dem Schachtfenster nach Versagen der

unteren Außenverglasung sogar noch an. **Siegfried** vermutet, daß dieses Phänomen bei allen Doppelfassaden mit relativ geringem Abstand zwischen Innen- und Außenfassade auftritt und weist darauf hin, daß der Einfluß des Abstandes zwischen den Fassaden auf das vertikale Temperaturprofil noch genauer untersucht werden muß. Das Schachtfenster im Obergeschoß wurde nicht zerstört, es trat jedoch an der Innenscheibe eine Oberflächentemperatur von 240°C auf. Die eingesetzten Horizontalschotte verhinderten eine starke Temperaturerhöhung vor den darüberliegenden Fenstern. Die Vertikalschotte aus Glas oder Aluminium wurden im Erdgeschoß zwar teilweise zerstört, dies geschah aber erst nach dem Versagen der Außenverglasung. Die Vertikalschotte im Obergeschoß blieben bei allen Versuchen unversehrt. Bei den Brandversuchen mit schnellem Temperaturanstieg wurde unabhängig von der Stellung der Belüftungsklappen ein einwandfreier Abzug der Rauchgase beobachtet, wobei keine Verrauchung der Fensterkästen im Obergeschoß auftrat. Bei Versuch 3 nach /3/ (niedrige Brandlast, relativ kühle Rauchgase im Schacht) kam es zeitweilig zum Raucheintritt in einen der oberen Fensterkästen. Nach /3/ wurden aufgrund theoretischer Untersuchungen weitere Doppelfassadentypen bewertet. Die für diese Beispiele angegebenen Berechnungsergebnisse wurden mit Simulationsmodellen ermittelt, die für die speziellen Gegebenheiten in einer Doppelfassade angepaßt wurden. Untersucht wurden hierbei eine doppelte Fassade ohne horizontale Abschottung vom untersten bis zum obersten Geschoß bzw. eine Variante mit einer geschoßweisen horizontalen Abschottung. Die Meß- und Rechenergebnisse wurden für eine Spaltweite von 0,25 m und 0,7 m punktuell verglichen, wobei nach /3/ eine gute Übereinstimmung beim Temperaturverlauf im Fassadenzwischenraum feststellte.

Siegfried berichtet in /5/ über die in /3/ durchgeführten Versuche. Weiterhin wurden die vorhandenen Zonenmodelle hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit zur numerischen Simulation bei doppelten Fassaden überprüft. Deren Anwendung setzt allerdings die Entstehung einer Rauchsicht voraus, welche aber bei vielen Fassadenzwischenräumen nicht angenommen werden kann, da sich

hier eine Kaminströmung einstellt. Aus der eindimensionalen stationären Impulsgleichung wird ein Lösungsansatz für den Differenzdruck, den Massenstrom und die Temperaturabnahme über der Schachthöhe unter der Annahme einer mittleren Dicht und homogenen Verhältnissen über dem Schachtquerschnitt abgeleitet.

Siegfried /5/ ist jedoch der Meinung, daß Feldmodelle zur Beschreibung der Problematik besser geeignet sein dürften.

Seidel und Kiefer /6/ geben in ihrer Arbeit u.a. eine Antwort darauf, weshalb eine in einem Rahmen eingebaute Glasscheibe aus Bauglas (Kalk-Natronglas) bei Ausbruch eines Brandes zerspringt. In der Aufheizphase wird zunächst nur die Mitte der Glasscheibe erhitzt, während der durch den Rahmen abgedeckte Scheibenrand kalt bleibt. Die heiße Scheibenmitte will sich entsprechend ihrer linearen Wärmeausdehnung ausdehnen, wird aber durch den kalten Scheibenrand daran gehindert. In der Mitte der Scheibe entsteht somit eine Druckspannung (σ_{Druck}) und im Randbereich eine Zugspannung (σ_{Zug}). Die Höhe der Zugspannung hängt neben den Glaseigenschaften wie lineare Wärmeausdehnung (α), Elastizitätsmodul (E) und Poisson'schem Verhältnis (μ), in erster Linie von der sich während des Brandes aufbauenden Temperaturdifferenz (ΔT) zwischen Scheibenmitte und Scheibenrand ab:

$$\sigma_{\text{Zug}} \sim \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \Delta T \quad [\text{MPa}]$$

Die Temperaturdifferenz (ΔT) wird durch die Aufheizgeschwindigkeit des Brandraumes und die Breite der Rahmenabdeckung bestimmt. Eine Abschätzung der Temperaturverteilung auf der Glasscheibe nach verschiedenen Aufheizzeiten (τ) während der Aufheizphase entsprechend der Einheitstemperaturkurve (ETK) nach DIN 4102 ist in der Veröffentlichung angegeben. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen Scheibenrand und -mitte tritt nach etwa 10 min auf. Bei einer Rahmenabdeckung von 20 mm bis 30 mm muß hiernach mit einer maximalen Temperaturdifferenz von etwa 300 K bis 400 K gerechnet werden. Überschreitet die entstehende

Zugspannung im Randbereich die Grundfestigkeit des Glases, so kommt es zum Bruch der Scheibe. Der Bruch geht dabei meist von einer Verletzung (Mikroriß) im Randbereich aus, läuft zunächst auf die Scheibenmitte zu, biegt im heißen Randbereich der Scheibenmitte ab und verläuft in der neutralen Zone parallel zum Rahmen rund um die Scheibe. Die Scheibe wird dabei regelrecht aus dem Rahmen "herausgeschnitten". In diesem Bruchverlauf liegt die Ursache, daß bei einem Brand großflächige Scheibenstücke abstürzen. Weiterhin wird in der Arbeit über die Entwicklung und Eigenschaften von Brandschutzverglasungen und Glaskeramiken berichtet.

3. PROBLEMATIK BEI DER BRANDSCHUTZTECHNISCHEN BEURTEILUNG VON GEBÄUDEN MIT DOPPELTEN FASSADEN

Die konstruktiven Einflußgrößen auf die Brand- und Rauchausbreitung sowie die Feuerwiderstandsfähigkeit bei Gebäuden mit doppelten Fassaden sind in **Tabelle 1** aufgeführt. Diese große Anzahl von Einflußfaktoren im Bereich von Innenfassade, Zwischenfassadenbereich, Außenfassade, in den Räumen etc. zeigt, daß zum einen eine riesige Zahl von Versuchen durch Kombination der einzelnen Einflußfaktoren nötig wäre, um die Problematik der Brandausbreitung in Gebäuden mit Doppelfassaden vollständig zu beschreiben. Gleichzeitig stellt dieses aber auch ein Problem für numerische Simulationen dar, da diese die Versuchsergebnisse in Form von Anfangs- und Randbedingungen berücksichtigen müssen. Das bedeutet aber auch, daß es bezüglich des Brandschutzes keine für alle Varianten von Gebäuden mit Doppelfassaden gültige Beurteilung geben kann.

4. VERSUCHSPROGRAMM

Zur Untersuchung der Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden im Zwischenfassadenbereich sowie in benachbarte und darüberliegende Räume werden Brandversuche in einer dafür errichteten Versuchseinrichtung durchgeführt. Von Interesse sind hierbei die Bestimmung von Wärmefreisetzung, Temperaturen, Strömungskenngrößen, Gaskonzentrationen bei unterschiedlichen Versuchsparametern. Diese Versuchsparameter orientieren sich an der in **Tabelle 1** aufgeführten Übersicht. In dieser Arbeit wird über in die Problematik einführende Versuche als Basis für weiterführende Untersuchungen berichtet. Diese Versuche dienen gleichzeitig zur Kalibrierung der Meßtechnik und zur Beurteilung der Belastbarkeit der neu errichteten Versuchseinrichtung durch Brände.

5. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

Bild 1 zeigt die Prinzipskizze des Versuchsaufbaus und den Meßstellenplan in einer Gesamtdarstellung mit den entsprechenden Abmessungen, Bild 2 zeigt im Detail den Zwischenfassadenbereich. Man erkennt den Brandraum (s.a. Foto 1) und das durch eine Wand angedeutete weitere Stockwerk. Im Brandraum befindet sich eine Fensteröffnung. Die Wand des oberen Stockwerkes wurde aus Silikat-Brandschutzbauplatten gefertigt. Die Fensteröffnung des oberen Stockwerkes ist bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen ebenfalls mit Silikat-Brandschutzbauplatten verschlossen. Ein Fenstereinbau ist bei späteren Versuchen geplant, um z.B. die Entzündung von Gardinen hinter einer Scheibe durch die Wärmestrahlung von Flammen untersuchen zu können. An den Brandraum grenzen ein Flur sowie ein Nebenraum an. Die Räume sind jeweils durch eine Holztür miteinander verbunden. Sämtliche Räume wurden innen mit Silikat-Brandschutzbauplatten verkleidet, um der Brandbelastung durch mehrere Versuche standhalten zu können. Der Boden des Brandraumes ist als Waageplattform ausgebildet. Die Decke des Brandraumes ist in der Höhe verstellbar.

Vor der Wand des Brandraumes und des "oberen Stockwerkes" befindet sich eine verfahrbare Außenfassade (Foto 2). Der Fahrbereich der Fassade deckt den gesamten Abstandsbereich zwischen ca. 0 m und 2 m ab. Greven und Schlich /2/ erwähnen in Ihrer Arbeit Abstände zwischen Innen- und Außenfassade zwischen 0,2m und 2m. Die Außenfassade besteht aus einem verfahrbaren Stahlgerüst mit daran befestigten Silikat-Brandschutzbauplatten (PROMATECT^R-L) von 20mm Stärke. Zur Simulation einer nichtzerstörten Außenfassade wurden diese statt Einscheibensicherheitsglas (ESG) verwendet. In ausgewählten Versuchen sollen zu einem späteren Zeitpunkt Scheiben aus ESG in der Außenfassade untersucht werden, um die Unterschiede z.B. bei den zeitlichen Temperaturverläufen zu Silikat-Brandschutzbauplatten herauszustellen. Der Forschungsstelle für Brandschutztechnik ist es hierbei bewußt, daß bezüglich der Wärmeübertragung Unterschiede bei Silikat-Brandschutzbauplatten und Einscheibensicherheitsglas auftreten. Gleichzei-

tig wurde untersucht, wie sich die Wärmedurchgangskoeffizienten ändern, wenn statt dieser beiden Materialien reines Stahlblech oder mit Stahlblech verkleidete Silikat-Brandschutzbauplatten als Außenfassade verwendet werden würden. Hierzu wurden zunächst die Wärmedurchgangskoeffizienten für verschiedene Strömungszustände an der Außenfassade errechnet.

Nach /7/ läßt sich der Wärmedurchgangskoeffizient k für eine mehrschichtige Wand nach der folgenden Gleichung berechnen:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad [W/m^2K]$$

- α_i = Wärmeübergangskoeffizient in W/m^2K an der inneren Oberfläche der Außenfassade
- s_j = Waddicken der einzelnen Wandmaterialien in m
- λ_j = Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Wandmaterialien in W/mK
- α_a = Wärmeübergangskoeffizient in W/m^2K an der äußeren Oberfläche der Außenfassade

Aus den Literaturstellen /7, 8, 9, 10, 11/ ergeben sich die Stoffwerte in **Tabelle 2** zur Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten für verschiedene Materialien und Strömungszustände. Kleine Wärmeübergangskoeffizienten sind hierbei gleichzusetzen mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten, große Wärmeübergangskoeffizienten mit großen Strömungsgeschwindigkeiten.

Bild 3 zeigt einige Ergebnisse dieser Berechnungen, wobei bei ESG und Stahlblech die größten k -Werte auftreten. Bei PROMATECT^R-L und mit Stahlblech verkleidetem PROMATECT^R-L ergeben sich keine Unterschiede. Die niedrigste Wärmeübertragung durch die Außenfassade ergibt sich bei sowohl kleiner Strömungsgeschwindigkeit (kleiner Wärmeübergangskoeffizient) innen als auch außen. Ein kleiner Wert ergibt sich ebenfalls bei hoher Strömungsgeschwindigkeit innen und niedriger Strömungsgeschwindigkeit außen. Die größte Wärmemenge wird bei großen Wärmeübergangskoeffizienten innen und außen übertragen.

Weiterhin wurden die Wärmeeindringzahlen b für die Materialien PROMATECT^R-L, ESG und Stahlblech berechnet. Nach /8/ und /12/ ist die Wärmeeindringzahl das Produkt von Stoffkonstanten, das für Temperaturanstiege maßgebend ist, z.B. beim kurzfristigen Kontakt verschieden warmer Körper. Die Wärmeeindringzahl ist z.B. auch für die Wärme- oder Kälteempfindung beim Berühren eines Körpers maßgebend und läßt sich wie folgt darstellen:

$$b = \sqrt{\lambda c \rho} \quad [\text{kJ/s}^{1/2}\text{m}^2\text{K}]$$

λ = Wärmeleitfähigkeit in kJ/smK ($\leq \text{W/mK}$)

c = Spezifische Wärmekapazität in kJ/kgK

ρ = Dichte in kg/m^3

Hieraus ergeben sich folgende Werte der Wärmeeindringzahl b für:

ESG:	1,22	$\text{kJ/s}^{1/2}\text{m}^2\text{K}$
PROMATECT ^R -L:	0,178	$\text{kJ/s}^{1/2}\text{m}^2\text{K}$
Stahlblech:	14,28	$\text{kJ/s}^{1/2}\text{m}^2\text{K}$

Ein kleiner Wert der Wärmeeindringzahl bedeutet, daß in einem kleinen Zeitraum eine geringe Wärmemenge in die Wand fließt. Dies ist nur bei PROMATECT^R-L und ESG der Fall.

Der Einfluß der Wärmestrahlung innerhalb des Energieaustausches zwischen Zwischenfassadenbereich und Umgebung durch Einscheibensicherheitsglas hat ebenfalls einen Einfluß auf das Strömungsverhalten der Luft- und der Rauchgase. Dieses muß in weiteren Versuchen noch näher untersucht werden.

An dieser Stelle muß betont werden, daß der Wärmeaustausch durch die Außenfassade bedeutungslos wird, sobald sich nicht nur Rauchgase sondern Flammen im Zwischenfassadenbereich befinden.

Als Brandlast wurde bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen eine Brandlastpalette nach Bild 4, Tabelle 3 im Brandraum vor dem Fenster aufgebaut (Foto 1). Diese Brandlastpaletten

wurden bereits bei früheren Versuchen der Forschungsstelle für Brandschutztechnik zur Simulation von Raumbränden eingesetzt. Wie die Untersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik gezeigt hatten, entspricht das Abbrandverhalten derartiger Brandlastpaletten bei der Verwendung von 2 Stück hinsichtlich Temperatur- und Rauchgasentwicklung im Brandraum in etwa dem normaler Wohnungseinrichtungen. Bei diesen hier beschriebenen ersten Versuchen wurde im Hinblick auf eine geringere thermische Belastung der Versuchseinrichtung nur eine Brandlastpalette verwendet. Die Brandlastpaletten haben den Vorteil, daß diese gegenüber Möbel wesentlich 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 sowie die Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration mit Infrarot-Gasanalysatoren gemessen. Die Art und Position der Meßstellen sind **Bild 1** und **2** sowie der Meßstellenliste nach **Tabelle 4** zu entnehmen. Zusätzlich wurde der Versuchsablauf mit mehreren Farbvideokameras aufgezeichnet.

Die Meßwertregistrierung erfolgte mit einer personalcomputer-gesteuerten Datenerfassungsanlage. Mit Hilfe dieses Rechners wurden die Daten nach dem Versuch ausgewertet.

6. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Tabelle 5 gibt nähere Einzelheiten über die Versuchsaufbauten und Versuchsparameter (z.B. Zu- und Abluftöffnungen, Fenster, Türen, Fassadenabstand). Bei **Versuch 1** wurde der Abstand zwischen Innen- und Außenfassade während des Versuches variiert. Nähere Einzelheiten darüber sind der **Tabelle 6** - Versuchsablauf,

zu entnehmen. **Tabelle 7** gibt den Versuchsablauf bei **Versuch 2** und **Tabelle 8** den Versuchsablauf bei **Versuch 3** wieder. Bei den **Versuchen 2** und **3** betrug der Abstand zwischen Innen- und Außenfassade jeweils 0,5 m. Die Zündung erfolgte bei allen Versuchen durch 1/2 l Brennspritus in einer Zündwanne unterhalb der Zündkrippe (s. **Bild 4**)

7. VERSUCHSBEOBSACHTUNGEN, MESS- UND VERSUCHSERGEBNISSE

Bei allen Versuchen steht der zeitliche Verlauf der Meßwerte für Temperatur, Abbrandmasse, Gaskonzentration etc. in engem Zusammenhang mit den Ventilationsöffnungen. Hierunter fallen insbesondere die Brandraumtür und die Tür des Flures als Öffnung zur Versuchshalle sowie das Brandraumfenster. 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.

7.1 VERSUCH 1

Der Ablauf des **Versuches 1** ist in **Tabelle 6** wiedergegeben. Die Zuluft- und Abgasquerschnitte im Zwischenfassadenbereich ergeben sich aus dem jeweiligen Zwischenfassadenabstand und der Breite von 5 m.

Bild 5 zeigt die Temperaturen im **Brandraum**. Die Temperatur TB2 erreicht im Deckenbereich einen maximalen Wert von ca. 700°C. Diese Temperatur wird bei einem Abstand zwischen Innen- und Außenfassade von 0,5 m bis 1 m in der Zeit 16 min erreicht. Beim Verschieben auf 1,5 m fällt diese Temperatur wieder ab. Beim Verschieben auf 0,2 m erfolgt kein Wiederanstieg der Temperatur, da sich der Brand zu diesem Zeit bereits in der Abklingphase befand. Die Tür des Brandraumes (Holztür mit Röhrenspanstreifen) brannte erst am Ende des Versuches durch.

Bild 6 zeigt die Temperaturen im Fensterbereich der Innenfassade. Die höchsten Temperaturen von 900°C bis 950°C treten hierbei im Bereich der Oberkante der Fensteröffnung (TBF1, TBF2) bei einem Abstand von 1 m zwischen Innen- und Außenfassade nach ca. 16 min auf. Die Temperatur TOR1 im Bereich des "oberen Fensters" weist zum gleichen Zeitpunkt eine Temperatur von etwas über 500°C auf. Diese Temperatur wird nocheinmal bei einem Abstand von 0,2 m nach ca. 25 min erreicht.

Die **Bilder 7 und 8** zeigen die Temperaturen im **Zwischenfassadenbereich** (TZ1 bis TZ10) in einem Abstand von 0,2 m von der Innenfassade sowie die Temperatur TZ3.1 an der inneren Oberfläche Außenfassade. Die höchsten Temperaturen treten auch hier bei einem Abstand von 1 m zwischen Innen- und Außenfassade in der Mitte der Fassade auf, wobei die höchste Temperatur von ca. 900°C an der Meßstelle TZ4 im Bereich der Oberkante der Fensteröffnung auftritt. An der Oberkante des Zwischenfassadenbereiches (TZ9) treten Temperaturen bis knapp über 500°C auf. Bei einem Abstand von 0,5 m zwischen Innen- und Außenfassade sind ca. 0,3 m bis 0,5 m hohe Flammen über der Fassadenoberkante (5,78 m) erkennbar. Im Bereich der vertikalen Abschottung fallen die Temperaturen (TZ5, TZ6, TZ8, TZ10) auf ca. 100°C ab. An der Außenfassade treten Temperaturen (TZ3.1) von bis zu 600°C auf.

Bild 9 und 10 zeigt die Temperaturen im **Flur bzw. Nebenraum**. Diese Temperaturen liegen unter 100°C.

Bild 11 zeigt nocheinmal ausgewählte Temperaturen aus dem **Brandraum, Fenster- und Zwischenfassadenbereich** im Vergleich.

Bild 12 zeigt den zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung im **Brandraum**.

Aus dem zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse während der Brandversuche erhält man durch Differentiation dieser Kurve die Abbrandrate und über die Verwendung eines entsprechend der Komponenten der Brandlast gewichteten Heizwertes den beim Abbrand

freigesetzten Gesamtwärmestrom. Die Abbrandmasse ΔM ergibt sich aus der Differenz zwischen Anfangsmasse M_0 und der noch nicht verbrannten Masse der gelagerten Stoffe zum Zeitpunkt t zu

$$\Delta M = M_0 - M(t)$$

Die zeitliche Abbrandrate \dot{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 \dot{Q} und der Abbrandrate \dot{M} für einen homogenen Stoff bei vollständiger Verbrennung.

$$\dot{Q} = \dot{M} \cdot H_u$$

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 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 3** zu entnehmen.

Der aufsteigende fühlbare Wärmestrom ist wesentlich geringer als der nach der obigen Gleichung errechnete 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. Der Restwärmestrom (fühlbarer Wärmestrom) \dot{Q}_f beträgt nach je nach verwendetem Lagergut und geometrischer Anordnung ca. 35 % bis 50 % des theoretischen Wertes. Der fühlbare Wärmestrom ist der Wärmestrom, der oberhalb des brennenden Lagerstapels auftritt und der im wesentlichen sowohl für das Ansprechen von thermisch wirkenden Auslöseelementen einer Löschanlage verantwortlich ist als auch bei der thermischen Auslegung von Decken oder Dächern von Lagergebäuden berücksichtigt werden muß.

Wie **Bild 12** zeigt, tritt eine maximale Abbrandrate von ca. 10,2 kg/min und eine maximale Wärmefreisetzung von ca. 1,45 MW auf. Der Abstand zwischen Innen- und Außenfassade beträgt zu diesem Zeitpunkt (16 min) 0,5 m.

Die **Bilder 13.1** und **13.2** zeigen die Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im **Brandraum** und im **Flur**.

Da dieser 1. Versuch mit während des gesamten Zeitraumes offener Fensteröffnung ohne Glas durchgeführt wurde, schlagen schon nach ca. 7 min erste Flammen aus der Fensteröffnung.

Nach ca. 8 min fällt die Sauerstoffkonzentration im **Brandraum** nach **Bild 13.1** stark ab und erreicht nach ca. 17 min das Minimum von knapp unter 2 Vol.%. Dieses Minimum fällt zusammen mit einem

Fassadenabstand von 1 m. Die Kohlendioxidkonzentration weist zu diesem Zeitpunkt ihr Maximum von knapp über 18 Vol.% auf. Die Kohlenmonoxidkonzentration erreicht nahezu 1 Vol.%. Nach diesem Zeitpunkt steigt die Sauerstoffkonzentration in der Abklingphase des Brandes wieder an.

Die Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Flur zeigt Bild 13.2. Nach ca. 14 min ist anhand der Videoaufnahmen eine leichte Rauchentwicklung im Flur erkennbar. Dieses steht im Einklang mit der Abnahme der Sauerstoffkonzentration bzw. Zunahme der Kohlendioxidkonzentration im Flur. Der Wert der Kohlenmonoxidkonzentration ist unbedeutend. Die Sauerstoffkonzentration erreicht nach ca. 19 min ein Minimum von ca. 18,5 Vol.%, die Kohlendioxidkonzentration ein Maximum von 2 Vol.%.

7.2 VERSUCH 2

Bei dem Versuch 2 wurde eine Wärmeschutzverglasung in einem PVC-Rahmen in die Fensteröffnung des Brandraumes eingesetzt.

Tabelle 7 gibt den Ablauf dieses Versuches wieder.

Bild 14 zeigt die Temperaturen im Brandraum. Man erkennt, daß im Gegensatz zu Versuch 1, die Temperatur unter der Decke TB2 nach ca. 9 Minuten wieder abfällt. Dies ist auf Luftmangel im Brandraum zurückzuführen, da zunächst die Brandraumtür und Flurtür geschlossen waren. Erst das Öffnen von Brandraum- und Flurtür führten in der Brandentwicklungsphase zu einer ausreichenden Luftzufuhr. Die höchste Temperatur, die im Brandraum auftritt, beträgt ca. 700°C.

Bild 15 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im Fensterbereich. Das erste knallartige Geräusch im Fensterbereich tritt nach 21 min 13 s auf. Zum Zeitpunkt der 1. Flammen aus dem oberen Fensterrahmen (22 min 28 s) ergeben sich folgende Temperaturen

im Bereich des Brandraumfensters:

TBFi (Brandraum, Fenster innen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze zu Beginn des Versuches in kleiner Bohrung im Rahmen direkt neben dem Glas):	ca. 750°C
TBFa (Zwischenfassadenbereich, Fenster, außen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze zu Beginn des Versuches in kleiner Bohrung im Rahmen direkt neben dem Glas)	ca. 250°C
TBF2 (Brandraum, Fenster, innen, 5 cm unter Oberkante des Rahmens, 5 cm entfernt vom rechten Rahmen)	ca. 750°C
TZ3 (Zwischenfassadenbereich, Fensterscheibenoberfläche, zentral)	ca. 200°C

Nach 22 min 41 s fallen erste Scheibenstücke in den Zwischenfassadenbereich.

Die höchste Temperatur, die während des Versuches gemessen wurde, tritt an der Meßstelle TBFa nach ca. 26 min auf und beträgt ca. 1050°C. Diese Temperatur im Fensterbereich liegt somit um ca. 350°C über der maximalen Brandraumtemperatur TB2.

Bei dem Versuch konnte festgestellt werden, daß sowohl Glasteile in den Brandraum als auch in den Zwischenfassadenbereich fallen. Im Brandraum fanden sich relativ große Mengen von Glasschmelze auf der Plattform der Brandlastpalette. Das nach 23 min 16 s in den Zwischenfassadenbereich kippende große Glasstück (Foto 3, Zeitpunkt: 23 min 55 s) bestätigt die Aussage von Seidel und Kiefer /6/, daß die Scheiben im Brandfall durch die auftretenden Spannungen aus dem Rahmen "herausgeschnitten" werden können.

Die Temperatur am "oberen Fenster" TOR1 weist bei diesem Versuch nach ca. 25 min eine maximale Temperatur von ca. 600°C auf.

Die Bilder 16 und 17 zeigen die Temperaturen im Zwischenfassadenbereich (TZ1 bis TZ10) in einem Abstand von 0,2 m von der

Innenfassade sowie die Temperatur TZ3.1 an der inneren Oberfläche der Außenfassade. An der Außenfassade tritt eine maximale Temperatur von knapp über 600°C auf. Auch bei diesem Versuch erkennt man, daß die höchsten Temperaturen in der Mitte der Fassade auftreten. An der Meßstelle TZ9 (obere Fassadenkante) tritt eine maximale Temperatur von ca. 500°C auf. Im Bereich der vertikalen Abschottung im Randbereich tritt kurzfristig eine maximale Temperatur von ca. 250°C an der Temperaturmeßstelle TZ8 auf. Die übrigen Temperaturen im Bereich der vertikalen Abschottung liegen unter 100°C. Bei diesem Versuch treten nach ca. 24 min 3 s Flammen über der Fassadenoberkante auf.

Bild 18 zeigt die Temperature im Flur. Durch die zeitweise geöffnete Brandraumtür treten hier höhere Temperaturen als bei **Versuch 1** auf. Es wurde hier eine maximale Temperatur von ca. 350°C gemessen.

Bild 19 zeigt die Temperaturen im Nebenraum. Diese liegen unter 100°C.

Bild 20 zeigt ausgewählte Temperaturen aus dem **Brandraum, Fenster- und Zwischenfassadenbereich** im Vergleich.

Bild 21 zeigt den zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung im **Brandraum**. Es tritt eine maximale Wärmefreisetzung von ca. 1,35 MW nach ca. 27 min auf. Der Kurvenverlauf zu Beginn des Versuches zeigt den Einfluß des unzureichenden Luftangebotes im Brandraum. Erst das Öffnen der Türen führt bei intaktem Fensterglas zu einer ansteigenden Wärmefreisetzung. Der steile Kurvenanstieg bis zum Maximum tritt während des Versagens des Fensters auf, wobei sich gezeigt hat, daß zunächst der PVC-Rahmen schmilzt, bevor das Glas zerspringt.

Bild 22 zeigt die Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im **Brandraum**. Am Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Brandraum kann man das Öffnen und Schließen der Türen sowie das Versagen des Brandraumfensters verfolgen (s.a.

Tabelle 7).

Bild 23 zeigt den zeitlichen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit der Luft in der **Zuluftöffnung der Außenfassade**. Bei Versagen des Brandraumfensters steigt die Geschwindigkeit von ca. 0,2 m/s relativ schnell auf ca. 2 m/s an und fällt dann in der Abklingphase des Brandes wieder ab.

Die Gaskonzentrationen im Flur konnten wegen Ausfall des Meßsystems bei diesem und dem nachfolgenden Versuch nicht gemessen werden.

7.3 VERSUCH 3

Bei **Versuch 3** wurde wie bei **Versuch 2** eine Wärmeschutzverglasung in einem PVC-Rahmen in die Fensteröffnung des Brandraumes eingesetzt. Gegenüber **Versuch 2** wurde aus Gründen unzureichender Ventilationsöffnungen in der Brandentwicklungsphase auf den Einbau einer Brandraumtür verzichtet. Weiterhin wurde gegenüber **Versuch 2** die Abluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches nach **Bild 1** und **Tabelle 5** durch Stahlblech verkleinert.

Tabelle 8 gibt den Ablauf dieses Versuches wieder.

Bild 24 zeigt wiederum den zeitlichen Verlauf der Temperaturen im **Brandraum**. Die maximale Temperatur im Brandraum **TB2** beträgt ca. 670°C.

Bild 25 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im **Fensterbereich**. Das erste knallartige Geräusch im Fensterbereich tritt nach 6 min 15 s auf. Zum Zeitpunkt der 1. Flammen aus dem oberen Bereich des Fensterrahmens (16 min 01 s) ergeben sich folgende Temperaturen im Bereich des Brandraumfensters:

TBFi (Brandraum, Fenster innen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze zu Beginn des Versuches in kleiner Bohrung im Rahmen direkt

neben dem Glas):	ca. 700°C
TBFa (Zwischenfassadenbereich, Fenster, außen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze zu Beginn des Versuches in kleiner Bohrung im Rahmen direkt neben dem Glas)	ca. 100°C
TBF2 (Brandraum, Fenster, innen, 5 cm unter Oberkante des Rahmens, 5 cm entfernt vom rechten Rahmen)	ca. 650°C
TZ3 (Zwischenfassadenbereich, Fensterscheibenoberfläche, zentral)	ca. 150°C

Nach 15 min 56 s fallen erste Scheibenstücke in den Zwischenfassadenbereich. **Foto 4** zeigt den Brand im Zwischenfassadenbereich nach 22 min 56 s.

Die höchste Temperatur, die während des Versuches gemessen wurde, tritt an der Meßstelle **TBFa** nach ca. 22 min auf und beträgt ca. 930°C. Diese Temperatur im Fensterbereich liegt somit um ca. 260°C über der maximalen Brandraumtemperatur **TB2**.

Die Temperatur am "oberen Fenster" **TOR1** weist bei diesem Versuch nach ca. 22 min eine maximale Temperatur von 580°C auf.

Bei dem Versuch konnte ebenfalls festgestellt werden, daß sowohl Glasteile in den Brandraum als auch in den Zwischenfassadenbereich fallen.

Die **Bilder 26** und **27** zeigen die Temperaturen im **Zwischenfassadenbereich** (**TZ1** bis **TZ10**) in einem Abstand von 0,2 m von der Innenfassade sowie die Temperatur **TZ3.1** an der inneren Oberfläche Außenfassade. An der Außenfassade tritt eine maximale Temperatur von nahezu 600°C auf. Auch hier erkennt man, daß die höchsten Temperaturen in der Mitte der Fassade auftreten. Es ergeben sich jedoch im Bereich der vertikalen Abschottung höhere Temperaturen als bei **Versuch 2**. Dies wird am deutlichsten bei Temperaturmeßstelle **TZ8** und **TZ10** (jeweils etwas über 400°C). Durch die Verkleinerung der Abluftöffnung ergibt sich im Prinzip eine horizontale Abschottung. Dies führt zu einem Aufstauen der Rauchgase

und zu einer stärkeren Ausbreitung der Flammen- und Rauchgase in horizontaler Richtung. An der Meßstelle **TZ9** (Fassadenoberkante) tritt eine maximale Temperatur von ca. 600°C auf.

Bei diesem Versuch konnten keine Flammen über der Fassadenoberkante beobachtet werden.

Die Temperaturen im Flur (**Bild 28**) und Nebenraum (**Bild 29**) bei **Versuch 3** liegen auf dem Niveau der Temperaturen von **Versuch 2**.

Bild 30 zeigt ausgewählte Temperaturen aus dem Brandraum, Fenster- und Zwischenfassadenbereich im Vergleich.

Bild 31 zeigt den zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung im **Brandraum**. Es tritt eine maximale Wärmefreisetzung von ca. 1,25 MW nach ca. 23 min auf. Der Kurvenverlauf zu Beginn des Versuches zeigt den Einfluß des unzureichenden Luftangebotes im Brandraum, da zu Beginn des Versuches die Flurtür geschlossen war. Erst das Öffnen der Türen führt bei intaktem Fensterglas zu einer ansteigenden Wärmefreisetzung. Der steile Kurvenanstieg bis zum Maximum tritt während des Versagens des Fensters auf, wobei sich gezeigt hat, daß zunächst der PVC-Rahmen schmilzt, bevor das Glas zerspringt.

Bild 32 zeigt die Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im **Brandraum**.

Bild 33 zeigt den zeitlichen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit der Luft in der **Zuluftöffnung der Außenfassade**. Bei Versagen des Brandraumfensters steigt die Geschwindigkeit von ca. 0,25 m/s relativ schnell auf ca. 1,4 m/s an und fällt dann in der Abklingphase des Brandes wieder ab. Diese, gegenüber **Versuch 2** kleinere Strömungsgeschwindigkeit ist auf die Verkleinerung der Abluftöffnung bei **Versuch 3** zurückzuführen zu sein.

7.4 VERGLEICH DER BEI DEN 3 VERSUCHEN ERMITTELTEN MESSWERTEN

In den Bildern 34 bis 64 sind die einzelnen Meßwerte der 3 Versuche zum Vergleich in jeweils einem Diagramm dargestellt.

Man erkennt, daß bei offener Fensteröffnung (**Versuch 1**) und geschlossener Brandraumtür relativ schnell hohe Temperaturen im Brandraum (**Bild 34, 35, 36**), im Fensterbereich (**Bild 37, 39, 40**) und im Zwischenfassadenbereich (**Bild 43, 44, 45, 48, 50**) auftreten. Dies ist auch bei teilweise geöffneten Fenstern der Innenfassade zu vermuten. Bei geöffneten Brandraumtüren ergeben sich entsprechend höhere Temperaturen im angrenzenden Flur (**Bild 52, 53, 54, 55, 56**). Die Abbrandrate bzw. der freigesetzte Wärmestrom (**Bild 60**) nimmt ebenfalls bei geöffnetem Fenster schneller seinen Maximalwert an. Zeitlich liegen die Werte für Temperatur, Wärmefreisetzung und Gaskonzentration bei **Versuch 3** zwischen denen von **Versuch 1** und **Versuch 2**. Dies liegt daran, daß bei **Versuch 3** die Flurtür früher geöffnet wurde als bei **Versuch 2** und damit für die Brandentwicklung günstigere Ventilationsbedingungen vorlagen.

Allgemein kann man sagen, daß die meisten Diagrammkurven beim Vergleich der 3 Versuche ähnlich verlaufen, jedoch zeitlich, u.a. aufgrund unterschiedlicher Ventilationsbedingungen, verschoben sind.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Anhand einer Auswertung der allgemein zugänglichen Literatur über die Brand- und Rauchausbreitung sowie den Brandschutz in Gebäuden mit Doppelfassaden wurden die Einflußgrößen zu dieser Problematik zusammengestellt.

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.

Gemessen wurden die zeitlichen Verläufe von Wärmefreisetzung, Temperaturen, Strömungsgeschwindigkeit und Gaskonzentrationen bei unterschiedlichen Versuchsparametern.

Bei den Versuchen hat sich gezeigt, daß die Brandentwicklung in entscheidendem Maße von den Ventilationsöffnungen abhängt. Weiterhin hat der Abstand zwischen Innen- und Außenfassade einen erheblichen Einfluß auf die Temperaturen im Zwischenfassadenbereich.

Bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen mit einer vertikalen Abschottung im Randbereich der Fassade traten im Fensterbereich des Brandraumes wesentlich höhere Temperaturen (ca. 1000°C) als im Brandraum (ca. 700°C) selbst auf. An einem durch eine Wand angedeuteten Stockwerk auf dem Brandraum traten an der Innenfassade Temperaturen bis knapp über 600°C auf. An der Außenfassade gegenüber dem Brandraumfenster entstanden ebenfalls Temperaturen von 600°C.

Es hat sich gezeigt, daß Wärmeschutzglasfenster relativ lange einer Brandbelastung standhalten.

Bei Versagen der Fenster fallen Scheibenstücke in den Brandraum

und in den Zwischenfassadenbereich.

Es hat sich weiterhin gezeigt, daß eine horizontale Abschottung im Zwischenfassadenbereich (hier durch Verkleinerung der Abluftöffnung) zu einer verstärkten horizontalen Rauch- und Brandausbreitung führt.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Klingsch, W.: Brandschutztechnische Beurteilung von Doppelfassaden.
vfdb Jahresfachtagung, Frankfurt/Main 1995
- /2/ Greven, H. Doppelfassaden aus Glas, ein brandschutz-
Schlich, C.: technisches Problem ?
Abschnittsarbeit bei der Berufsfeuerwehr
Düsseldorf, Oktober 1993
- /3/ Siegfried, W.: Brandschutz bei Doppelfassaden, neue
Erkenntnisse und Auslegungskonzepte.
Weiterbildungsseminar "Brandschutz bei
Sonderbauten", Braunschweig 1994,
S. 165 - 184
- /4/ Kordina, K. Brandversuche Lehrte
Jeschar, R. Schriftenreihe "Bau und Wohnforschung"
Bechthold, R. des Bundesministers für Raumordnung,
Ehlert, K.-P. Bauwesen und Städtebau, Nr. 04.037,
Wesche J.: Bonn-Bad Godesberg 1978
- /5/ Siegfried, W.: Doppelfassaden - Brandversuche und Analysen.
vfdb Jahresfachtagung, Frankfurt/Main 1995,
6S. 219 - S.239
- /6/ Seidel, H. Das Verhalten von Verglasungen im Normbrand
Kiefer, W.: (ETK) nach DIN 4102 und Verbesserung des
baulichen Brandschutzes von Brandschutzver-
glasungen.
VFDB-Zeitschrift, 4, 1977, S. 107-116
- /7/ Walther, E.: Technische Formeln für die Praxis
VEB Fachbuchverlag, 28. Auflage, Leipzig
1989
- /8/ Schiefer, K.: Verfahrenstechnik
Lueger Lexikon der Technik, Band 3
Rowohlt Verlag, Hamburg, 1972
- /9/ Flachglas AG Das Glas-Handbuch
Gelsenkirchen, 1996
- /10/ Würtemberger, Tabellenbuch Metall
G.: Europa - Lehrmittel Verlag
Haan 1987
- /11/ Promat GmbH: Bautechnischer Brandschutz
Ratingen 1995
- /12/ Gröber, Erk, Die Grundgesetze der Wärmeübertragung
Grigull: Springer - Verlag, 3. Auflage,
Berlin 1963

10. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1: Konstruktive Einflußgrößen auf die Brand- und Rauchausbreitung sowie die Feuerwiderstandsfähigkeit bei Gebäuden mit Doppelfassaden

- | |
|--|
| <p>* Außenfassade:</p> <ul style="list-style-type: none">- Abstand von der Innenfassade (0,2 m bis 2 m)- Brandverhalten der Bauteile- Glasart z.B. Einscheiben-Sicherheitsglas- Konstruktiver Aufbau und Befestigung der Außenfassade- Haltekonstruktion für Glasscheiben- Größe der Glasscheiben- Be- und Entlüftungsöffnungen z.B. Lüftungsschlitze |
| <p>* Innenfassade:</p> <ul style="list-style-type: none">- Brandverhalten der Bauteile- Größe der Fenster- Glasart z.B. unterschiedliche Isolierverglasungen- Haltekonstruktion für Glasscheiben- Öffenbarkeit der Fenster (Be- und Entlüftung der Räume: z.B. Kipp- oder Drehflügel Fenster, Lüftungsklappen) |
| <p>* Zwischenfassadenbereich:</p> <p>Abschottung:</p> <ul style="list-style-type: none">- keine- nur horizontale Abschottung- nur vertikale Abschottung- horizontale und vertikale Abschottung- Größe der abgeschotteten Bereiche (z.B. bei horizontaler Abschottung geschoßweise oder über mehrere Geschosse oder Abschottung auf jeweils einen Raum begrenzt)- Brandverhalten der Abschottungen <p>Be- und Entlüftung des Zwischenfassadenbereiches
Beschattung z.B. durch Jalousie</p> |
| <p>* Sonstige Einflußgrößen:</p> <ul style="list-style-type: none">- Gebäudenutzung (Brandbelastung)- Raum- und Fenstergeometrie- Gebäudehöhe- Feuerüberschlagsweg- Änderung der Ventilationsbedingungen im Raum z.B. durch Türöffnungen- Einsatz von Sprinkleranlagen oder Wassernebellöschanlagen im Raum- Einsatz von Sprinkleranlagen oder Wassernebellöschanlagen im Zwischenfassadenbereich- Automatische Brandfrüherkennung im Zwischenfassadenbereich- Automatische Brandfrüherkennung in den Räumen- Zusätzliche Maßnahmen zur Aktivierung der Zwischenfassadenventilation (z.B. maschinelle Be- und Entlüftung)- Einfluß von Wind auf die Strömung im Zwischenfassadenbereich |

Tabelle 2: Stoffwerte zur Wärmeübertragung

Medium	α_i W/m ² K	α_e W/m ² K	s_i m	λ_i W/mK	ρ kg/m ³	c kJ/kgK
Luft an Innenwand	8					
Strömende Gase (Luft, Rauchgase)	12 - 120					
Luft und Gase bei freier Strömung	4 - 18					
Luft an Außenwand ohne Wind schwacher Wind bei Stürmen		8 30 bis zu 100				
ESG			0,008	0,8 (bei 20°C)	2500	0,75 (20°C)
Stahl, unlegiert			0,001	53 (bei 20°C)	7850	0,49 (0 - 100°C)
PROMATECT ^R -L			0,02	0,083	450	0,8439 (bei 100°C)

**Tabelle 3: Heizwerte und Einzelmassen des Brandgutes
(1 Brandlastpalette)**

Stoff	Heizwert H_u MJ/kg	Masse kg	Massenanteil
Holz ¹	16	152,1	0,912
Styropor (PS 15 SE)	40	3,2	0,019
Linoleum	19	8,8	0,053
Nadelfilz (Polypropylen)	43	1,1	0,007
Vorhang 50 % Baumwolle 50 % Polyester	20	1,1	0,007
Brennspiritus	25	0,4 (0,5l)	0,002
Mittlerer Heizwert bzw. Summe	16,9	166,7	1

¹ Holzfeuchte zwischen 7% und 8,5 %

Tabelle 4: Meßstellenstellenliste

Meßstellen- bezeichnung	Versuchs- Nr.	Position der Meßstellen
ΔM	1,2	Abbrandwaage - Brandraumboden
O ₂ B	1,2,3	Brandraum - Sauerstoffkonzentration, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
CO ₂ B	1,2,3	Brandraum - Kohlendioxidkonzentration, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
COB	1,2,3	Brandraum - Kohlenmonoxidkonzentration, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
O ₂ F	1	Flur - Sauerstoffkonzentration, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
CO ₂ F	1	Flur - Kohlendioxidkonzentration, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
COF	1	Flur - Kohlenmonoxidkonzentration, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
V _{Luft,ein}	2,3	Flügelradanemometer, zentral im Spalt zwischen Unterkante Außenfassade und Hallenboden
		Temperaturmeßstellen
TB0	1,2,3	Unterseite eines Stahlträgers oberhalb der Brandraumdecke (Silikat-Brand- schutzbauplatte)
TB1	1,2,3	Brandraum, zentral im Raum in 1,5m Höhe
TB2	1,2,3	Brandraum, zentral im Raum 5 cm unter der Decke
TB3	1,2,3	Brandraum, Oberkante Tür, Mitte
TBF1	1	Brandraum, Fensteröffnung, 5 cm unter Oberkante des Rahmens, Mitte
TBF2	1	Brandraum, Fensteröffnung, 5 cm unter Oberkante des Rahmens, 5 cm entfernt vom rechten ² Rahmen
TBF2	2,3	Brandraum, Fenster, innen, 5 cm unter Oberkante des Rahmens, 5 cm entfernt vom rechten ¹ Rahmen

² Blick von der Außenfassade auf den Brandraum

zu Tabelle 4		
TBFi	2,3	Brandraum, Fenster, innen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze in kleiner Bohrung im Rahmen direkt neben dem Glas
TBFa	2,3	Zwischenfassadenbereich, Fenster, außen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze in kleiner Bohrung im Rahmen direkt neben dem Glas
TOR1	1,2,3	Zwischenfassadenbereich, Mitte der oberen, durch Silikat-Brandschutzbauplatte verschlossenen Fensteröffnung, Oberfläche der Innenfassade
TZ1	1,2,3	Temperatur an Zuluftöffnung (Umgebungstemperatur), Mitte der Außenfassade im Bereich des Flügelradanemometers
TZ2	1,2,3	Zwischenfassadenbereich, Unterkante des Brandraumfensters, Mitte, 20 cm vor Innenfassade
TZ3	1	Zwischenfassadenbereich, Brandraumfensteröffnung zentral, 20 cm vor Innenfassade
TZ3	2,3	Zwischenfassadenbereich, Fensterscheibenoberfläche, zentral
TZ3.1	1,2,3	Zwischenfassadenbereich, Außenfassadenoberfläche, Höhe von TZ3
TZ4	1,2,3	Zwischenfassadenbereich, Oberkante des Brandraumfensterrahmens, Mitte, 20 cm vor Innenfassade
TZ5	1,2,3	Zwischenfassadenbereich, Oberkante des Brandraumfensters, links ³ , 10 cm vor vertikaler Abschottung, 20 cm vor Innenfassade
TZ6	1,2,3	Zwischenfassadenbereich, Oberkante des Brandraumfensters, rechts ² , 10 cm vor vertikaler Abschottung, 20 cm vor Innenfassade
TZ7	1,2,3	Zwischenfassadenbereich, Unterkante des "oberen Fensters" (s.Bem. TOR1), Mitte, 20 cm vor Innenfassade
TZ8	1,2,3	Zwischenfassadenbereich, Oberkante der Außenfassade, links ² , 10 cm vor vertikaler Abschottung, 20 cm vor Innenfassade

³ Blick von der Außenfassade auf den Brandraum

zu Tabelle 4		
TZ9	1,2,3	Zwischenfassadenbereich, Oberkante der Außenfassade, Mitte, 20 cm vor Innenfassade
TZ10	1,2,3	Zwischenfassadenbereich, Oberkante der Außenfassade, rechts ² , 10 cm vor vertikaler Abschottung, 20 cm vor Innenfassade
TF1	1,2,3	Flur, Brandraumtür, Mitte, Höhe 1,5 m
TF2	1,2,3	Flur, zentral im Raum, 5 cm unter der Decke
TF3	1,2,3	Flur, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
TF4	1,2,3	Flur, Tür zur Halle, Oberkante, Mitte
TF5	1,2,3	Flur, Tür zum Nebenraum, Oberkante, Mitte
TN1	1,2,3	Nebenraum, Tür, Mitte, Höhe 1,5 m
TN2	1,2,3	Nebenraum, zentral im Raum, 5 cm unter der Decke
TN3	1,2,3	Nebenraum, zentral im Raum, Höhe 1,5 m

Tabelle 5: Versuchsaufbauten und Versuchsparameter

Versuch	Brandraum	Innenfassade	Zwischenfassadenbereich	Außenfassade
1	1 Brandlastpalette, 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) gemäß Tabelle 6 zum Versuchsablauf	Fensteröffnung ohne Verglasung (Höhe: 1380mm, Breite: 1080mm (1,49m ²)) 2. Geschoß durch fassadenseitige Wand angedeutet	vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandenschutzbauplatten	Abstand: 0,2m; 0,5m; 1,0m; 1,5m; 2,0m Material: Silikat-Brandenschutzbauplatten, Zuluftöffnung: 0,5m * 5m (2,5m ²) Abluftöffnung: 5m * Fassadenabstand (1m ² - 10m ²)
2	1 Brandlastpalette, 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) gemäß Tabelle 7 zum Versuchsablauf	PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum, geschlossen (4-16-4, k=1,5 W/m ² K, (Rahmen:Höhe:1350mm, Breite:1050mm (1,42m ²); Glas:Höhe:1160mm, Breite:860mm (1m ²)) 2. Geschoß durch fassadenseitige Wand angedeutet	vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandenschutzbauplatten	Abstand: 0,5m Material: Silikat-Brandenschutzbauplatten Zuluftöffnung: 0,125m * 5m (0,625m ²) Abluftöffnung: 0,5m * 5m (2,5m ²)
3	1 Brandlastpalette, Ansaugung von Verbrennungsluft über Ventilationsöffnungen (Türen und Fenster) sowie über den Spalt zwischen Plattform der Abbrandwaage und Brandraumwänden, Brandraamtür (1985mm * 985mm) geöffnet, Öffnungszeit der Flurtür gemäß Tabelle 8 zum Versuchsablauf	PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum, geschlossen, (4-16-4, k=1,5 W/m ² K, Rahmen:Höhe:1350mm, Breite:1050mm (1,42m ²); Glas:Höhe:1160mm, Breite:860mm (1m ²)) 2. Geschoß durch fassadenseitige Wand angedeutet	vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandenschutzbauplatten	Abstand: 0,5m Material: Silikat-Brandenschutzbauplatten Zuluftöffnung: 0,125m * 5m (0,625m ²) Abluftöffnung: 0,125m * 5m (0,625m ²) (Verkleinerung der Öffnung durch Stahlblech)

Tabelle 6: Versuch 1 - Versuchsablauf

Versuchszeit min : s	Abstand m	Bemerkungen
0 : 0	2,0	Zündung Tür des Nebenraumes ist geschlossen
0 : 51	"	leichte Rauchentwicklung im Zwischenfas- sadenbereich
1 : 55	"	Tür des Brandraumes wird geschlossen
7 : 18	"	1. Flammen aus Fensteröffnung, horizon- tale Flammenlänge ca. 0,30 m, Rauch- strömung wird durch Außenfassade nur leicht beeinflusst, schwarze Rauchent- wicklung
9 : 30	"	Horizontale Flammenlänge ca. 0,50 m
10 : 10	"	Horizontale Flammenlänge ca. 1,00 m starke Rauchentwicklung im Zwischenfas- sadenbereich, unterhalb der Fensteröff- nung kein Rauch, Flammen schlagen ca. 0,35 m - 0,5 m über der Unterkante der Fensteröffnung in den Zwischenfassaden- bereich
10 : 48	"	Horizontale Flammenlänge ca. 1,5 m
11 : 19	"	Tür des Flures wird geschlossen
12 : 46	2,0=>0,5	Beginn des Verfahrens der Außenfassade auf 0,5 m
13 : 55	0,5	0,5 m Abstand erreicht, Flammen schlagen ca. 0,35 m - 0,5 m über der Unterkante der Fensteröffnung in den Zwischenfassa- denbereich, Flammen liegen an Außenfassa- de an, leichte Wirbelbildung der Rau- chgase unterhalb der Flammenzone an Au- ßenfassade
14 : 09	"	ca. 0,3 m - 0,5 m hohe Flammen über der Oberkante der Fassade (5,78 m)
14 : 19	"	leichte Rauchentwicklung im Flur
16 : 24	0,5=>1,0	Beginn des Verfahrens der Außenfassade auf 1,0 m
16 : 38	1,0	1,0 m Abstand erreicht, Flammen errei- chen gerade noch die Außenfassade, keine Flammen mehr über der Oberkante der Fassade
19 : 11	1,0=>1,5	Beginn des Verfahrens der Außenfassade auf 1,5 m

zu Tabelle 6		
19 : 24	1,5	1,5 m Abstand erreicht, Flammen erreichen Außenfassade nicht mehr, horizontale Flammenlänge ca. 0,7 m - 1,0 m
22 : 33	1,5=>0,2	Beginn des Verfahrens der Außenfassade auf 0,2 m
23 : 56	0,2	0,2 m Abstand erreicht, geringe Flammenentwicklung aus dem Brandraum
26 : 21	0,2=>2,0	Zurückfahren der Fassade
ca. 50		Entzündung der Brandraumtür

Tabelle 7: Versuch 2 - Versuchsablauf

Versuchszeit min : s	Abstand m	Bemerkungen
0 : 00	0,5	Zündung Tür des Nebenraumes ist geschlossen
0 : 49	"	Tür des Brandraumes wird geschlossen
1 : 11	"	Tür des Flures wird geschlossen
4 : 25	"	Erster Rauchaustritt an der Unterkante des Fensters (Fensterrahmen)
4 : 46	"	Erster Rauch an Oberkante des Fensters (Fensterrahmen)
6 : 07	"	Stärkerer Rauchaustritt an Oberkante des Fensters
6 : 40	"	Stärkerer Rauchaustritt an Unterkante des Fensters, Rauch dringt durch undichte Mauerfugen unterhalb des Fensters und aus dem Mauerdurchlaß für die Träger der Abbrandwaage am Boden des Brandraumes (=> Brandraum vollständig verraucht)
6 : 59	"	Rauchaustritt seitlich am Fensterrahmen
9 : 10	"	Abnehmender Rauchaustritt in Zwischenfassadenbereich
ca.10 : 00	"	Flur beginnt zu verrauchen
13 : 00	"	Beobachtungsfenster verrußt, Türkonturen des Brandraumes nicht mehr erkennbar
13 : 37	"	Geringer Rauchaustritt in den Zwischenfassadenbereich
16 : 00	"	Tür des Flures wird geöffnet
16 : 10	"	Tür des Flures wird geschlossen
16 : 50	"	Tür des Flures wird geöffnet
17 : 11	"	Tür des Brandraumes wird geöffnet
17 : 16	"	Tür des Flures wird geschlossen
17 : 32	"	Geringer Rauchaustritt in den Zwischenfassadenbereich
17 : 45	"	Etwas stärkerer Rauchaustritt in den Zwischenfassadenbereich
19 : 23	"	Erster Rauchaustritt oben an der Fassadenöffnung
19 : 40	"	Stärkere Rauchentwicklung oben an der Fassadenöffnung

zu Tabelle 7		
21 : 13	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
21 : 43	"	Tür des Flures wird geöffnet
22 : 05	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
22 : 18	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
22 : 28	"	Erste Flammen aus oberem Fensterrahmen
22 : 41	"	Erste kleinere Scheibenstücke fallen in den Zwischenfassadenbereich
22 : 43	"	Flammen bedecken fast die gesamte Öffnungsfläche des Fensters, im unteren Bereich verbleibt ein Spalt von ca. 10 cm
22 : 50	"	Tür des Flures wird geschlossen, Flammenspitzen erreichen die Außenfassade
23 : 11	"	Weitere Scheibenstücke fallen in den Zwischenfassadenbereich
23 : 16	"	Großes Scheibenstück beginnt in den Zwischenfassadenbereich zu kippen
23 : 22	"	Scheibenstück kippt weiter
23 : 25	"	Außenfassade wird im Fensterbereich voll beflammt
23 : 46	"	Scheibenstück kippt bis Außenfassade Flammen bedecken ca. 3/4 der oberen Fensterfläche, oberhalb des Scheibenstückes wesentlich stärkere Flammenentwicklung
24 : 03	"	Erste Flammen oberhalb der Fassade, Flammenlänge ab Fassadenoberkante ca. 0,5 m (stark ver Raucht)
24 : 09	"	Kleinere Scheibenstücke fallen in den Zwischenfassadenbereich
24 : 36	"	Das sich an der Außenfassade abstützende Scheibenstück rutscht nach innen in den Brandraum
24 : 40	"	Dichter schwarzer Rauch ca. 0,5 m über der Fensterunterkante im Bereich der Außenfassade mit Wirbelbildung
25 : 00 bis 26 : 14	"	Stärkste Flammenentwicklung oberhalb der Fassade
27 : 30	"	Letzte Flammen oberhalb der Fassade, Flammenentwicklung im Zwischenfassadenbereich geht langsam zurück
33 : 50	"	Keine Flammen mehr aus Fensteröffnung

zu Tabelle 7		
ca. 45	"	Tür des Brandraumes brennt in der oberen Hälfte

Tabelle 8: Versuch 3 - Versuchsablauf

Versuchszeit min : s	Abstand m	Bemerkungen
0 : 00	0,5	Zündung Tür des Nebenraumes ist geschlossen Tür des Brandraumes ist geöffnet
1 : 16	"	Tür des Flures wird geschlossen
3 : 47	"	Flur beginnt zu verrauchen
4 : 07	"	Beobachtungsfenster am Flur beschlägt durch Wasser und Ruß
5 : 08	"	Leichte Rauchbildung an Oberkante des Fensterrahmens
6 : 15	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
6 : 18	"	Leichter Rauchaustritt im Bereich der Abbrandwaage
6 : 29	"	Leichter Rauchaustritt im unteren Bereich des Fensterrahmens
8 : 31	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
8 : 40	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
9 : 30	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
10 : 00	"	Abnehmende Rauchentwicklung im Fensterbe- reich
10 : 36	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
11 : 12	"	Tür des Flures wird geöffnet
11 : 35	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
11 : 38	"	Rauchsicht im Flur bis ca. 1 m über dem Boden
12 : 36	"	Tür des Flures wird geschlossen
12 : 55	"	Leichter Raucheintritt im Nebenraum
13 : 09	"	Tür des Flures wird geöffnet
13 : 31	"	Rauchsicht im Flur bis ca. 0,5 m über dem Boden
13 : 39	"	Zunehmende Rauchentwicklung im Bereich des Brandraumfensters
14 : 39	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
15 : 26	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
15 : 36	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)

zu Tabelle 8		
15 : 43	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
15 : 49	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
15 : 52	"	Knallartiges Geräusch (Sprung in Scheibe)
15 : 56	"	Kleines Scheibenstück fällt in Zwischenfassadenbereich
16 : 01	"	Scheibenstücke fallen in Zwischenfassadenbereich, Flammen im oberen Bereich des Fensterrahmens
16 : 06	"	Flammen im unteren Bereich des Fensterrahmens
16 : 14	"	Tür des Flures wird geschlossen
16 : 40	"	Flammen im Fensterbereich verschwinden wieder
16 : 46	"	Scheibenstücke fallen in Brandraum
17 : 15	"	Konturen der Tür des Nebenraumes nicht mehr erkennbar
17 : 37	"	Tür des Flures wird geöffnet
17 : 45	"	Scheibenstücke fallen in Brandraum
17 : 48	"	Scheibenstücke fallen in Brandraum
17 : 50	"	Wieder Flammen im oberen Fensterbereich
18 : 07	"	Scheibenstücke fallen in Brandraum
18 : 17	"	Scheibenstücke fallen in Zwischenfassadenbereich
18 : 33	"	Scheibenstücke fallen in Zwischenfassadenbereich
18 : 39	"	Scheibenstücke fallen in Zwischenfassadenbereich
18 : 42	"	Scheibenstücke fallen in Zwischenfassadenbereich
18 : 45	"	Horizontale Flammenlänge im Fensterbereich ca. 0,3 m
19 : 30	"	Starke Rauchentwicklung im oberen Fensterbereich
20 : 26	"	Scheibenstücke fallen in Zwischenfassadenbereich
20 : 27	"	Tür des Flures wird geschlossen
20 : 30	"	Scheibenstücke fallen in Zwischenfassadenbereich

zu Tabelle 8		
20 : 43	"	Scheibenstücke fallen in Zwischenfassadenbereich
20 : 47	"	Volle Flammenentwicklung im Bereich des Brandraumfensters, Flammen erreichen Außenfassade, Horizontale Flammenlänge ca. 0,5 m
	"	Keine Flammen oberhalb der Fassade erkennbar
21 : 41	"	Scheibenstücke fallen in Zwischenfassadenbereich
22 : 11	"	Zurückgehende Flammenentwicklung im Bereich des Brandraumfensters
35 : 19	"	Keine Flammen mehr aus Fensteröffnung

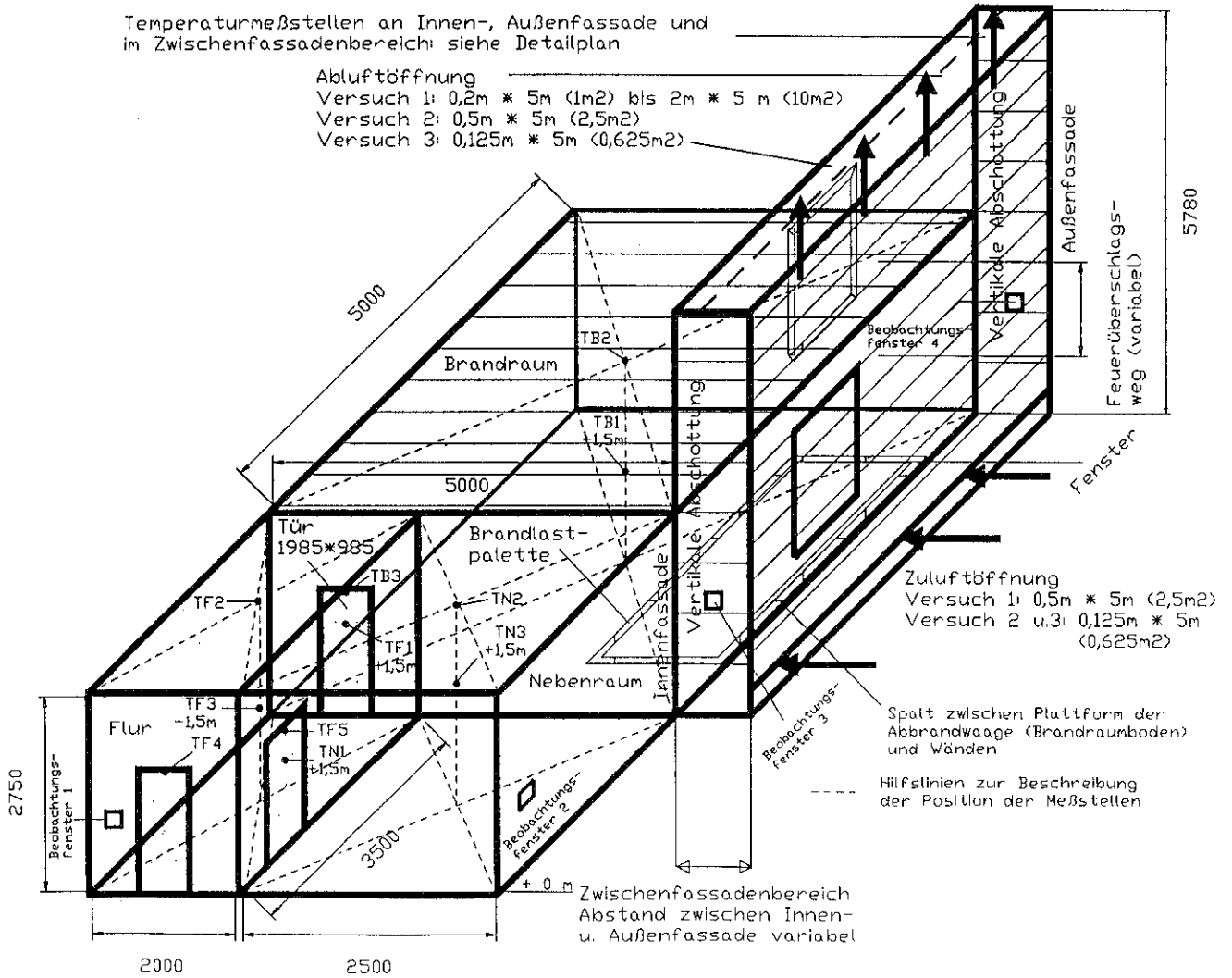
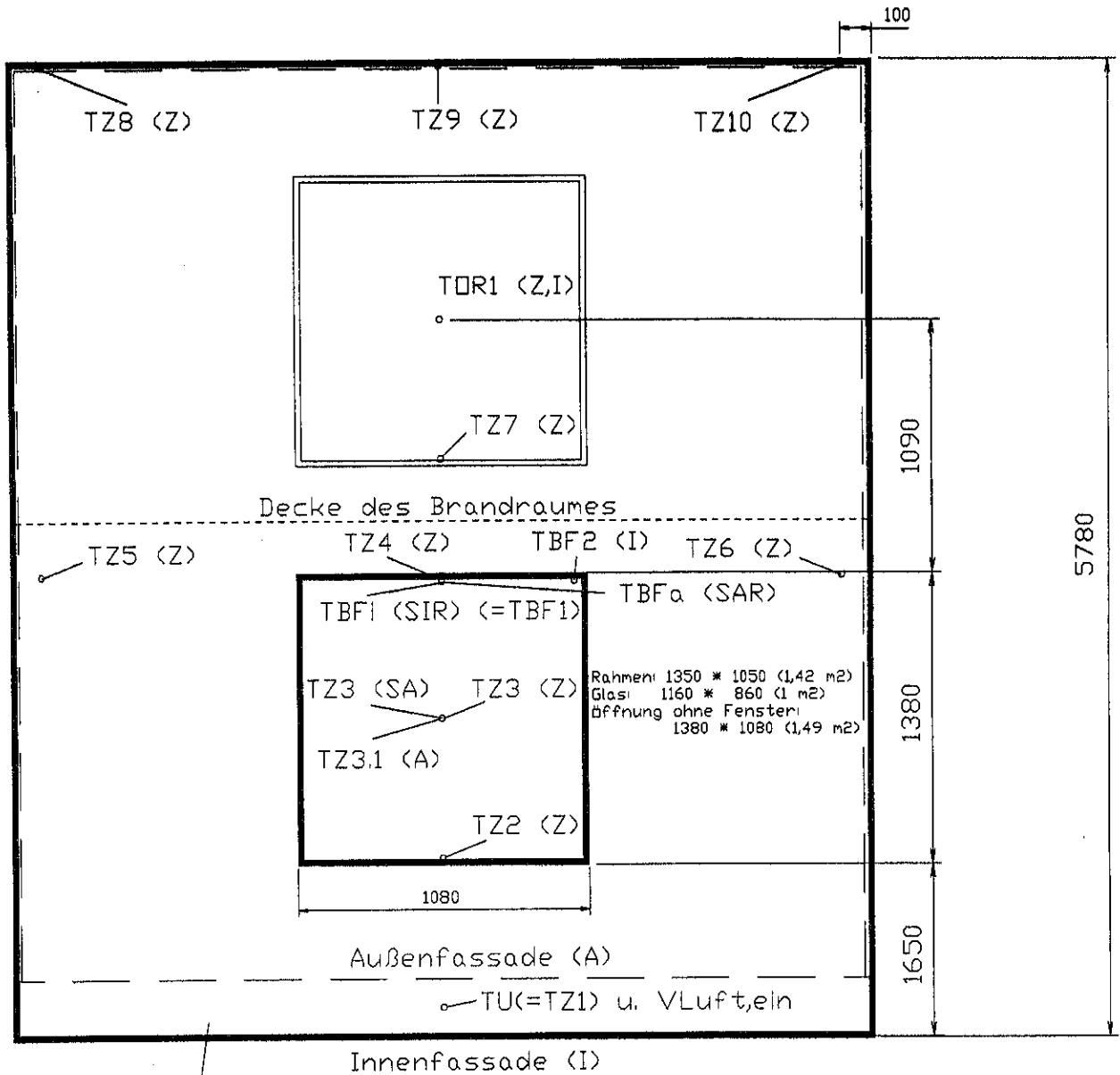


Bild 1 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus und Meßstellenplan - Gesamtdarstellung.



Zuluftöffnung
 (Versuch 1: 0,5m * 5m (2,5 m²)
 Versuch 2 u. 3: 0,125m * 5m (0,625 m²))

- Z: Zwischenfassadenbereich (Abstand der Temperaturmeßstellen von Innenfassade: 20 cm)
- 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.

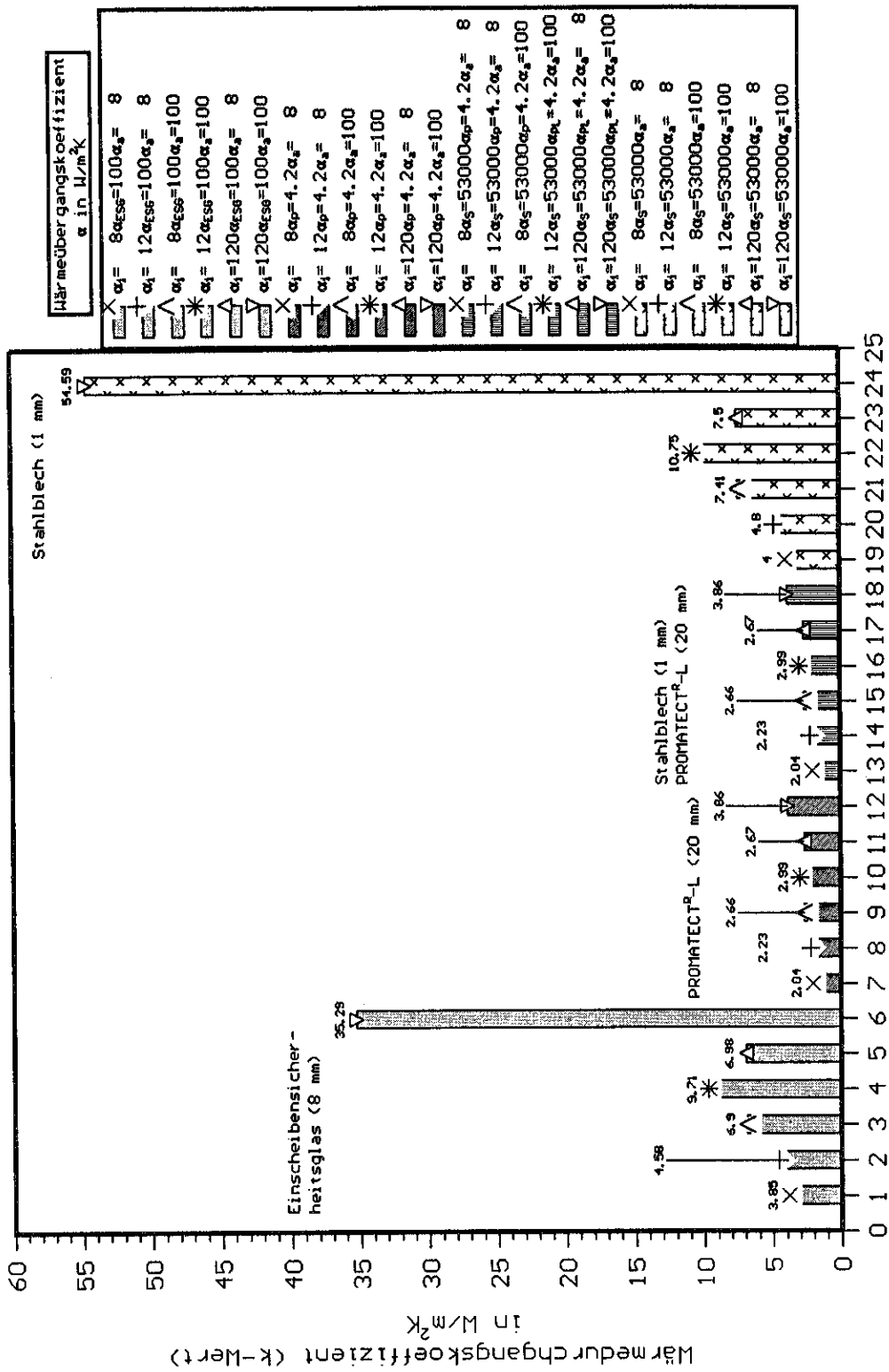


Bild 3 Wärmedurchgangskoeffizienten an der Außenfassade bei niedrigen und hohen Wärmeübergangskoeffizienten (niedrige und hohe Strömungsgeschwindigkeiten) an der inneren bzw. äußeren Oberfläche der Außenfassade (s.a. Tabelle 2).

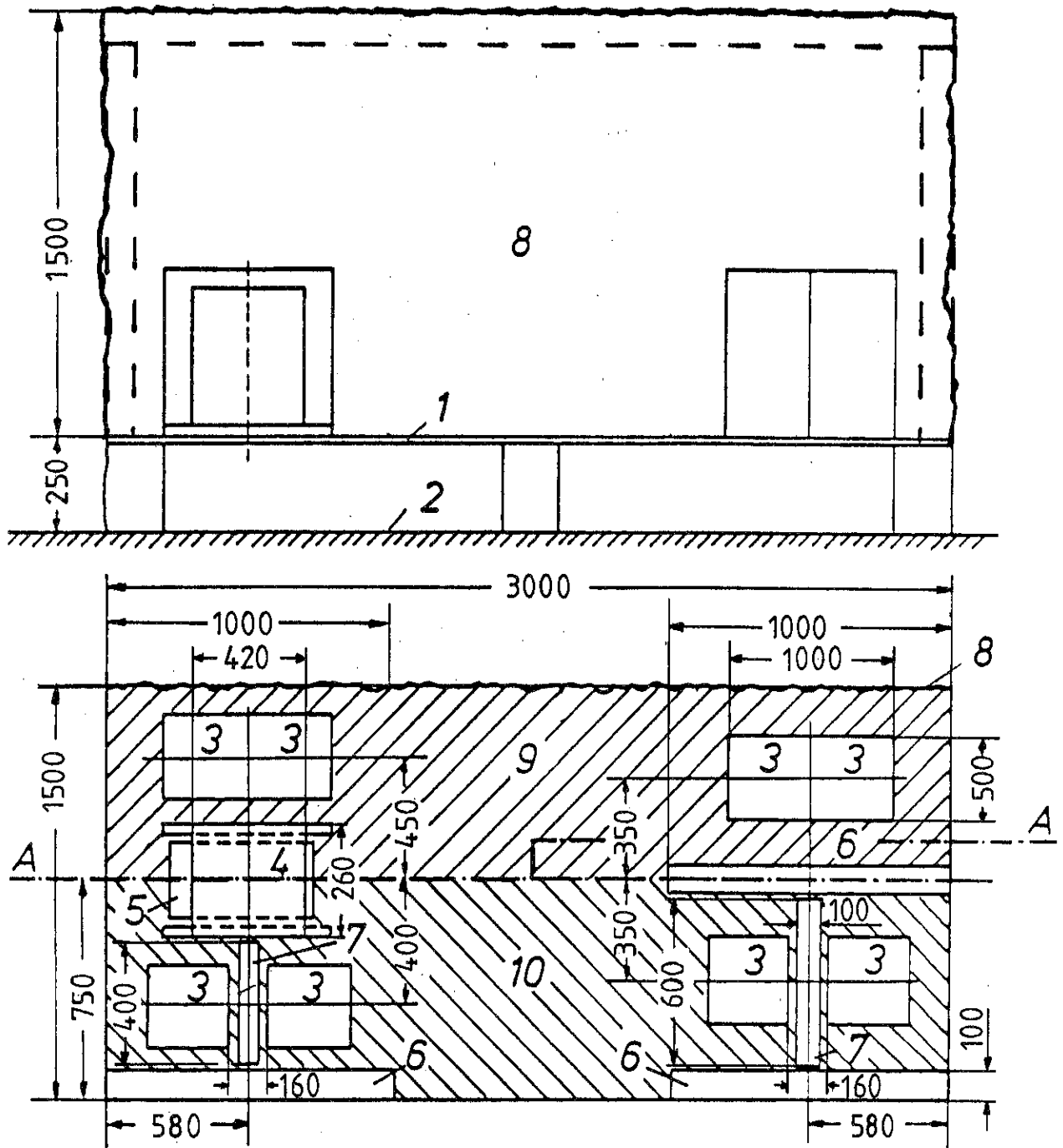


Bild 4 Aufbau einer Brandlastpalette mit Zündkrippe.

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

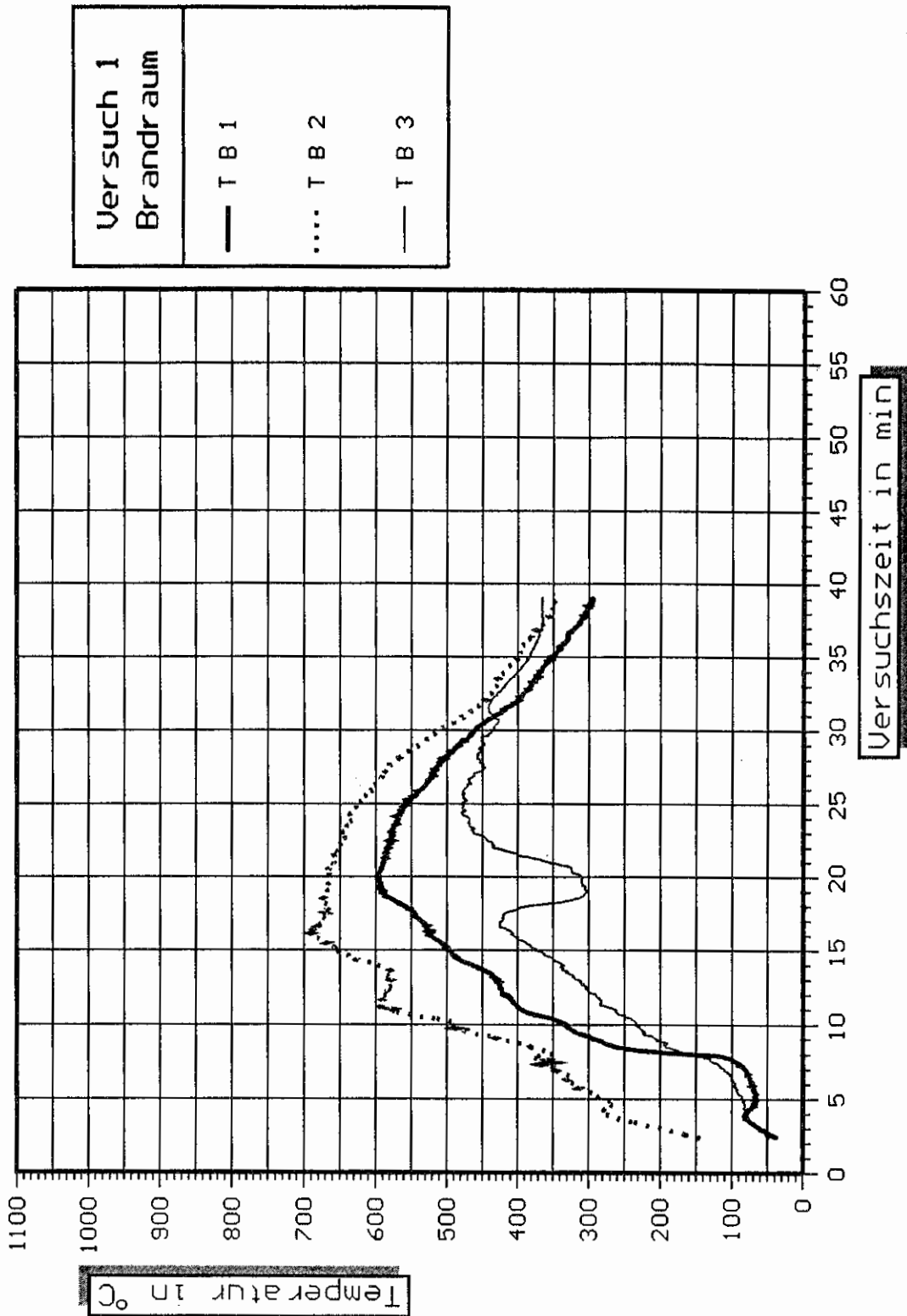


Bild 5 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes.
- Versuch 1 -

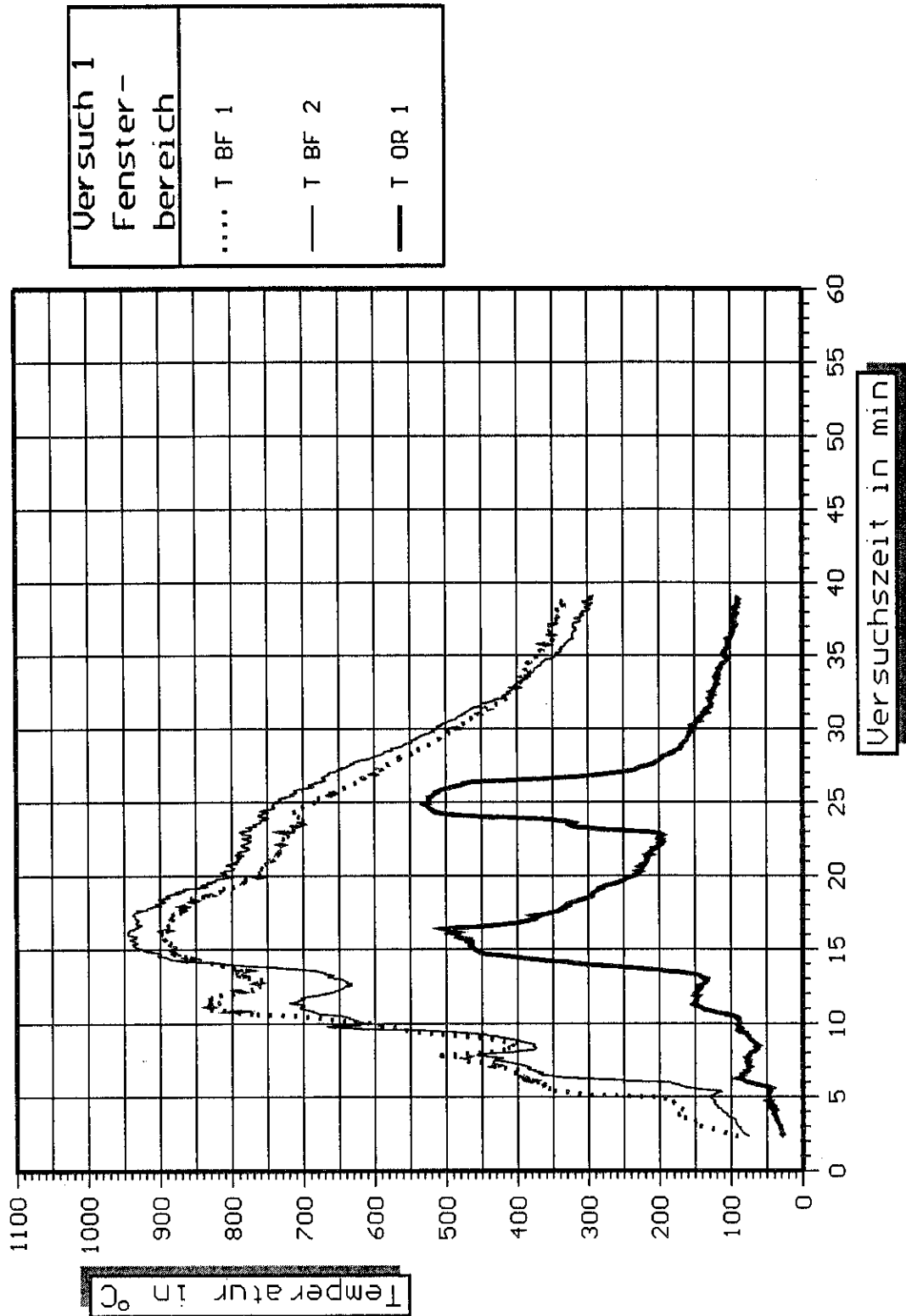


Bild 6 Zeitliche Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade.
- Versuch 1 -

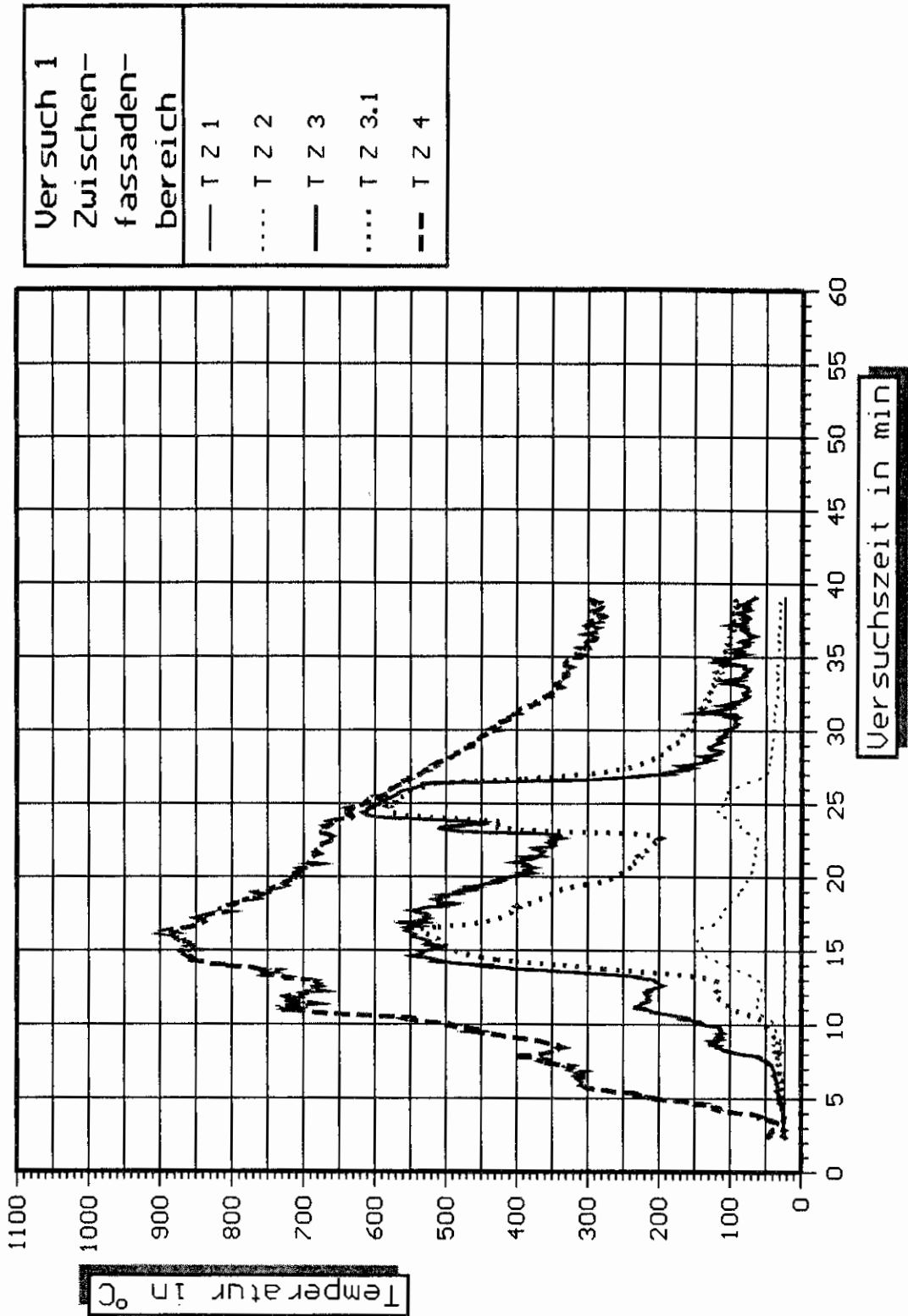


Bild 7 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich und an der Außenfassade.
- Versuch 1 -

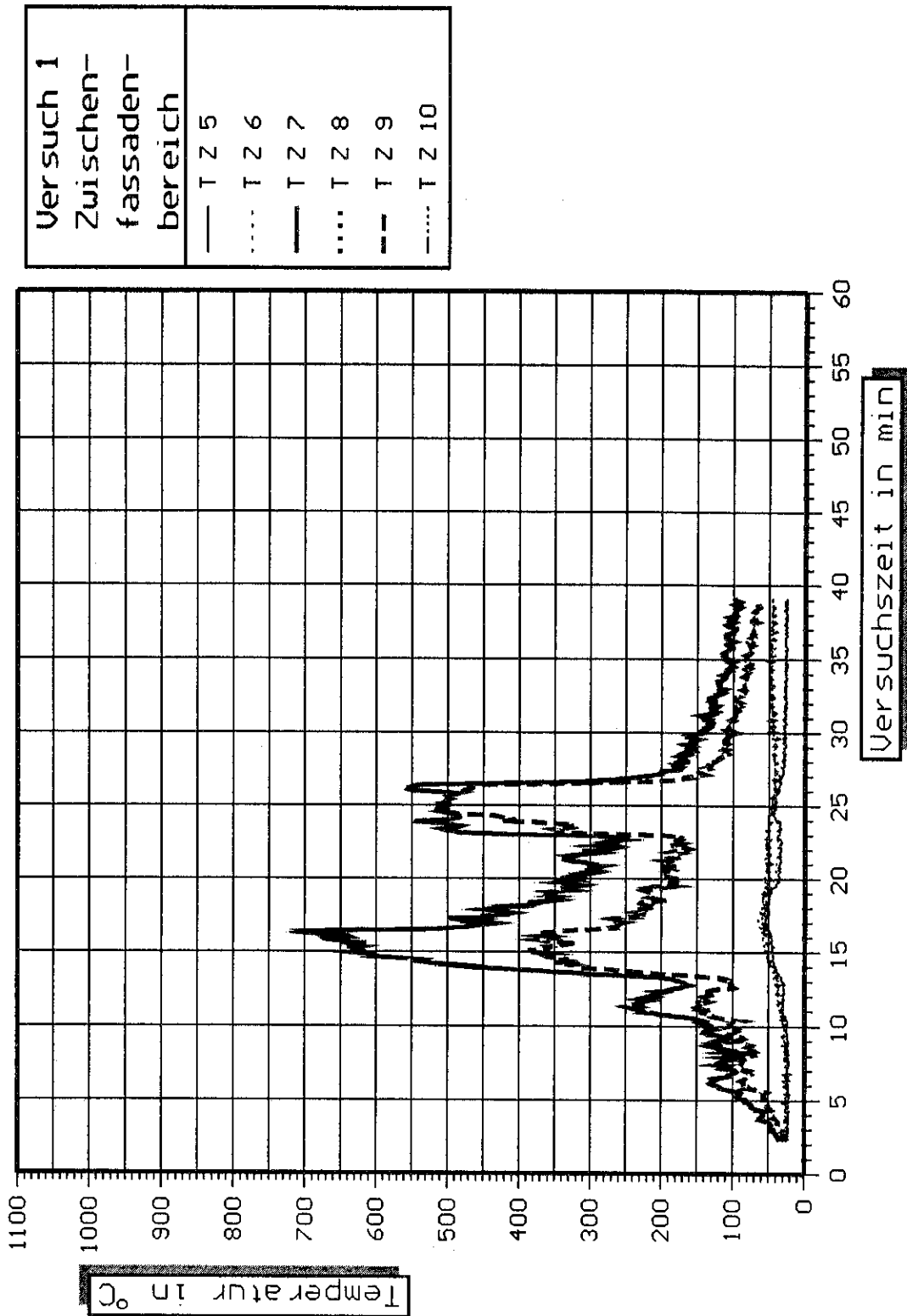


Bild 8 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.
- Versuch 1 -

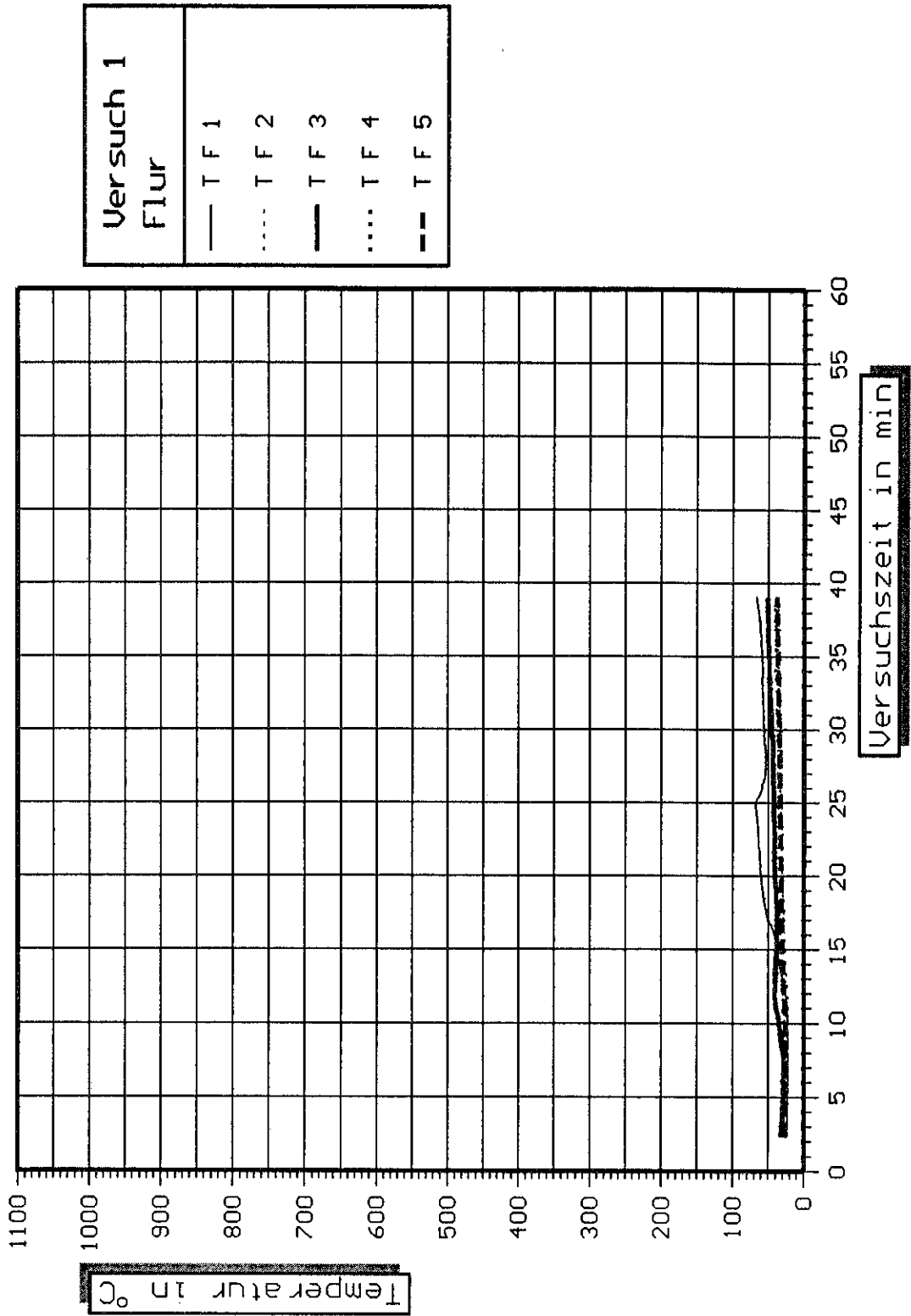


Bild 9 Zeitliche Temperaturverläufe im Flur.
- Versuch 1 -

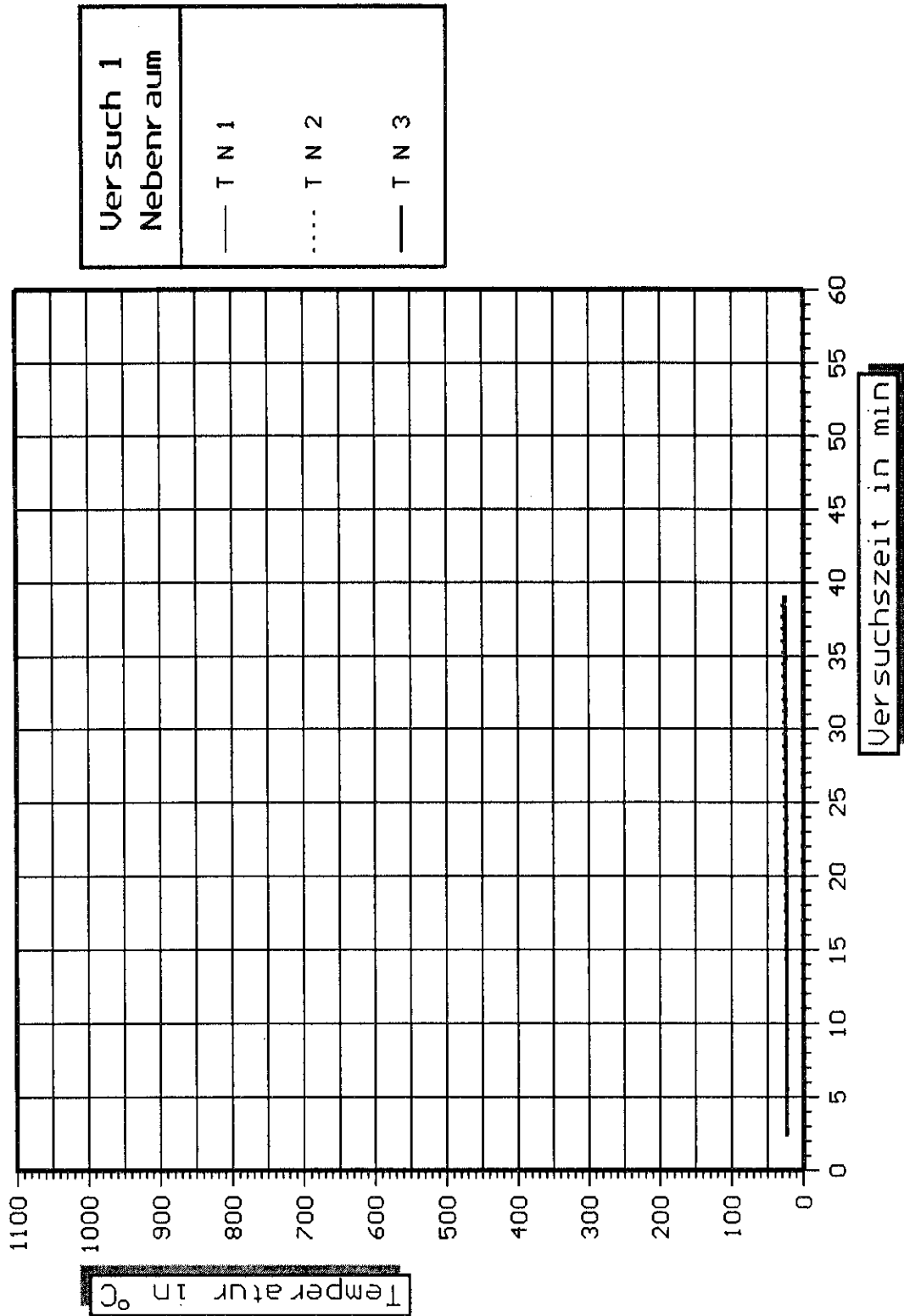


Bild 10 Zeitliche Temperaturverläufe im Nebenraum.
- Versuch 1 -

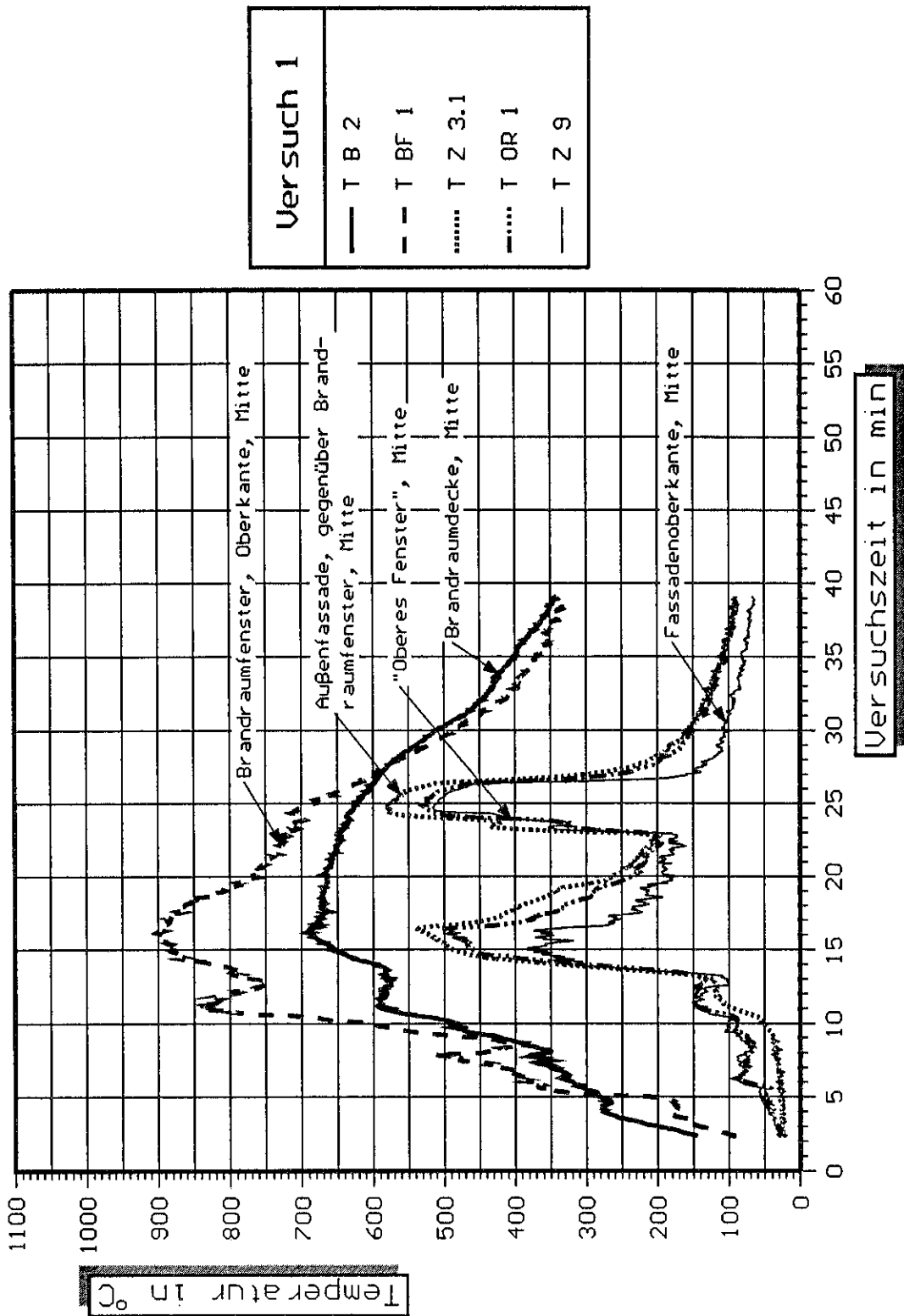


Bild 11 Vergleich ausgewählter zeitlicher Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich, Zwischenfassadenbereich, sowie an der Außenfassade.
- Versuch 1 -

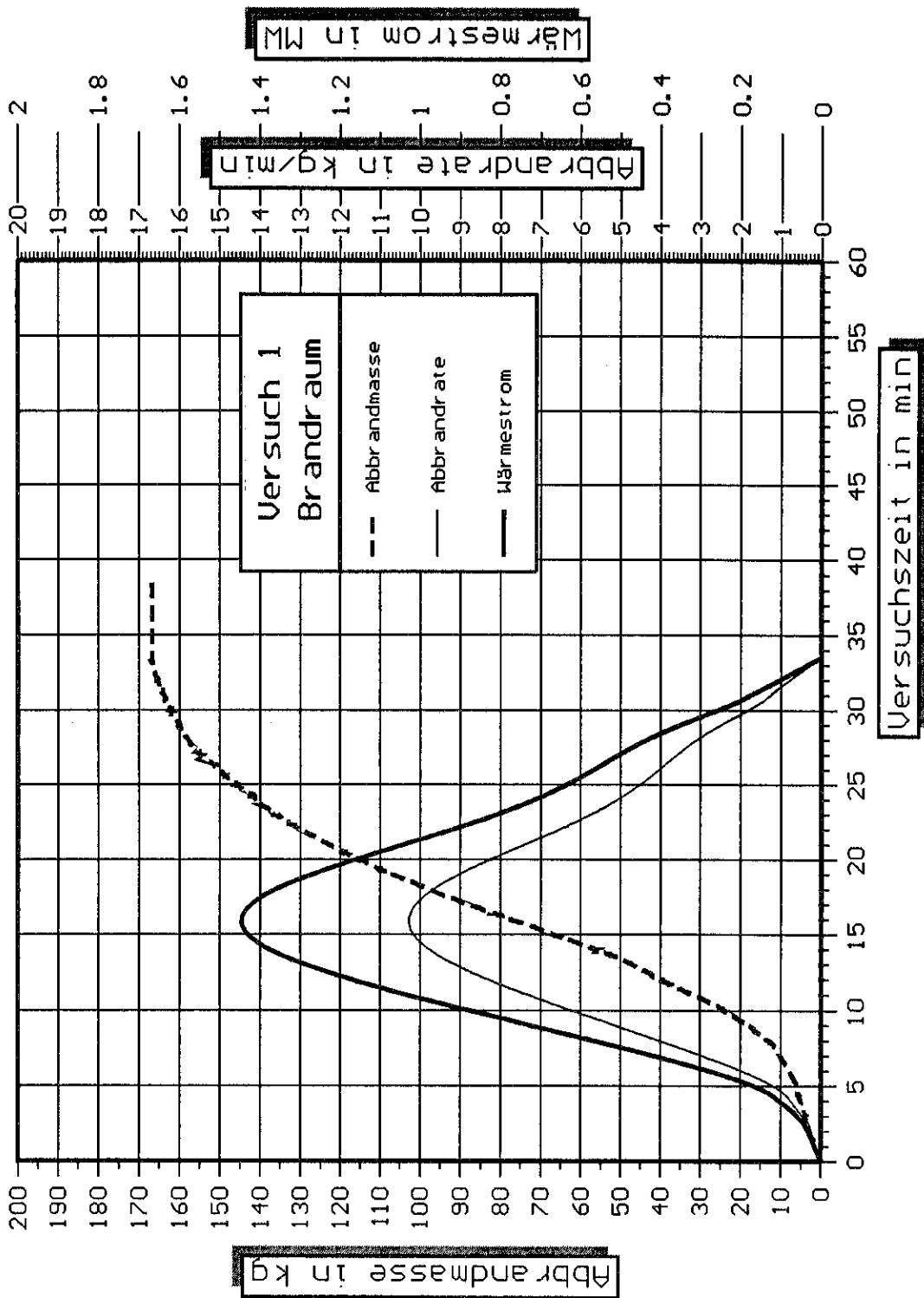


Bild 12 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung.
- Versuch 1 -

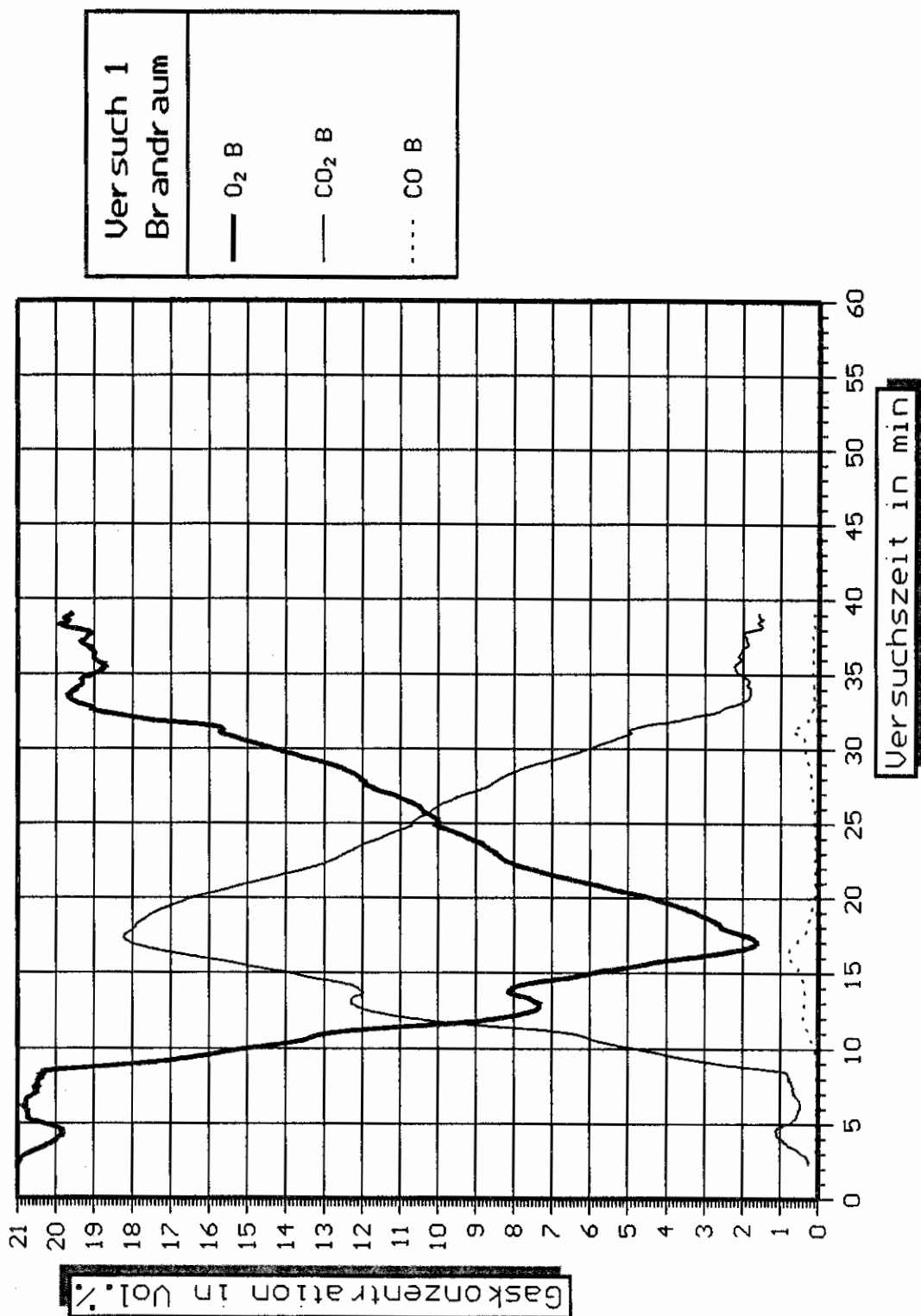


Bild 13.1 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.
- Versuch 1 -

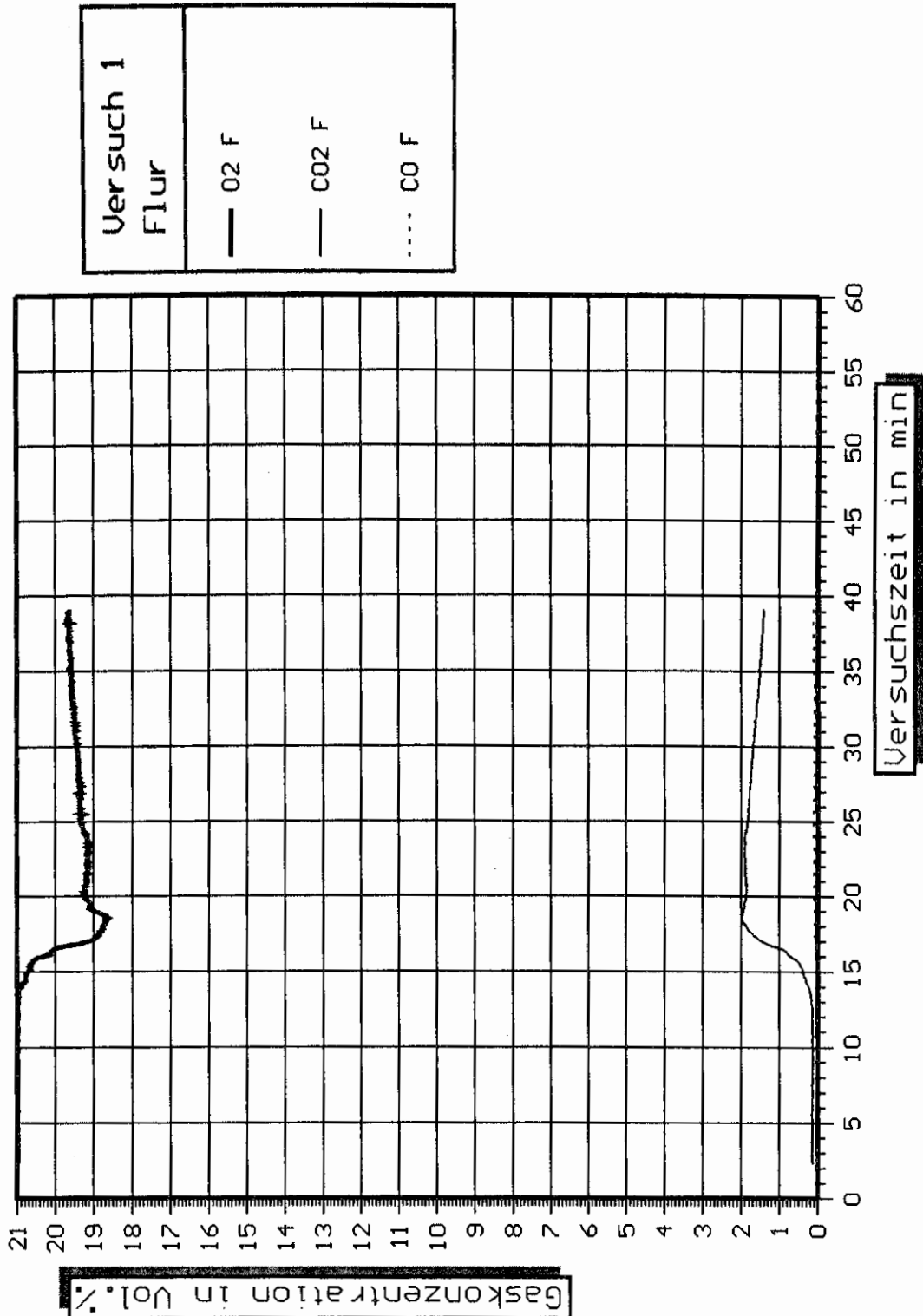


Bild 13.2 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Flur.
- Versuch 1 -

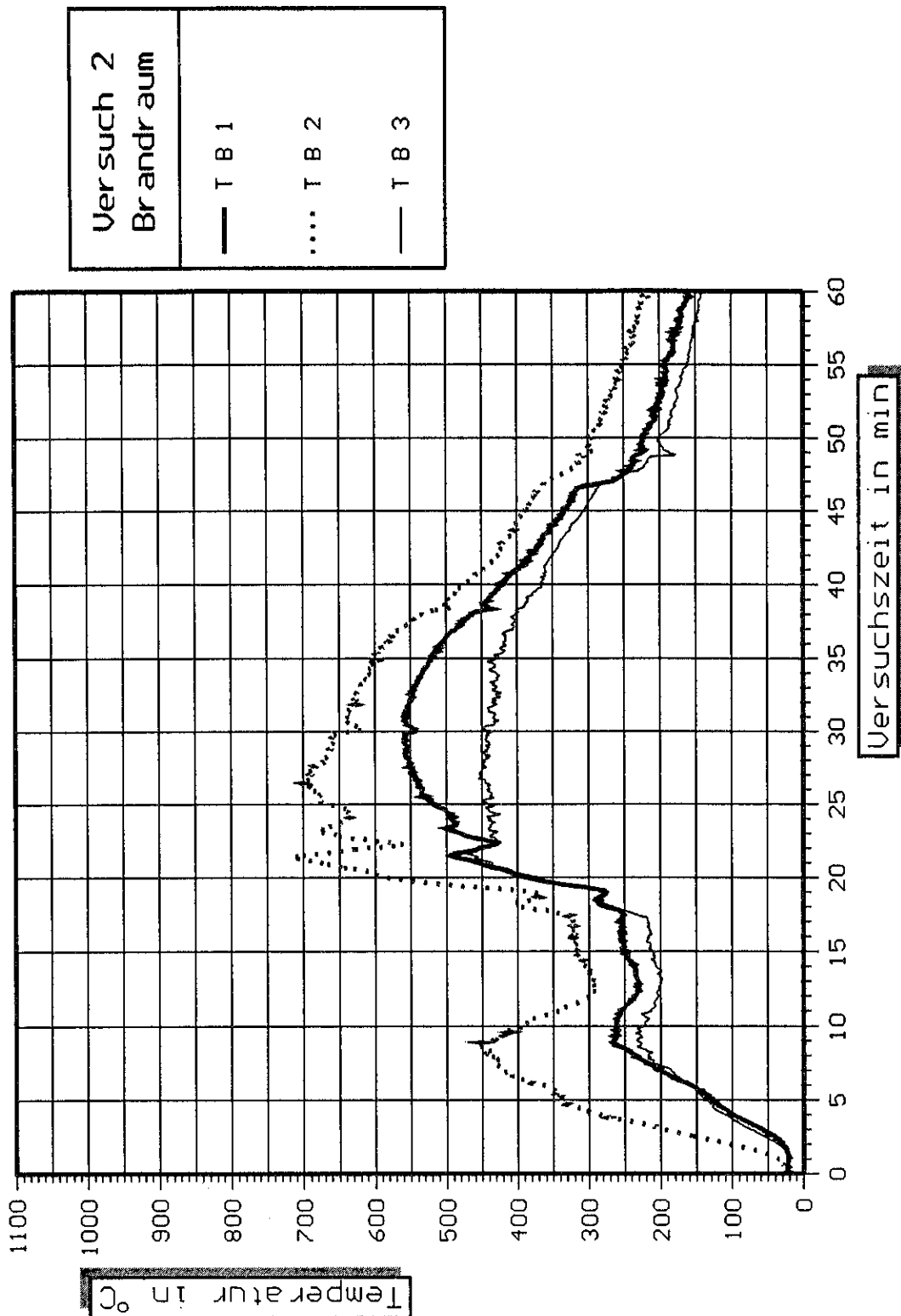


Bild 14 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes.
- Versuch 2 -

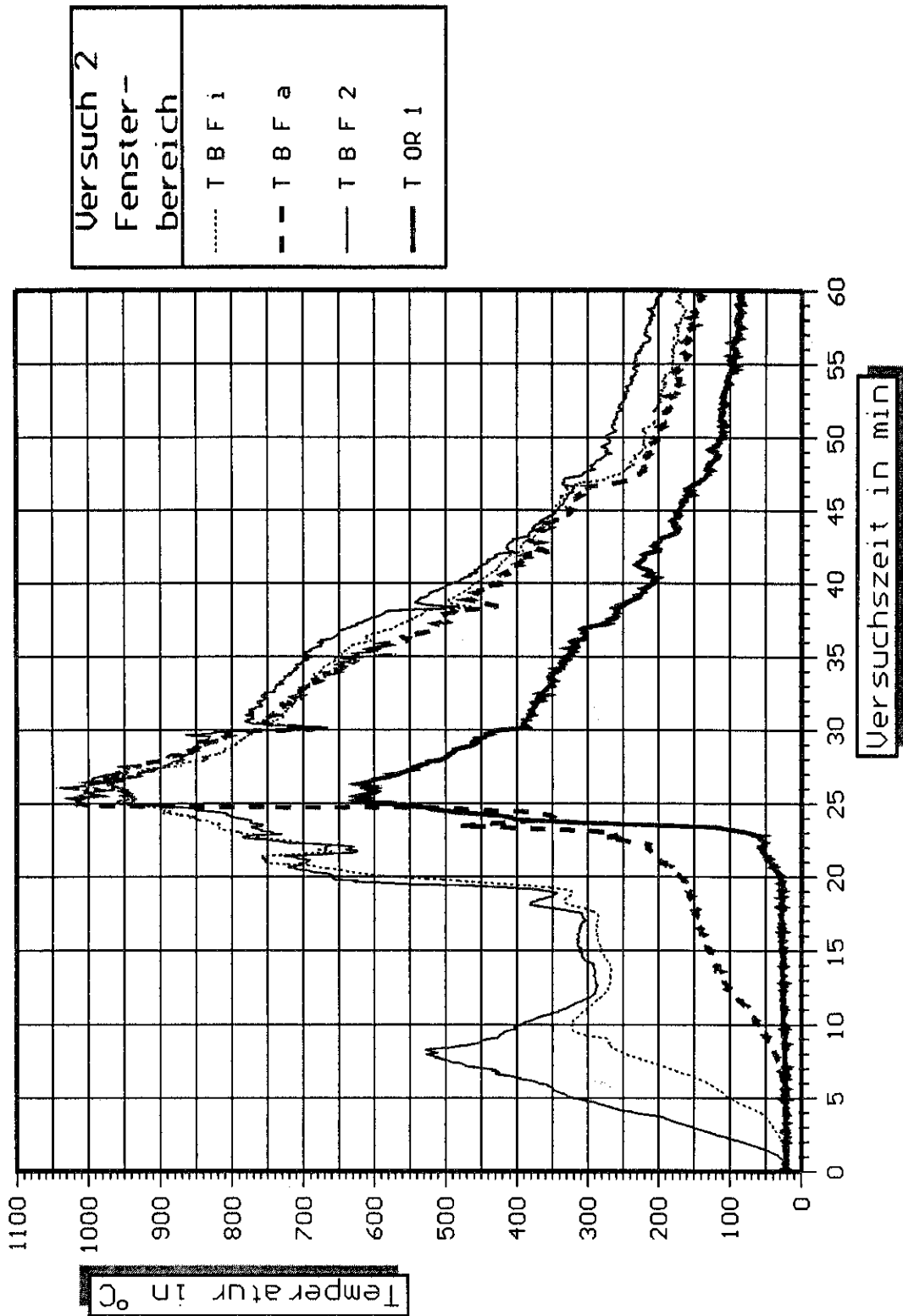


Bild 15 Zeitliche Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade.
- Versuch 2 -

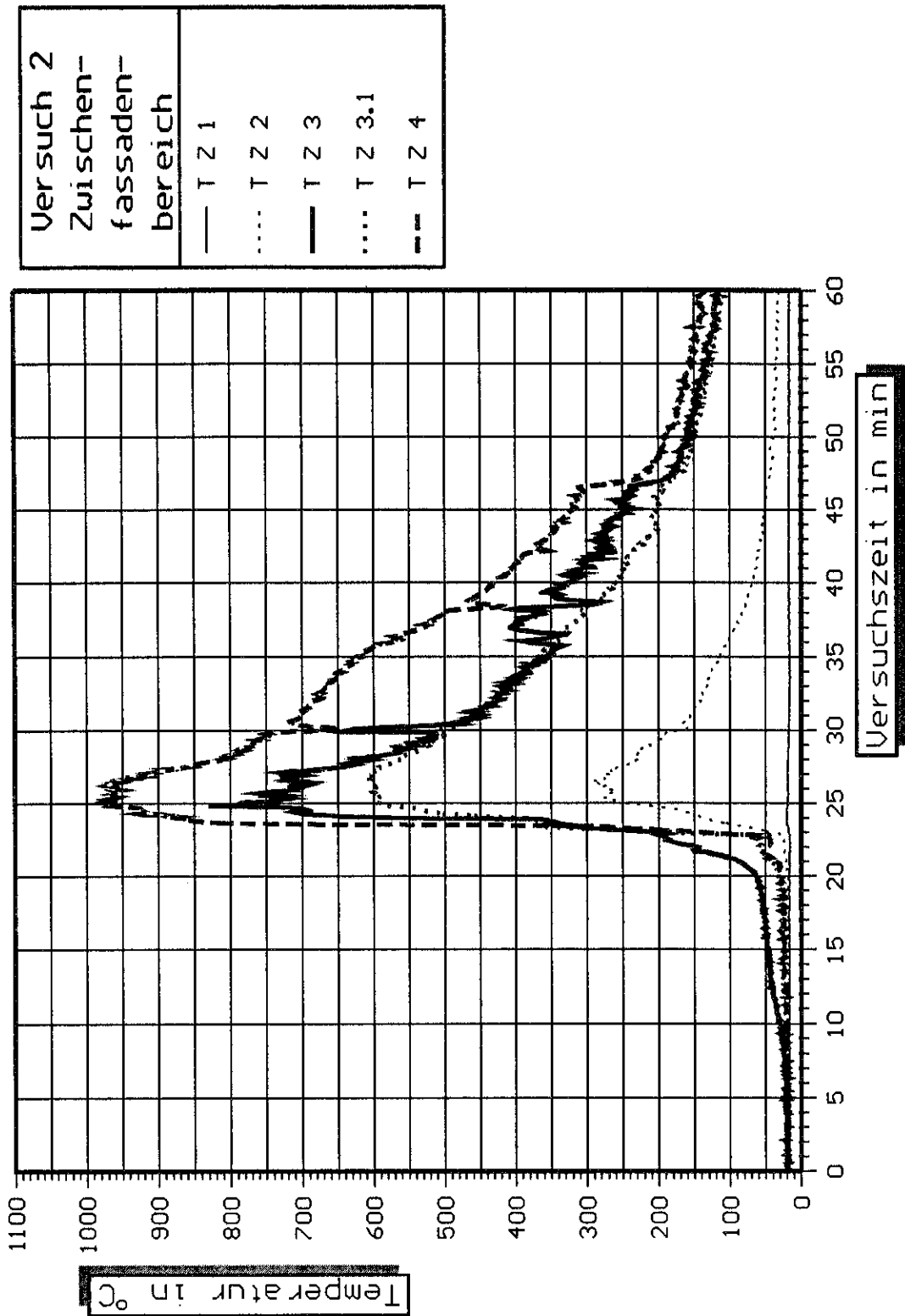


Bild 16 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich und an der Außenfassade.
- Versuch 2 -

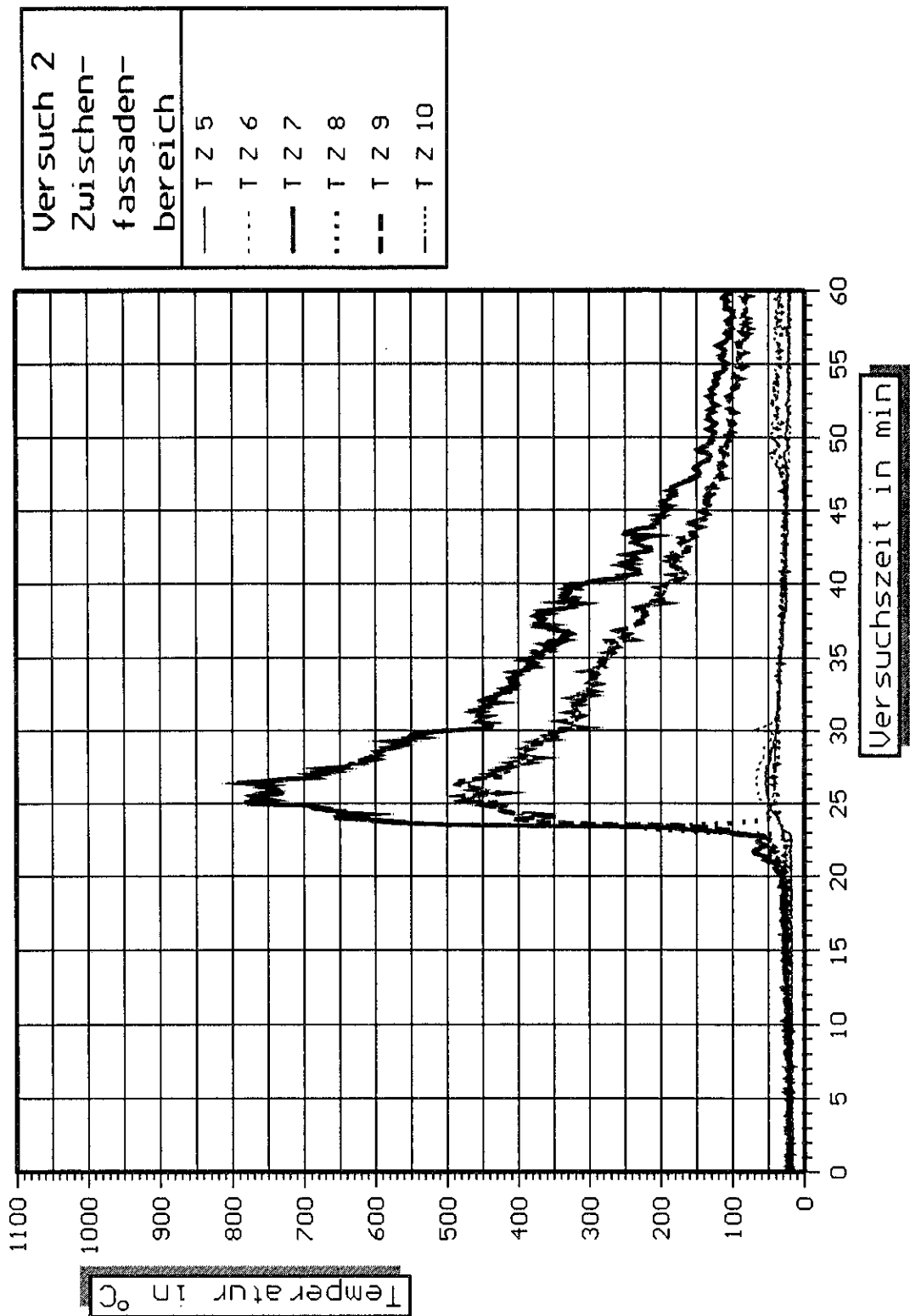


Bild 17 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.
- Versuch 2 -

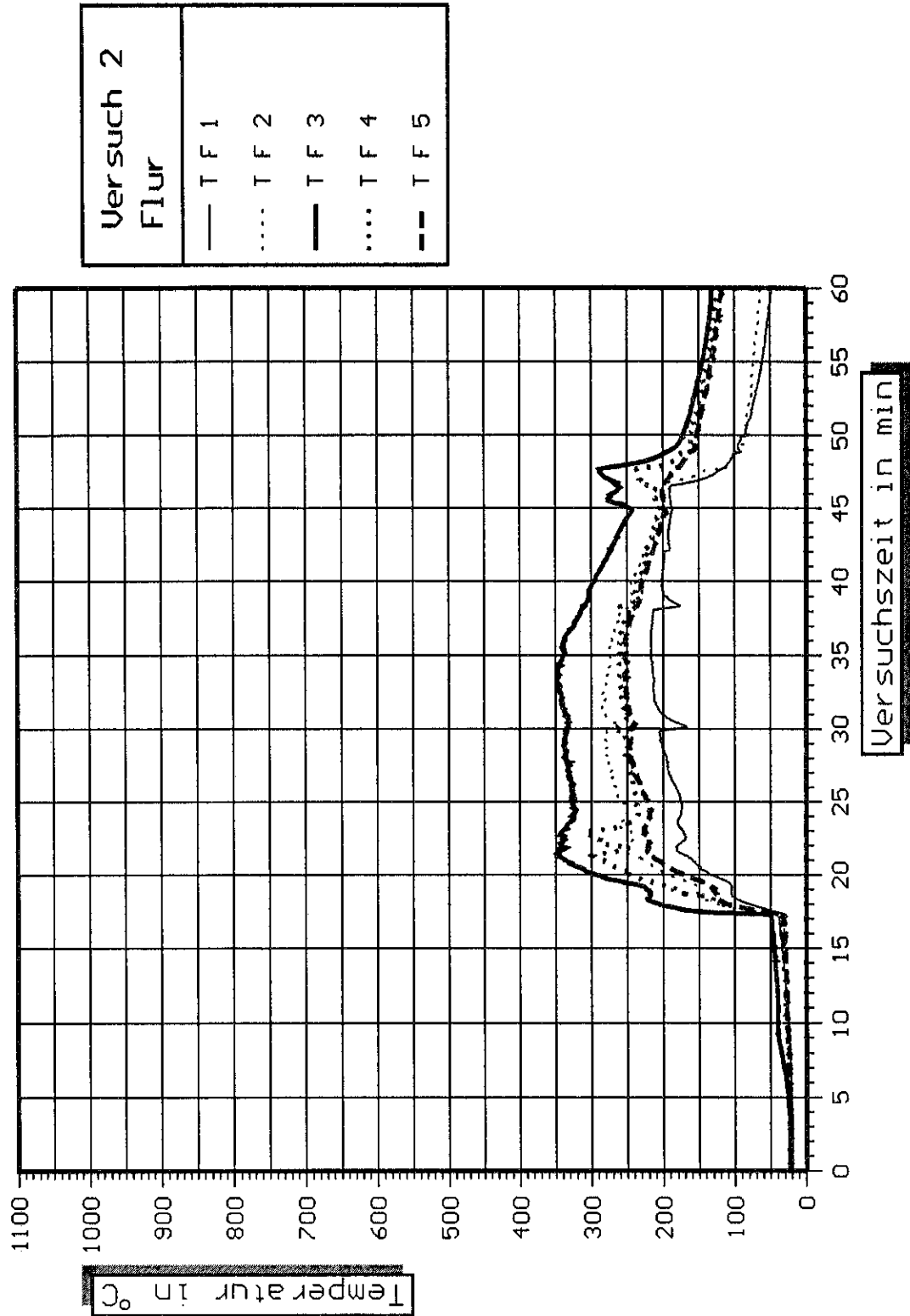


Bild 18 Zeitliche Temperaturverläufe im Flur.
- Versuch 2 -

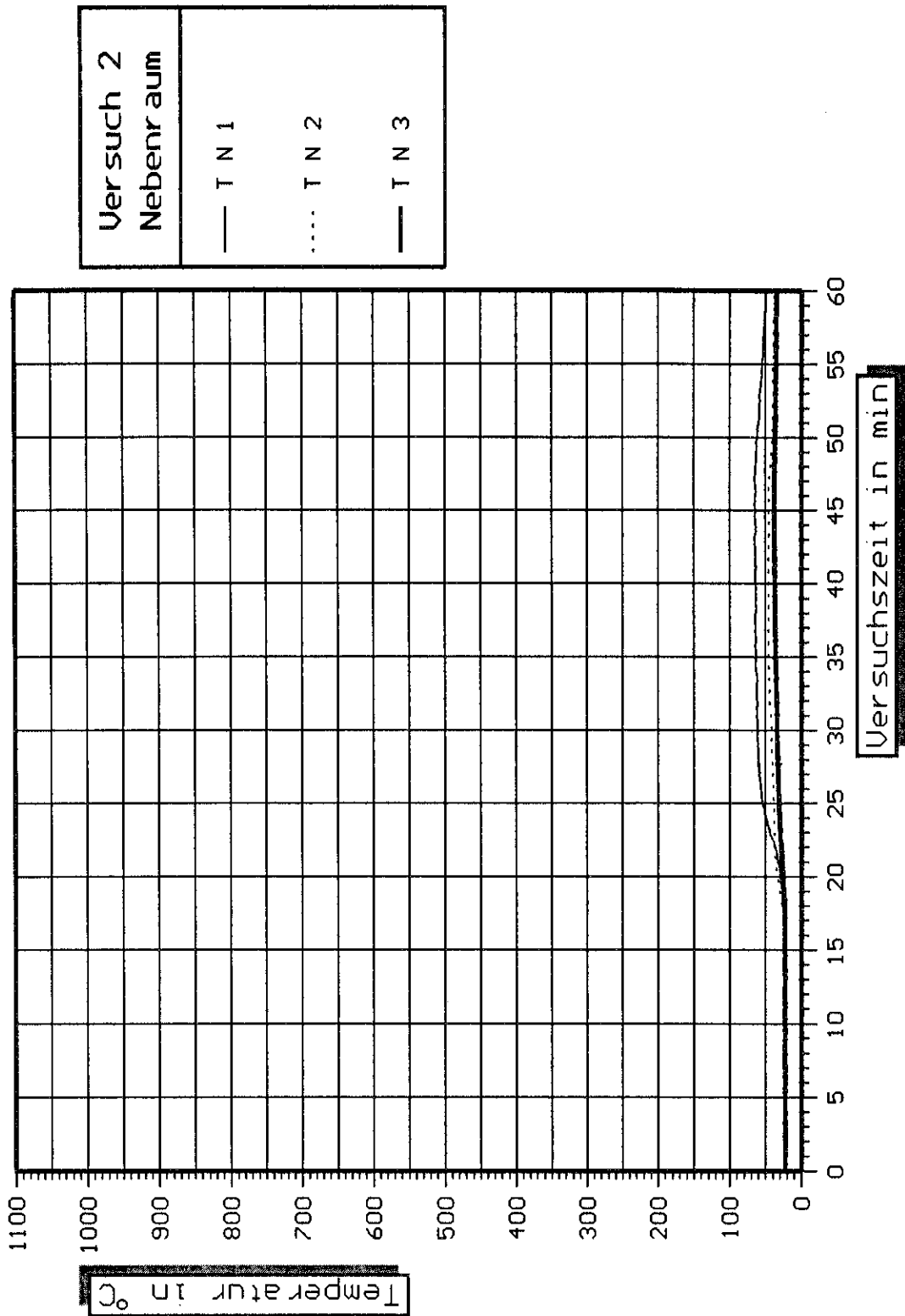


Bild 19 Zeitliche Temperaturverläufe im Nebenraum.
- Versuch 2 -

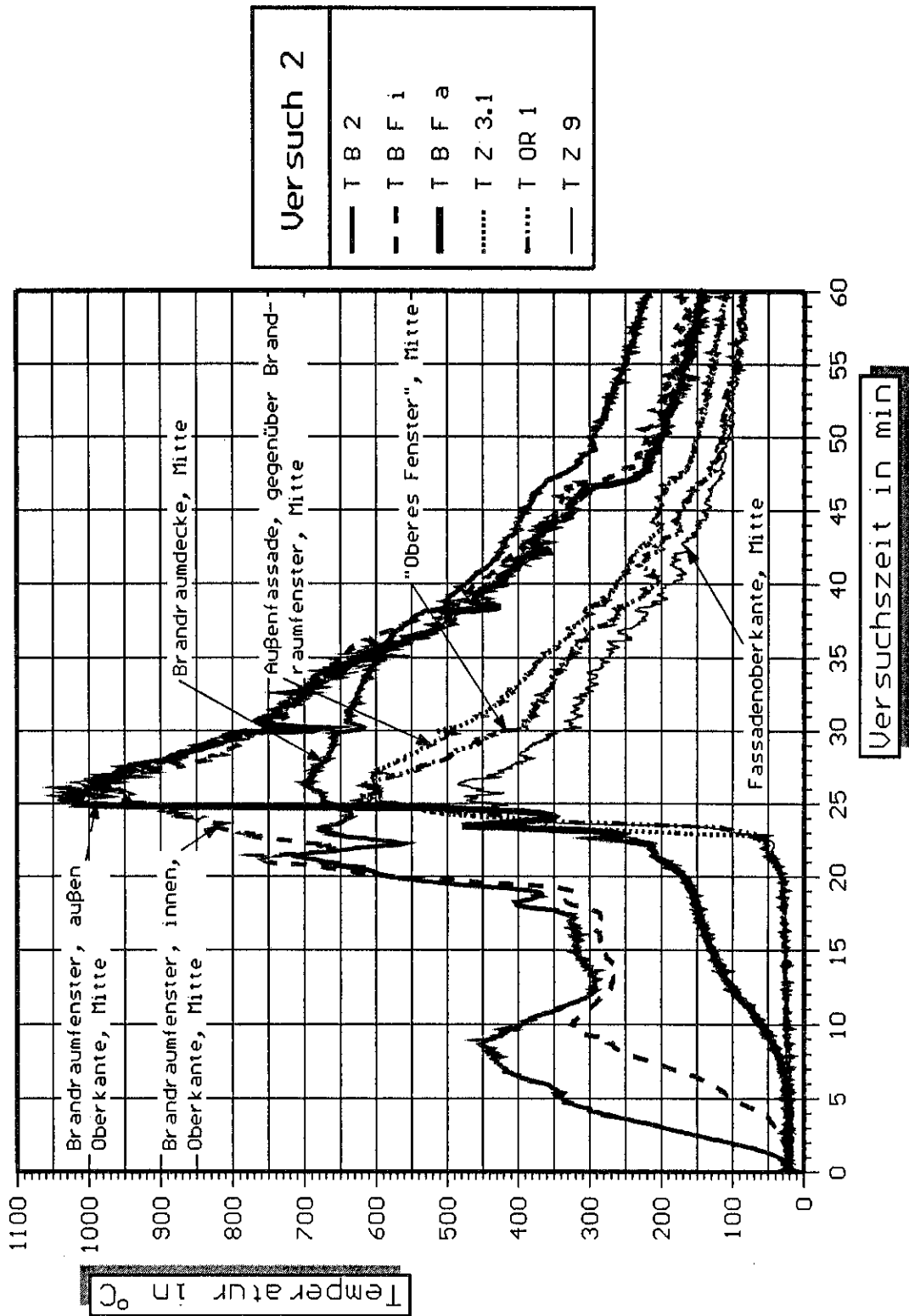


Bild 20 Vergleich ausgewählter zeitlicher Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich, Zwischenfassadenbereich, sowie an der Außenfassade.
 - Versuch 2 -

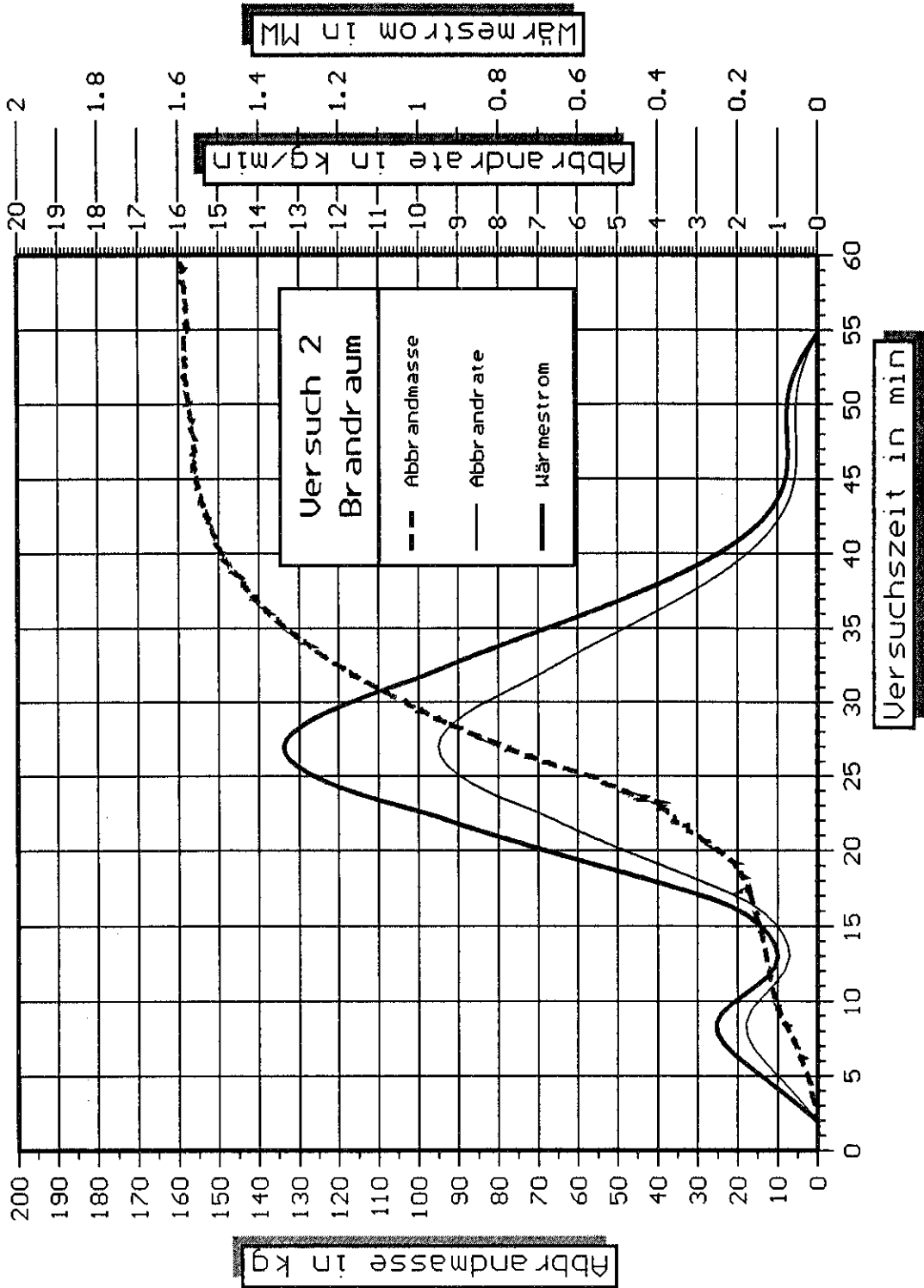


Bild 21 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung.
- Versuch 2 -

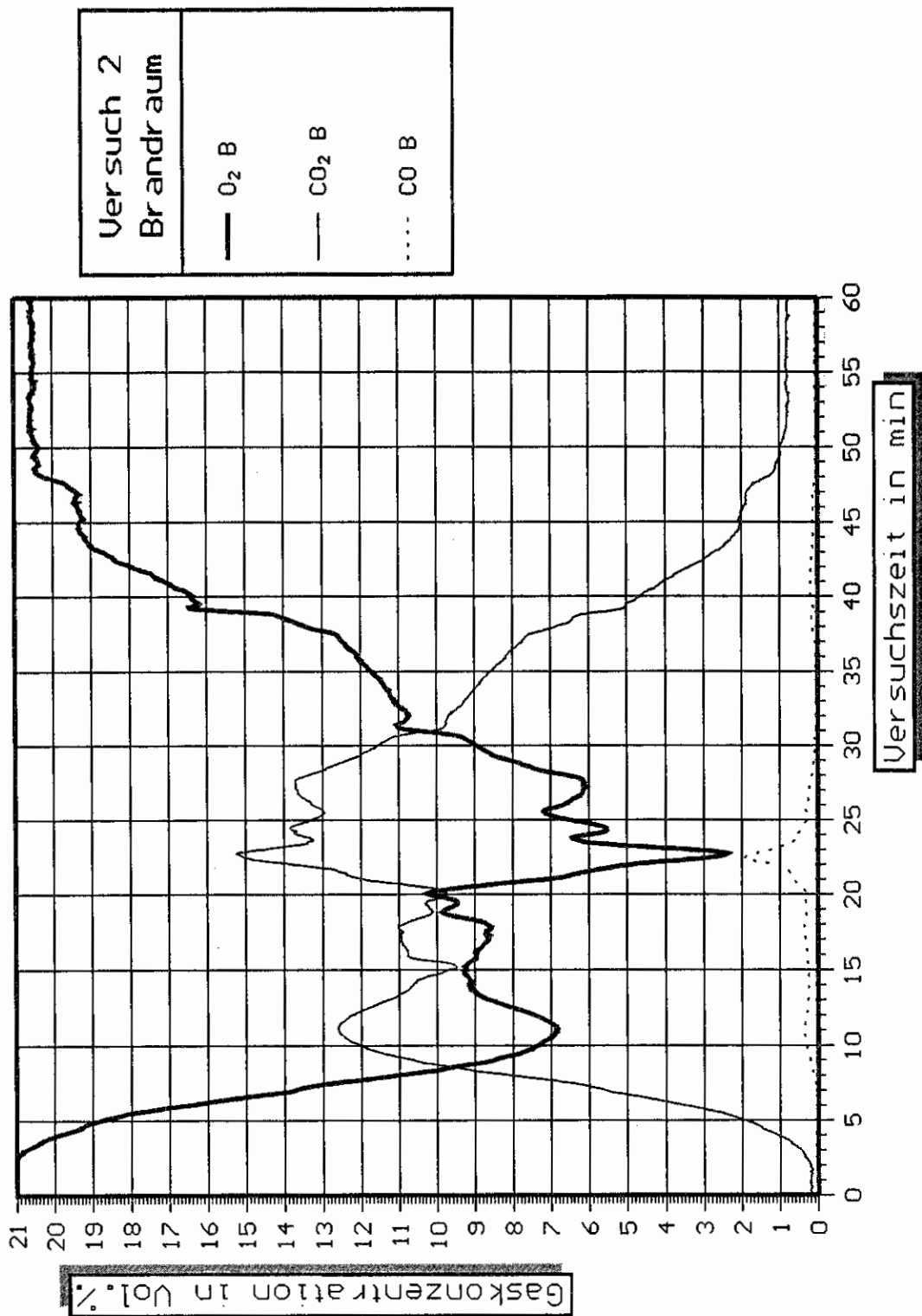


Bild 22 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.
- Versuch 2 -

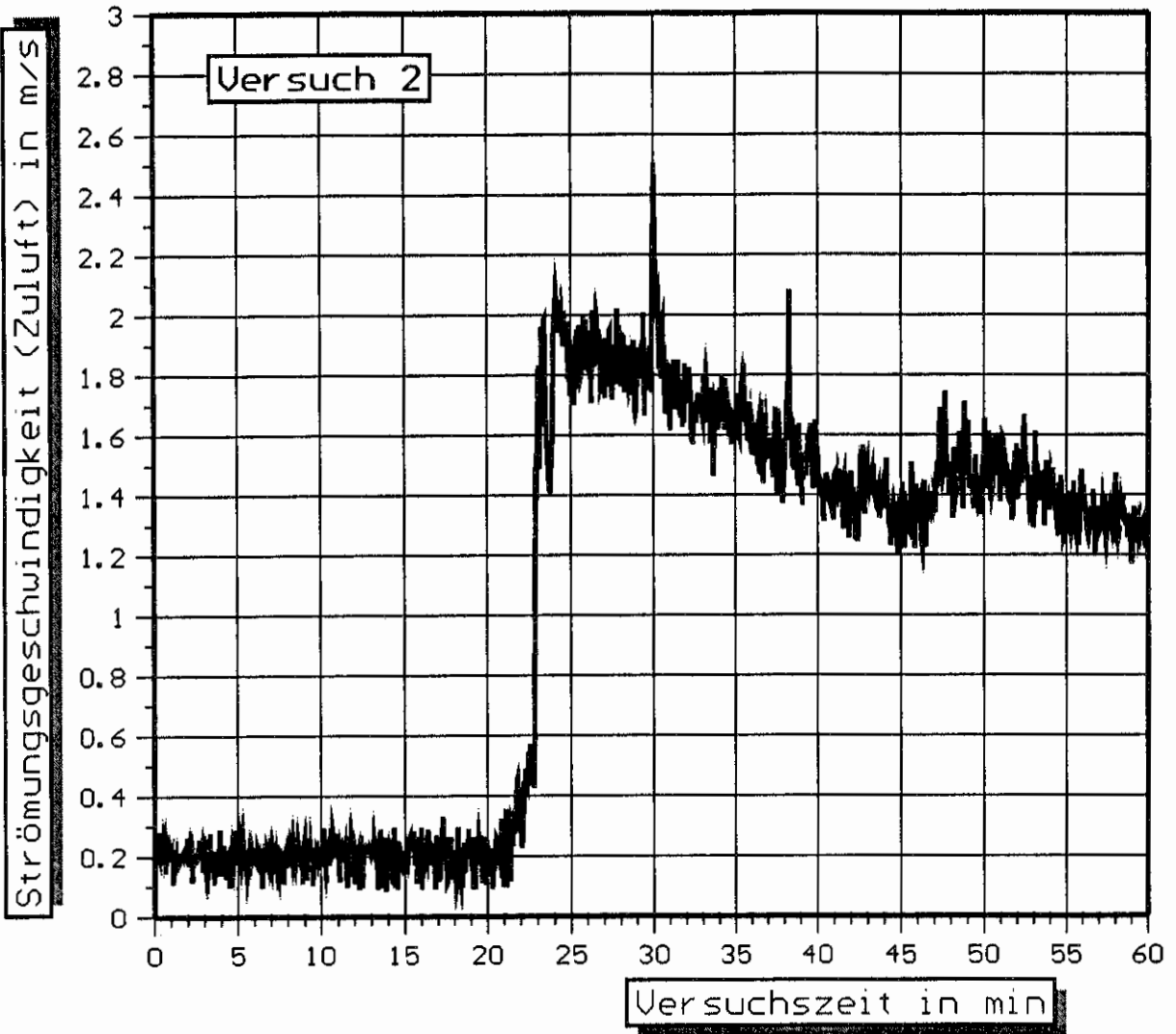


Bild 23 Zeitlicher Verlauf der Zuluftgeschwindigkeit an der Außenfassade.
- Versuch 2 -

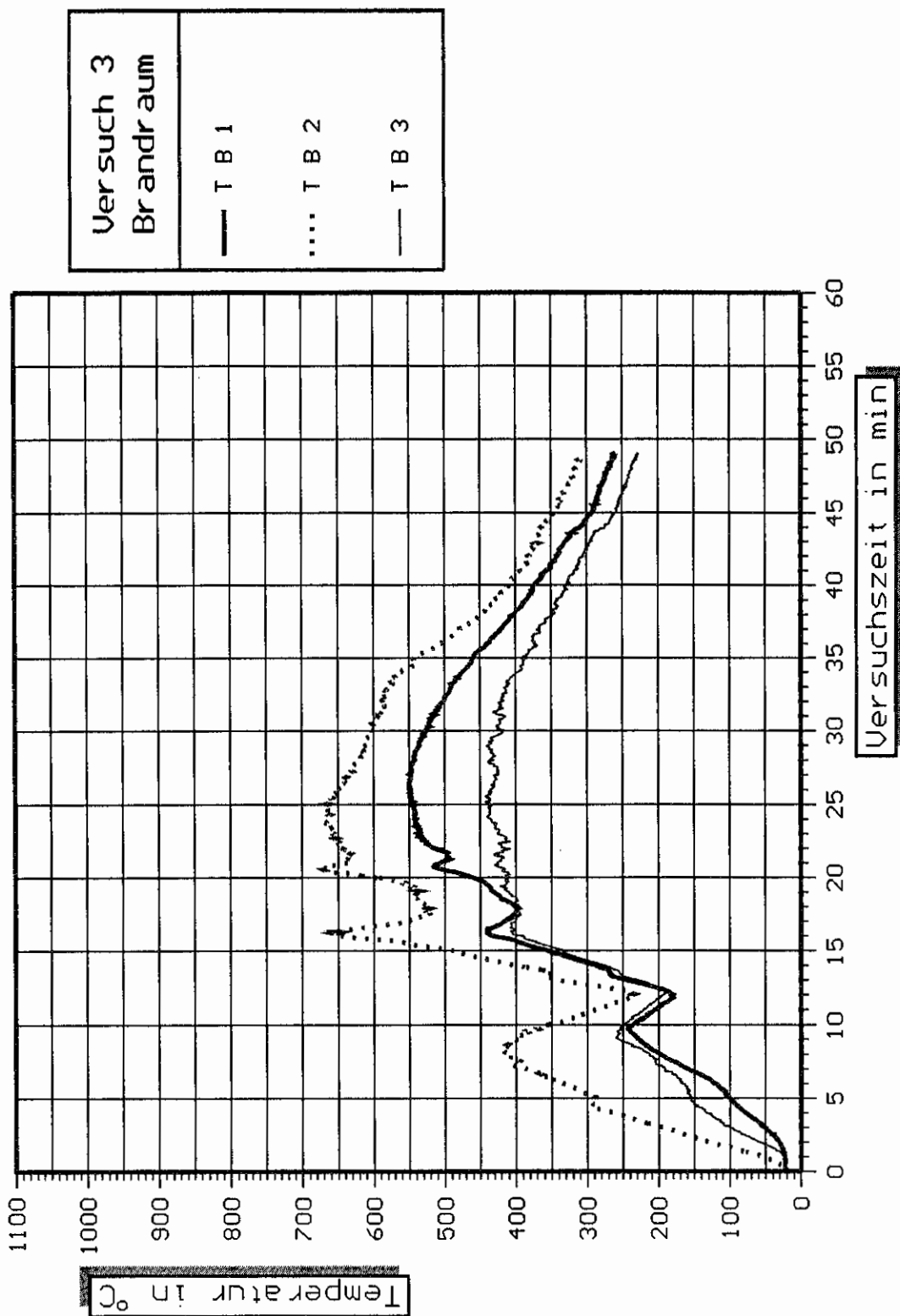


Bild 24 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes.
- Versuch 3 -

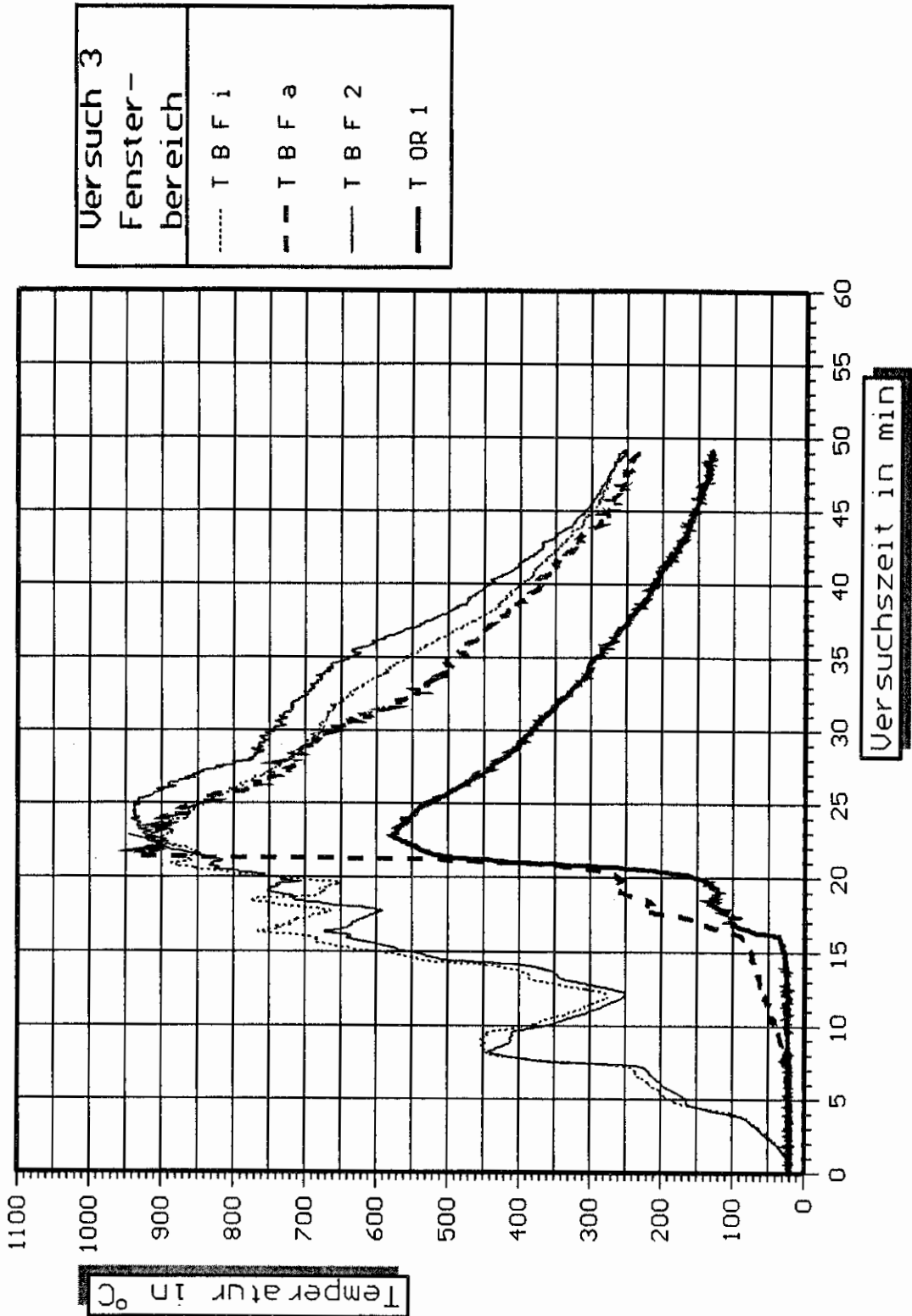


Bild 25 Zeitliche Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade.
- Versuch 3 -

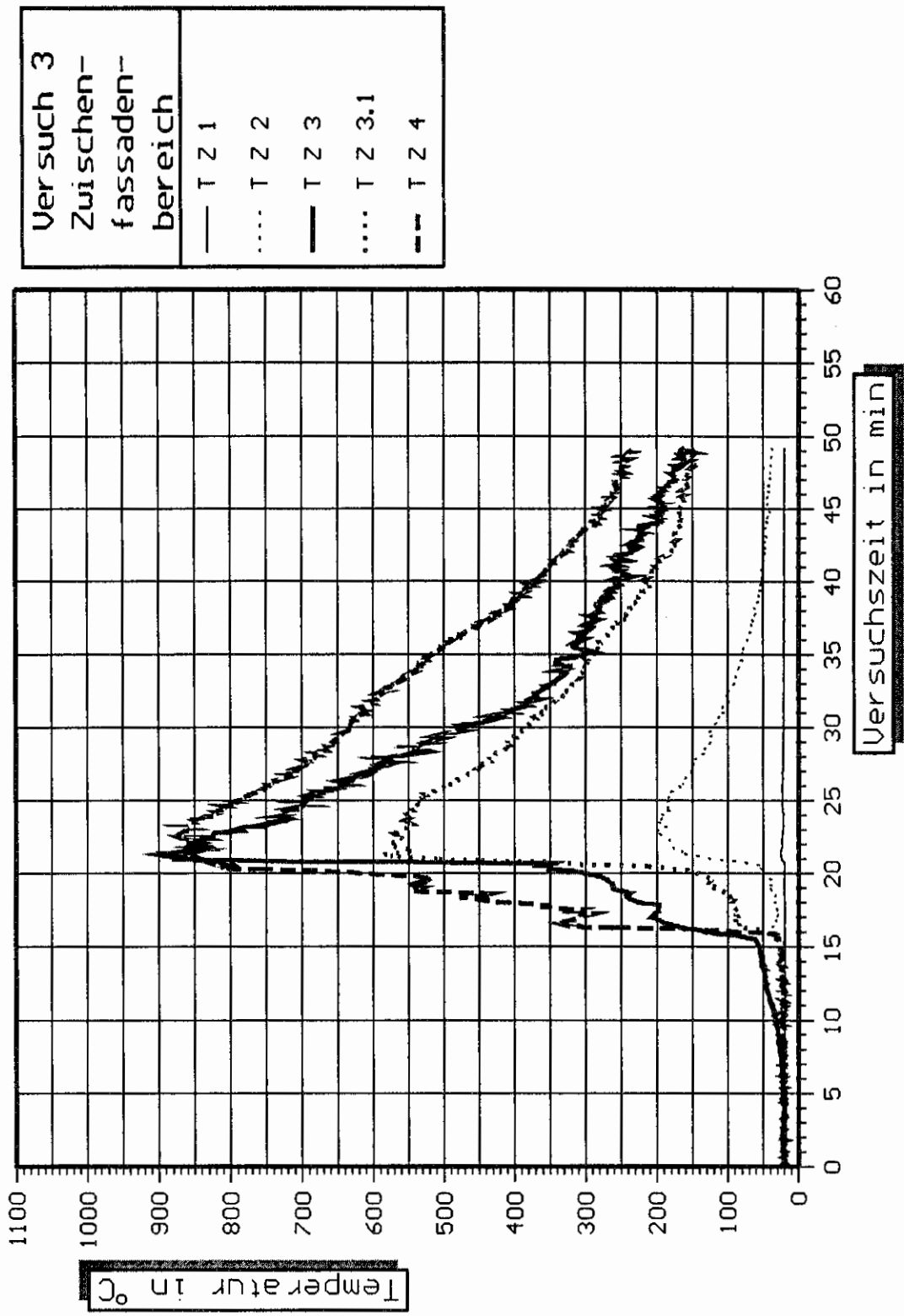


Bild 26 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich und an der Außenfassade.
- Versuch 3 -

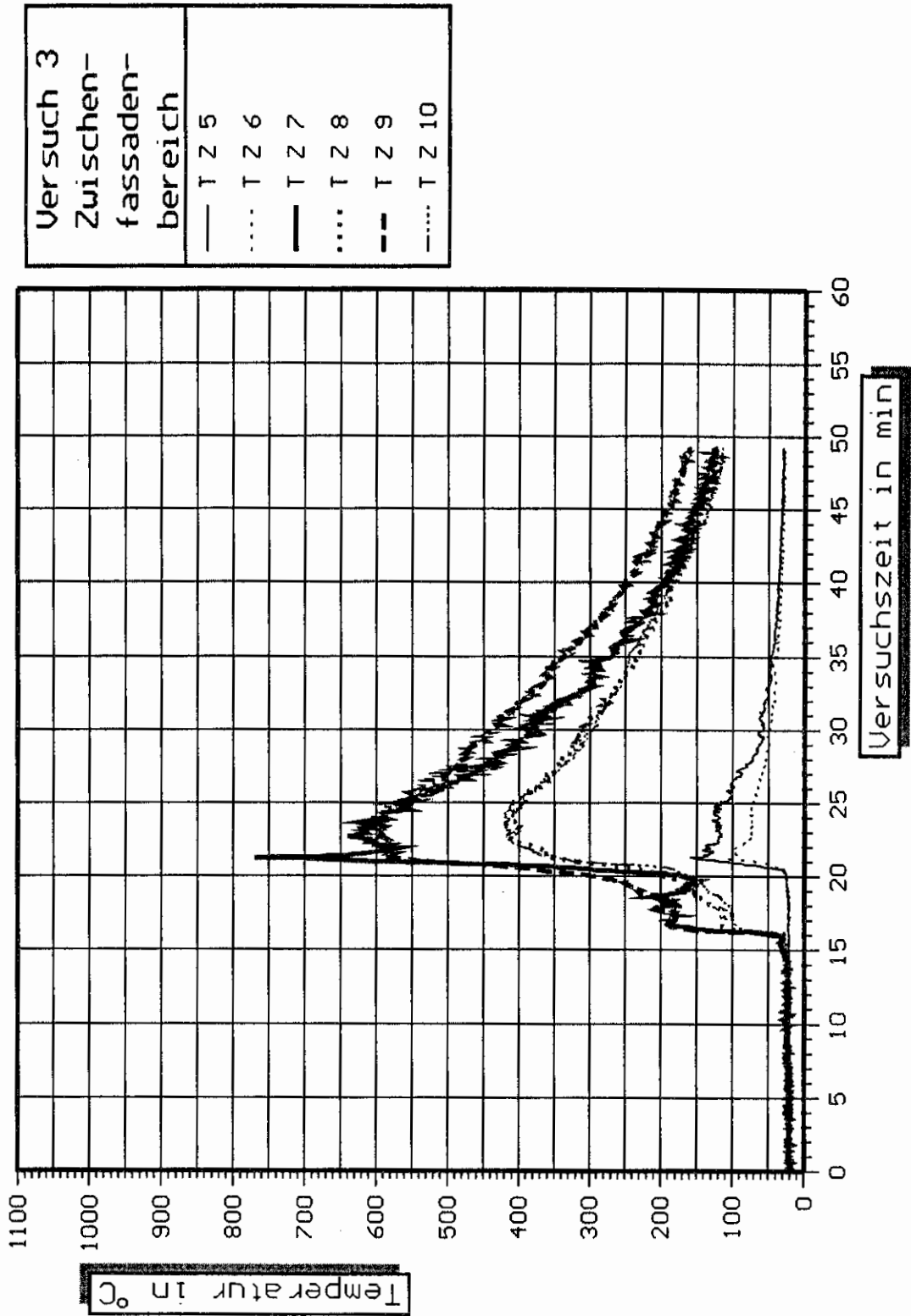


Bild 27 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.
- Versuch 3 -

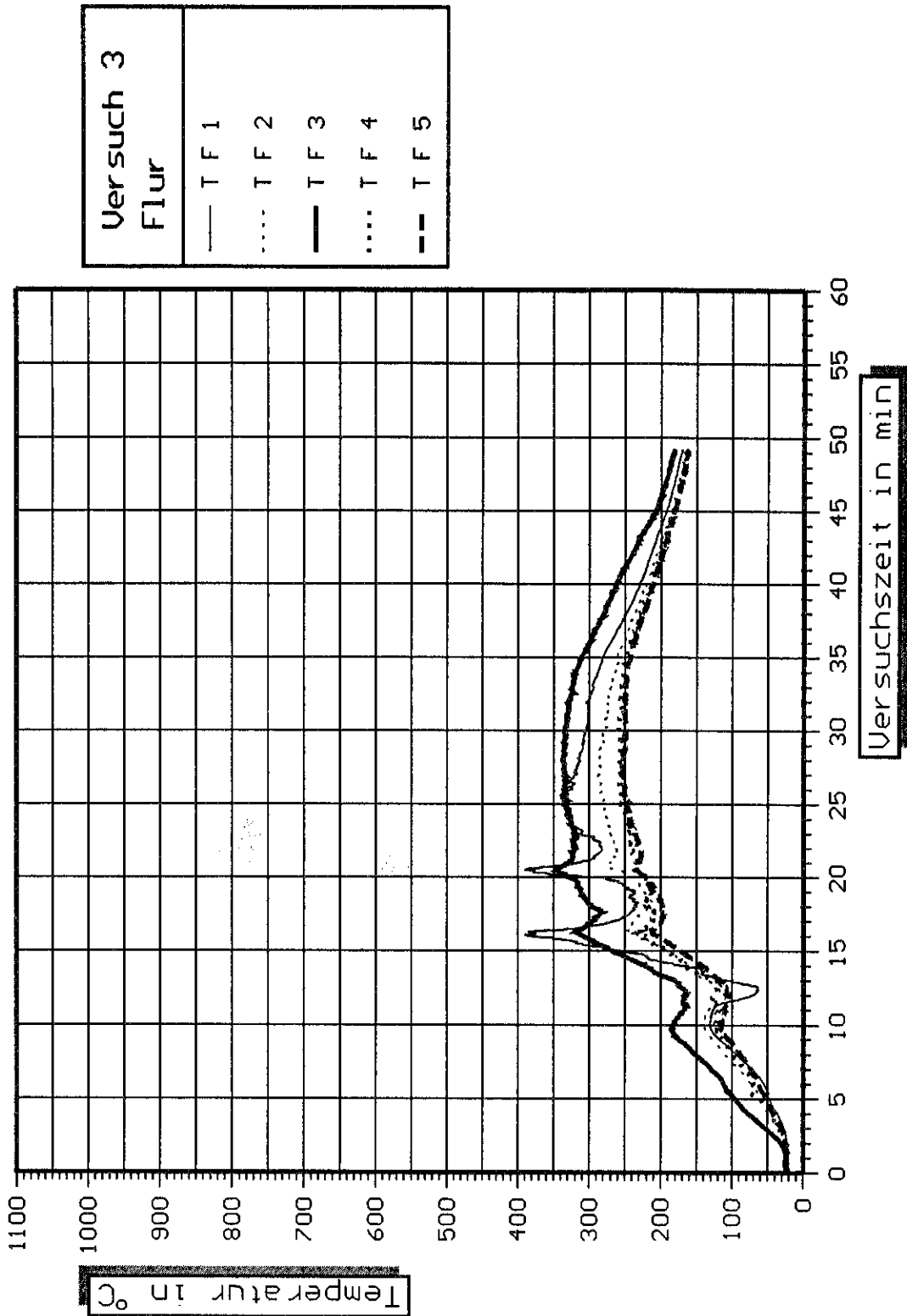


Bild 28 Zeitliche Temperaturverläufe im Flur.
- Versuch 3 -

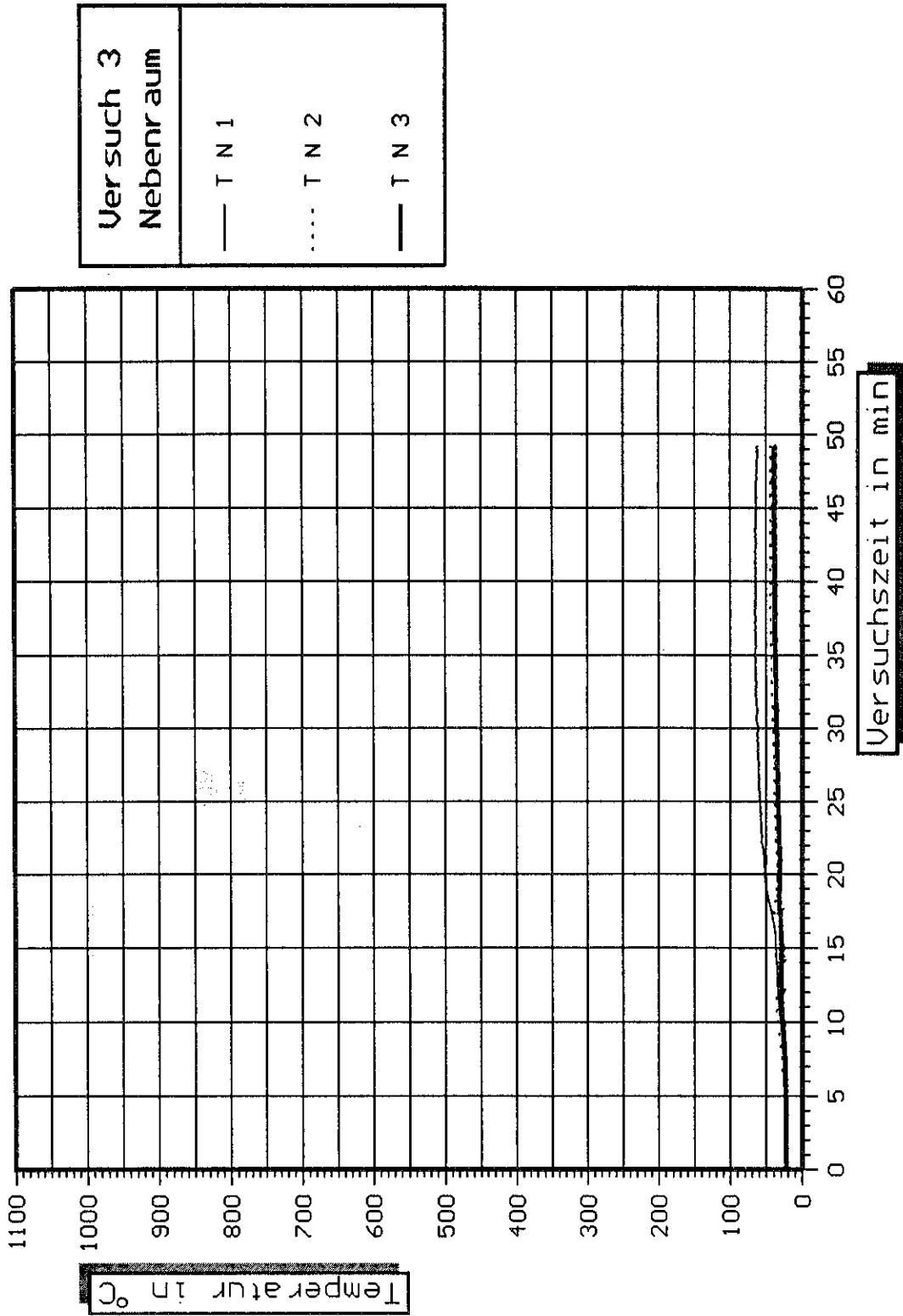


Bild 29 Zeitliche Temperaturverläufe im Nebenraum.
- Versuch 3 -

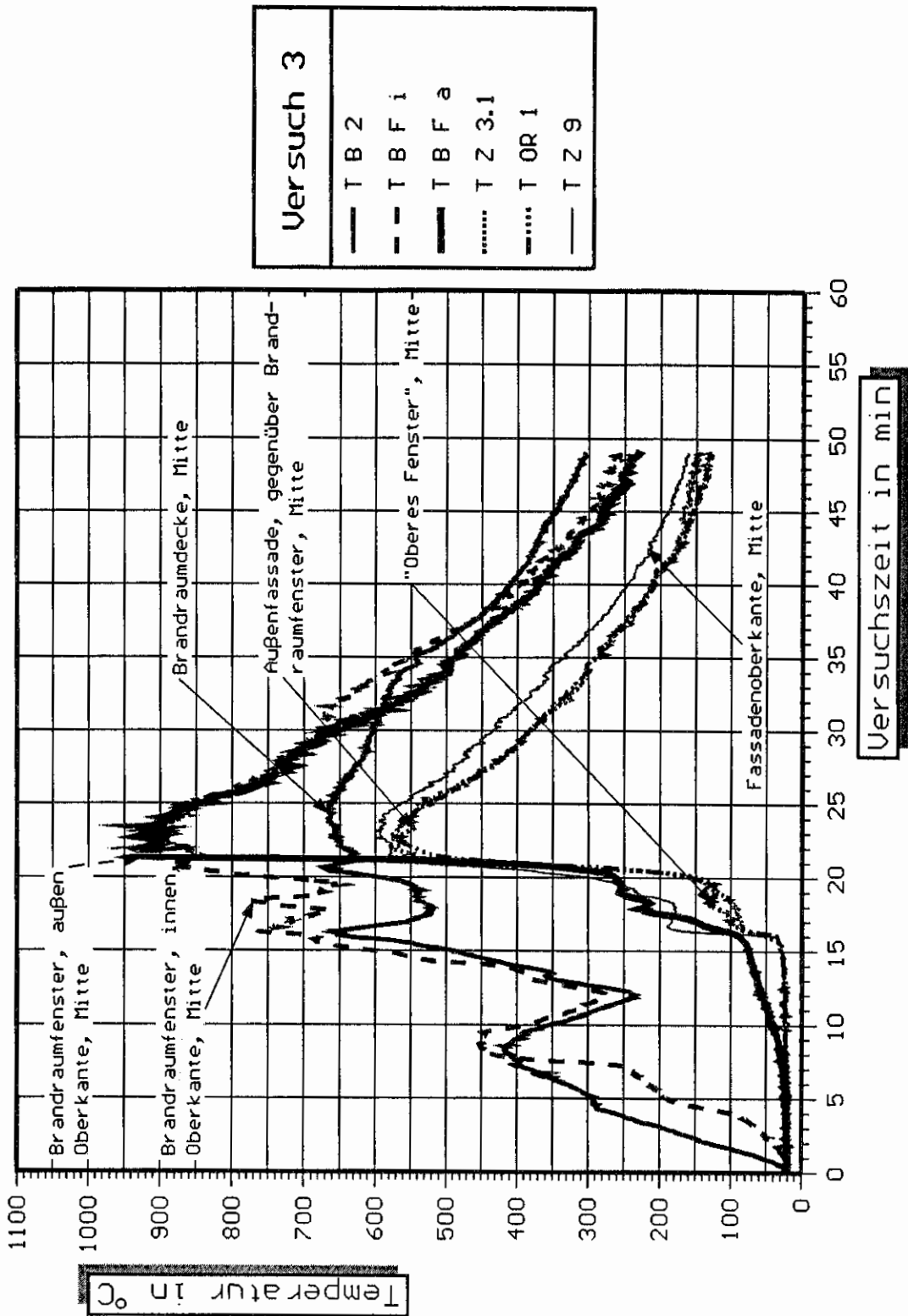


Bild 30 Vergleich ausgewählter zeitlicher Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich, Zwischenfassadenbereich, sowie an der Außenfassade.
 - Versuch 3 -

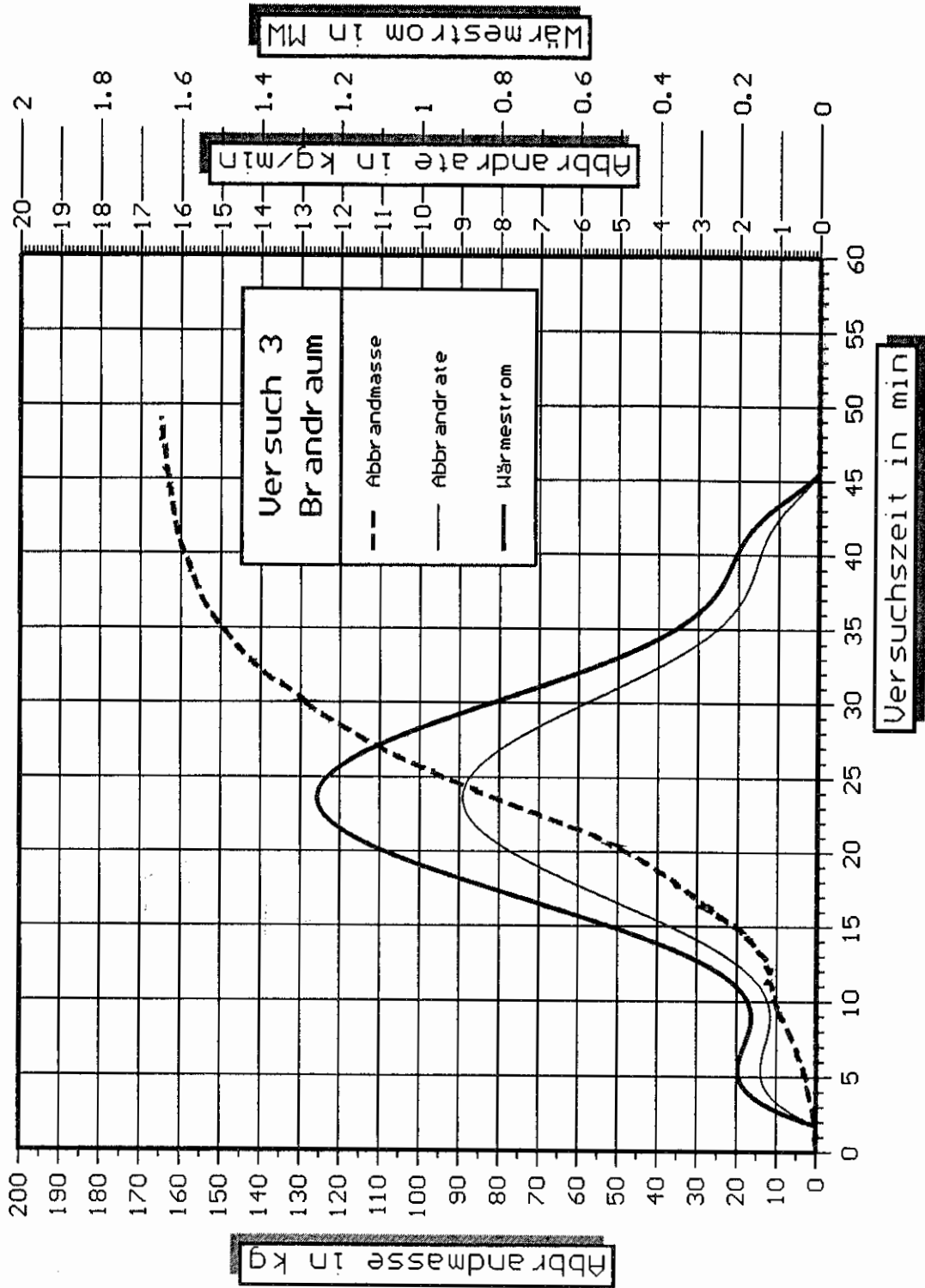


Bild 31 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung.
- Versuch 3 -

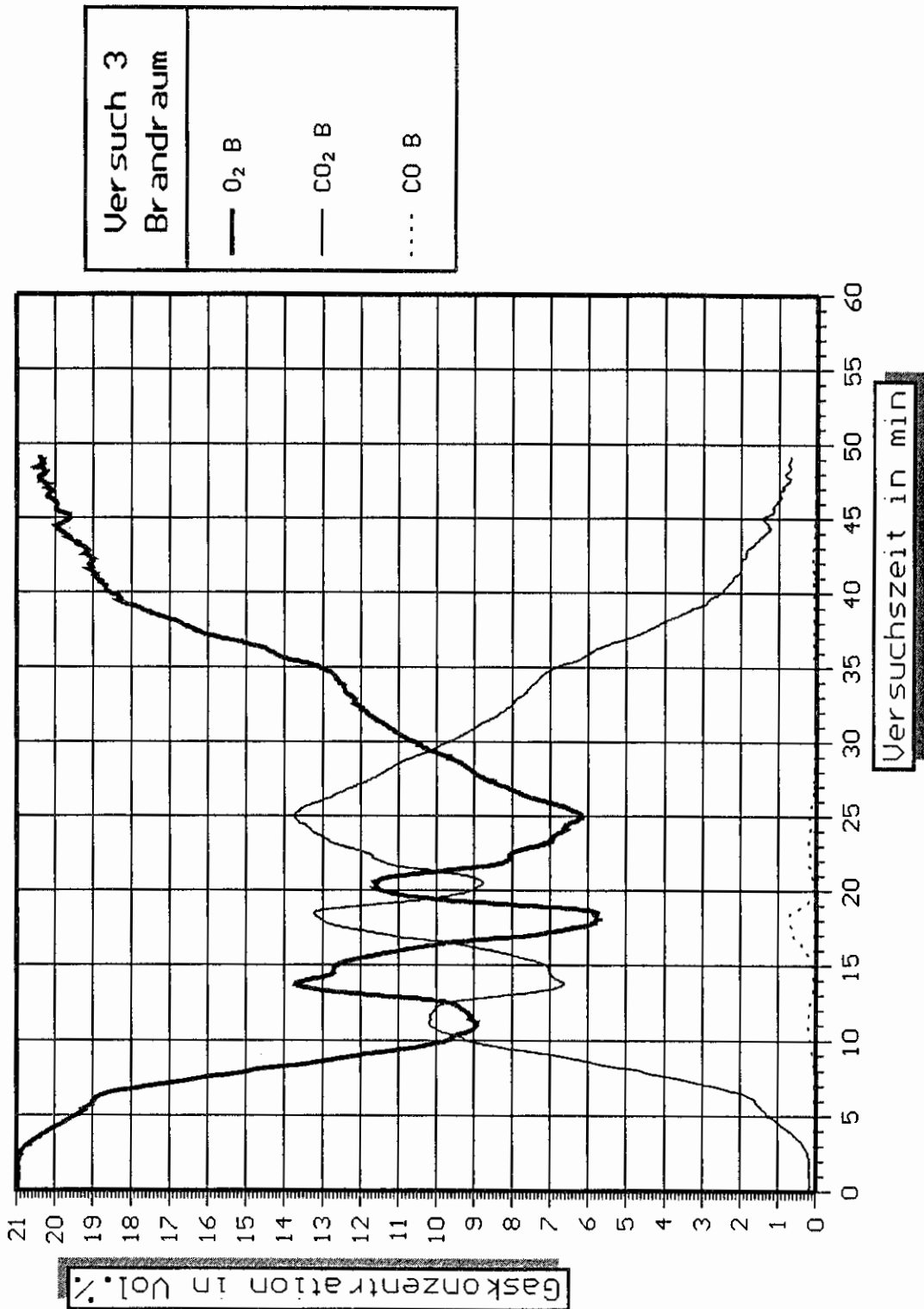


Bild 32 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.
- Versuch 3 -

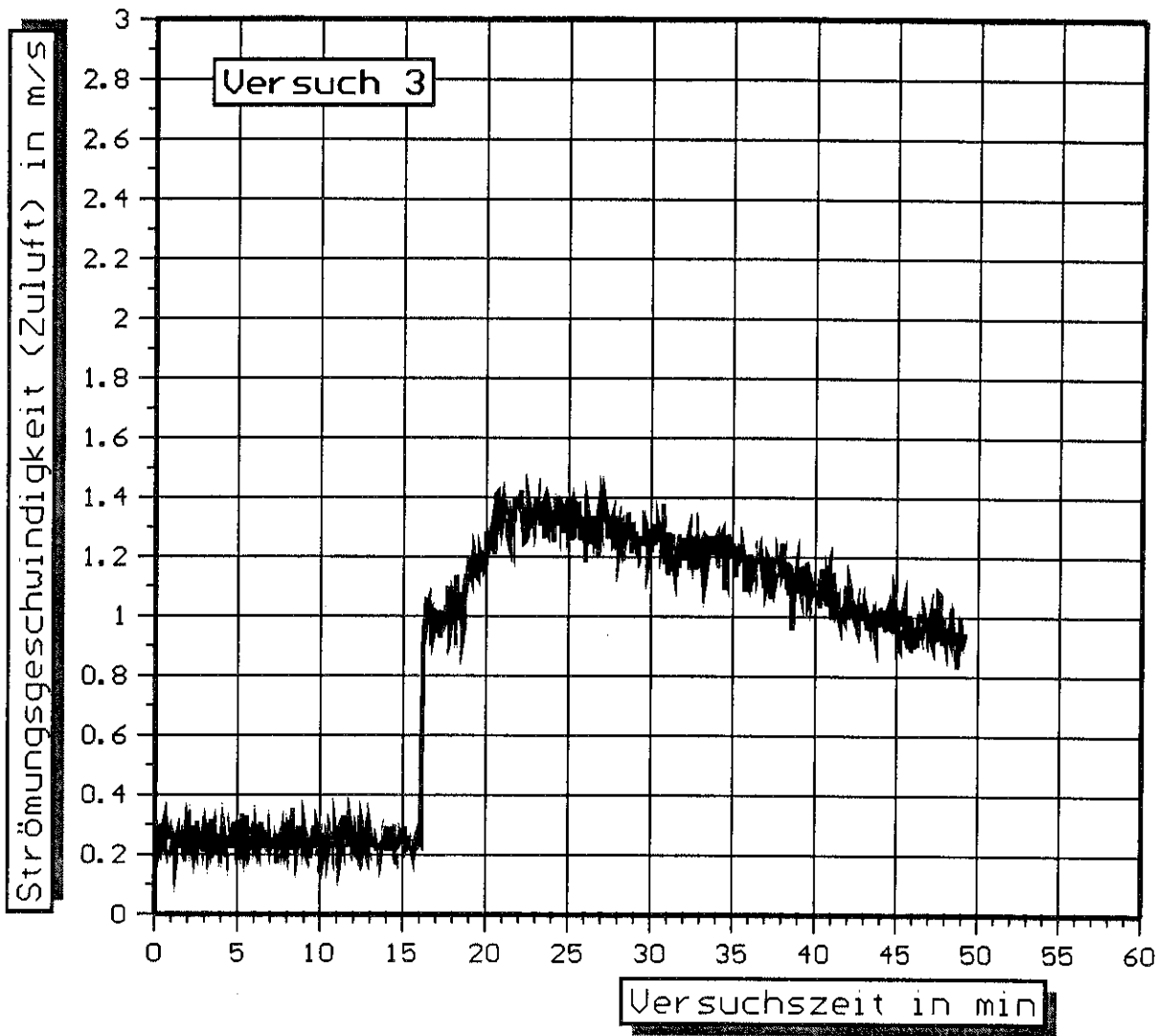


Bild 33 Zeitlicher Verlauf der Zuluftgeschwindigkeit an der Außenfassade.
- Versuch 3 -

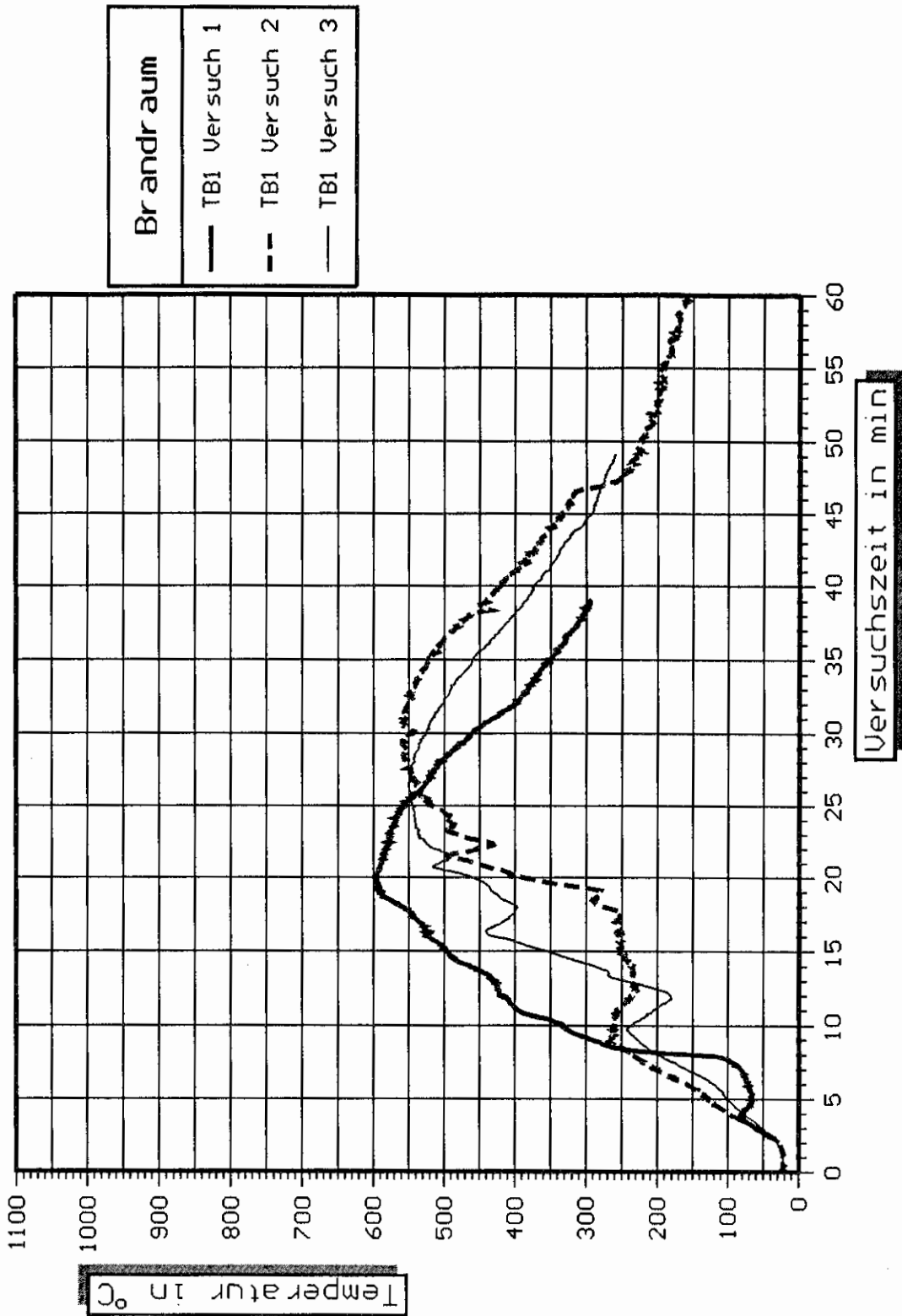


Bild 34 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TB1 im Brandraum bei den Versuchen 1, 2 und 3.

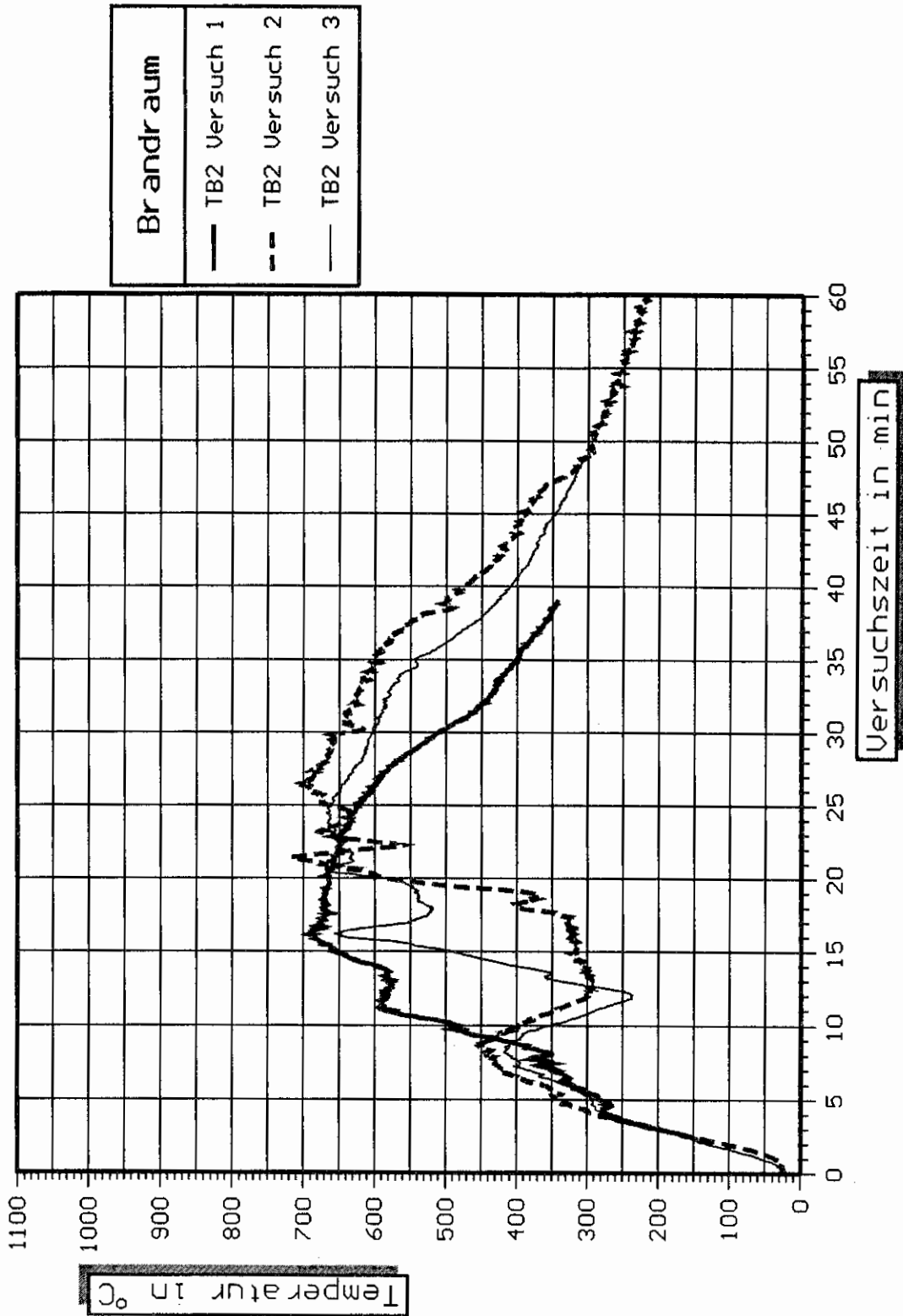


Bild 35 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TB2 im Brandraum bei den Versuchen 1, 2 und 3.

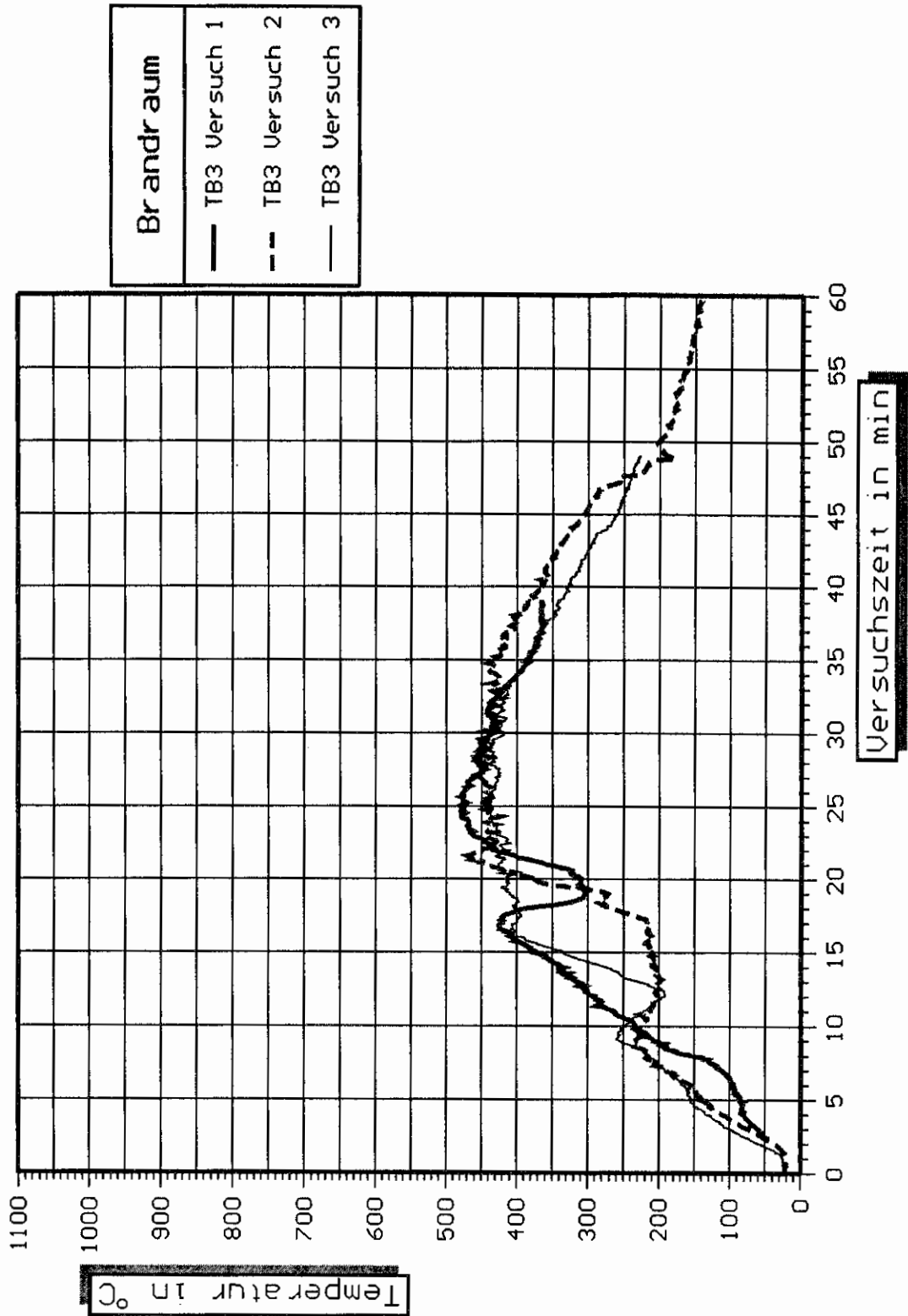


Bild 36 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TB3 im Brandraum bei den Versuchen 1, 2 und 3.

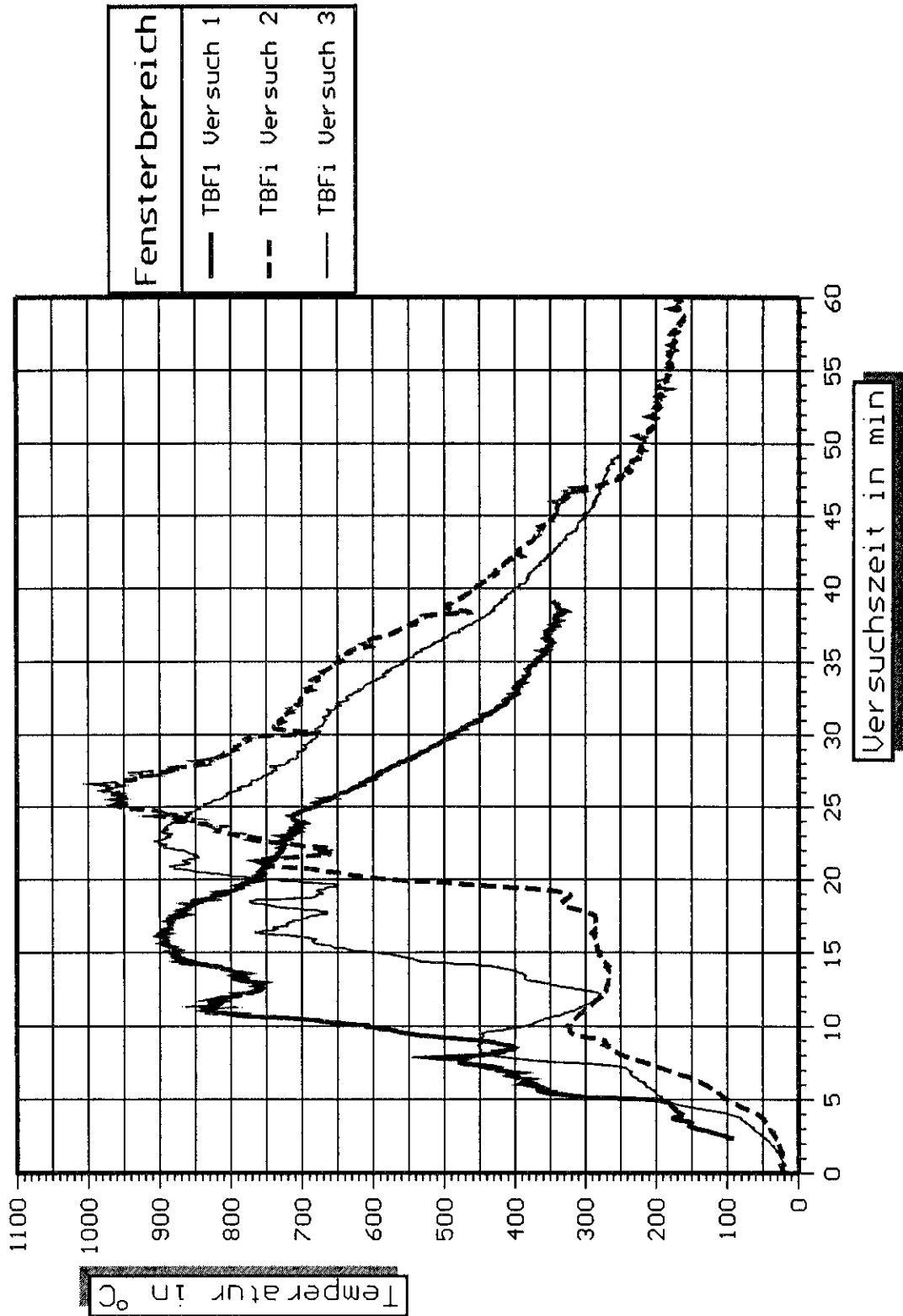


Bild 37 Zeitlicher Verlauf der Temperaturen TBF1 bzw. TBFi im Fensterbereich des Brandraumes bei den Versuchen 1, 2 und 3.

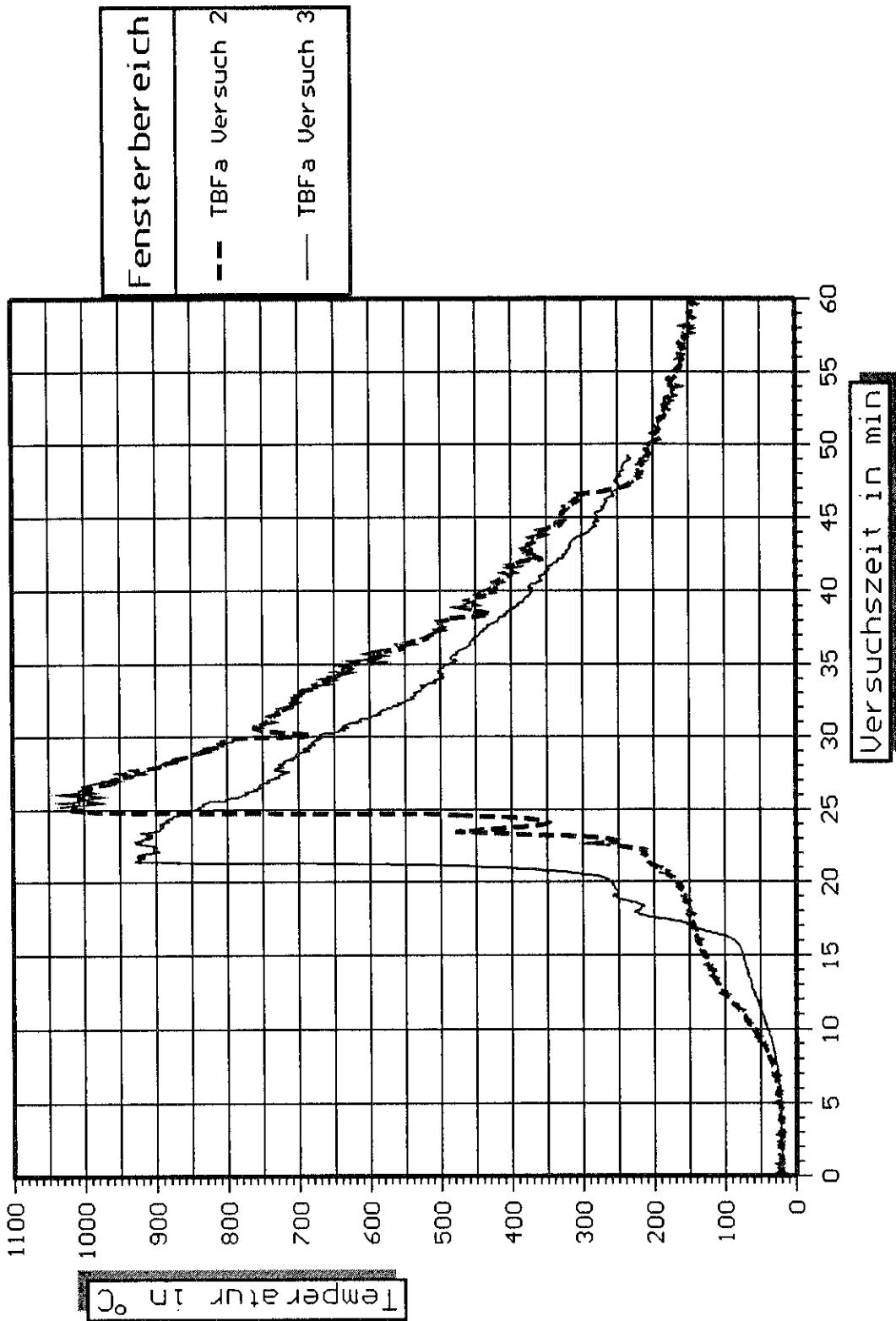


Bild 38 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TBFa im Fensterbereich des Brandraumes bei den Versuchen 2 und 3.

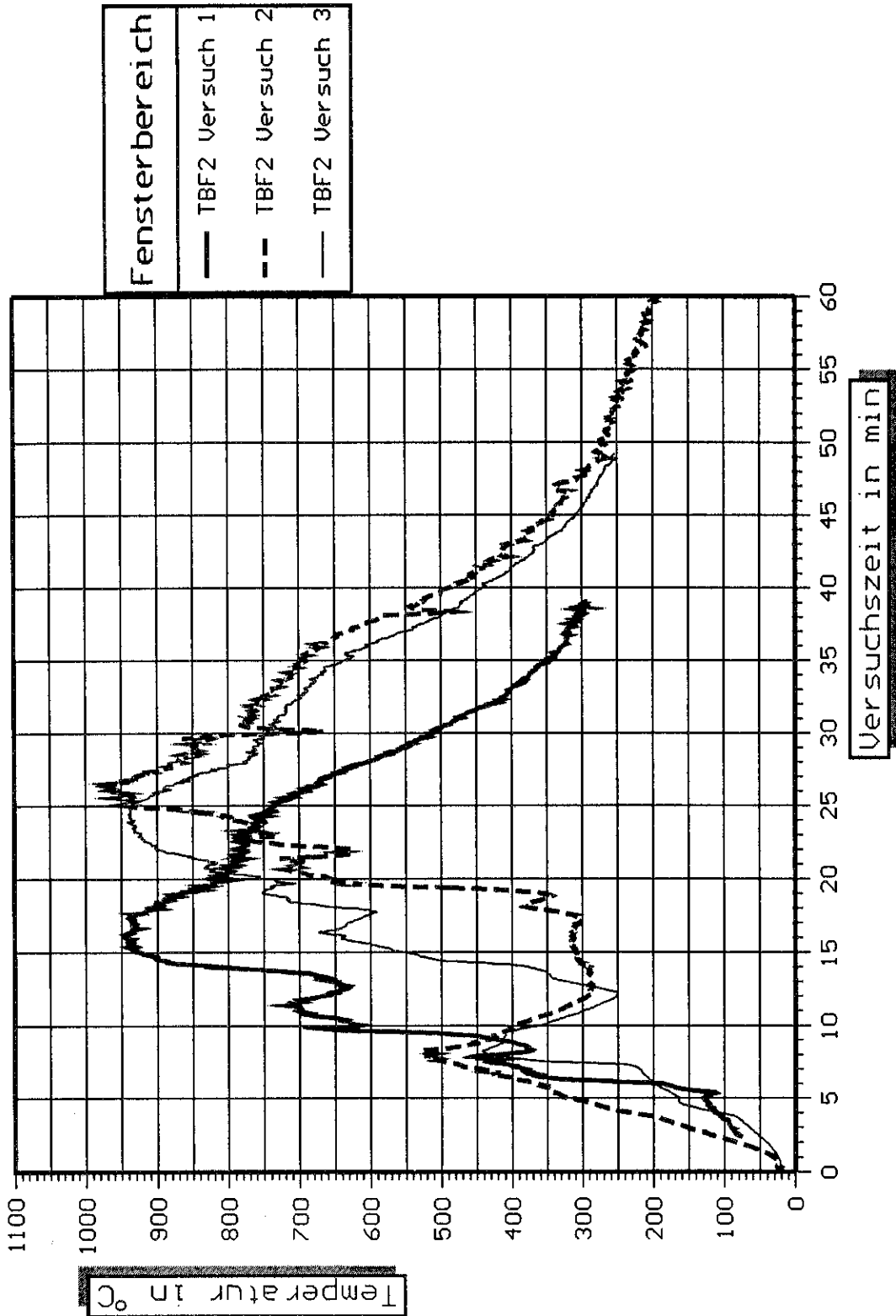


Bild 39 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TB F2 im Fensterbereich des Brandraumes bei den Versuchen 1, 2 und 3.

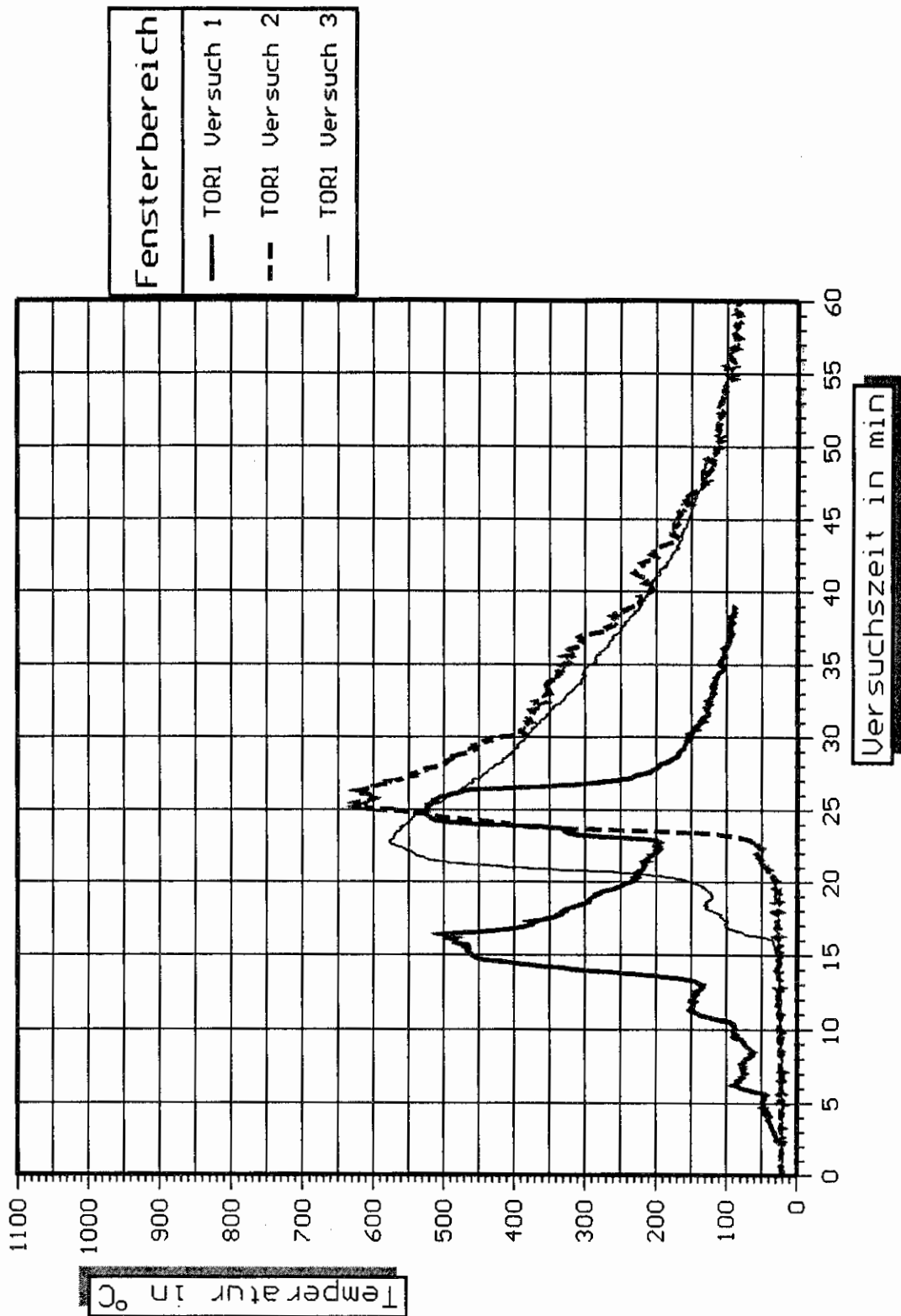


Bild 40 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TOR1 im Fensterbereich des "oberen Raumes" bei den Versuchen 1, 2 und 3.

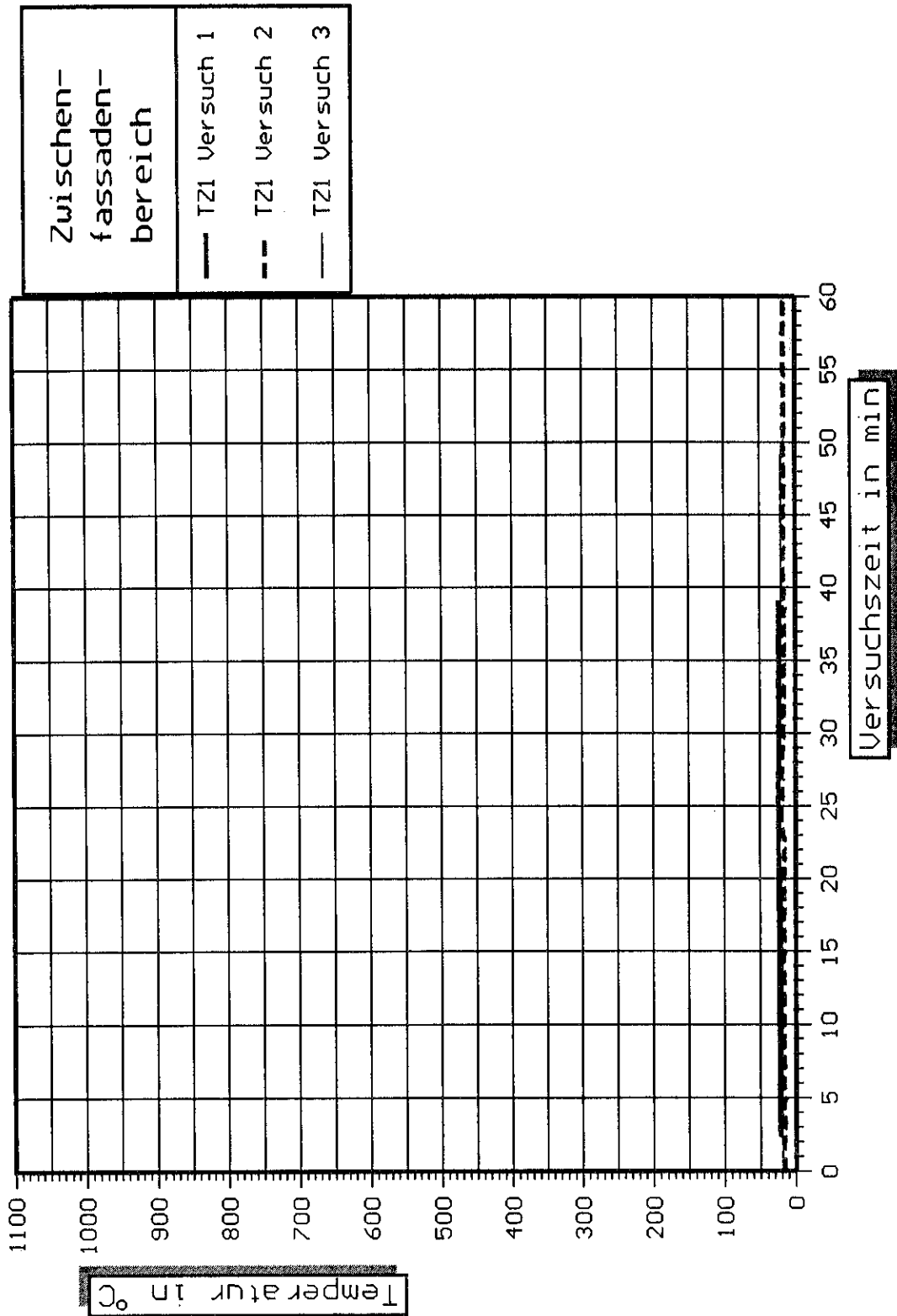


Bild 41 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TZ1 im Zwischenfassadenbereich bei den Versuchen 1, 2 und 3.

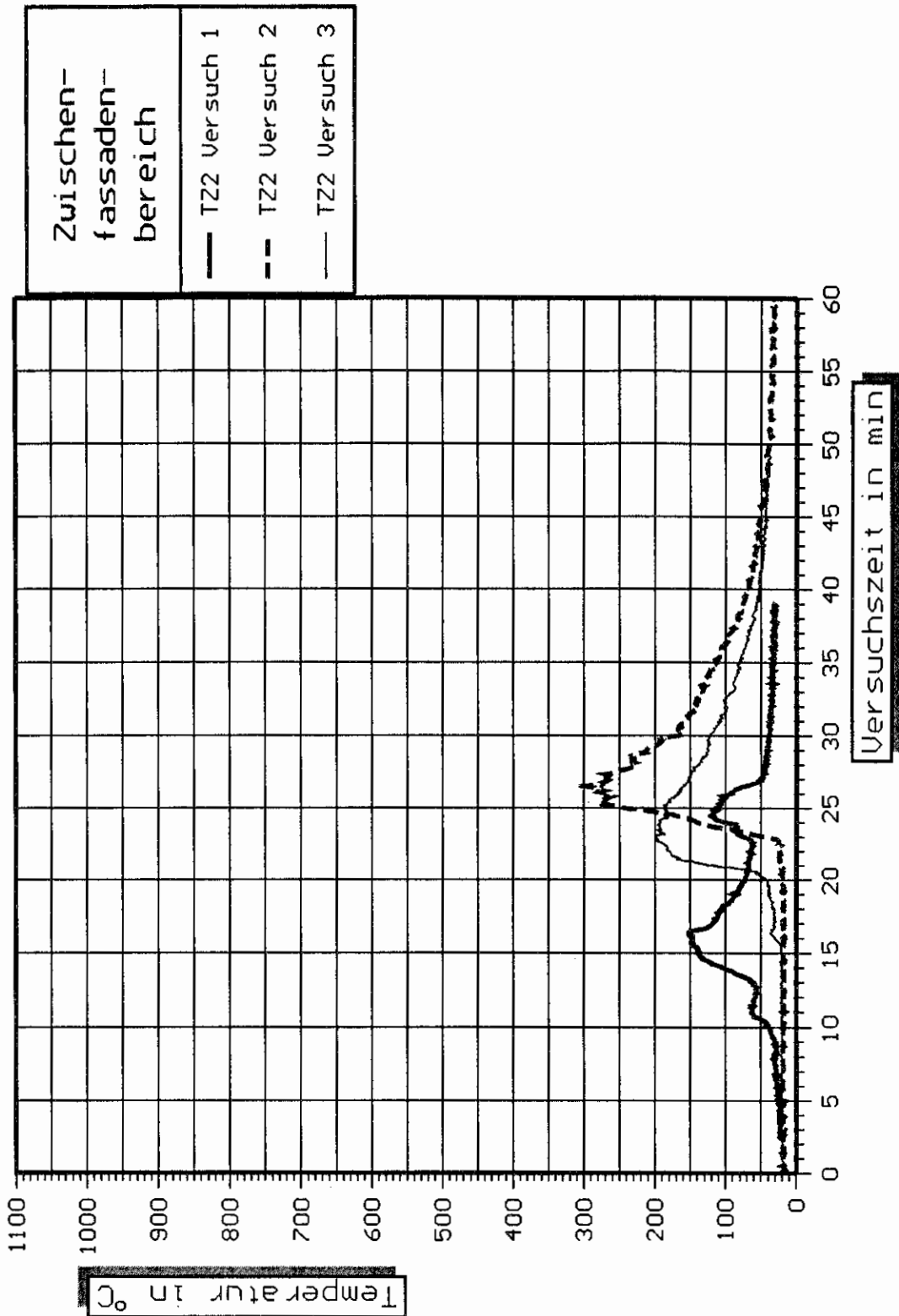


Bild 42 Zeitlicher Verlauf der Temperatur T22 im Zwischenfassadenbereich bei den Versuchen 1, 2 und 3.

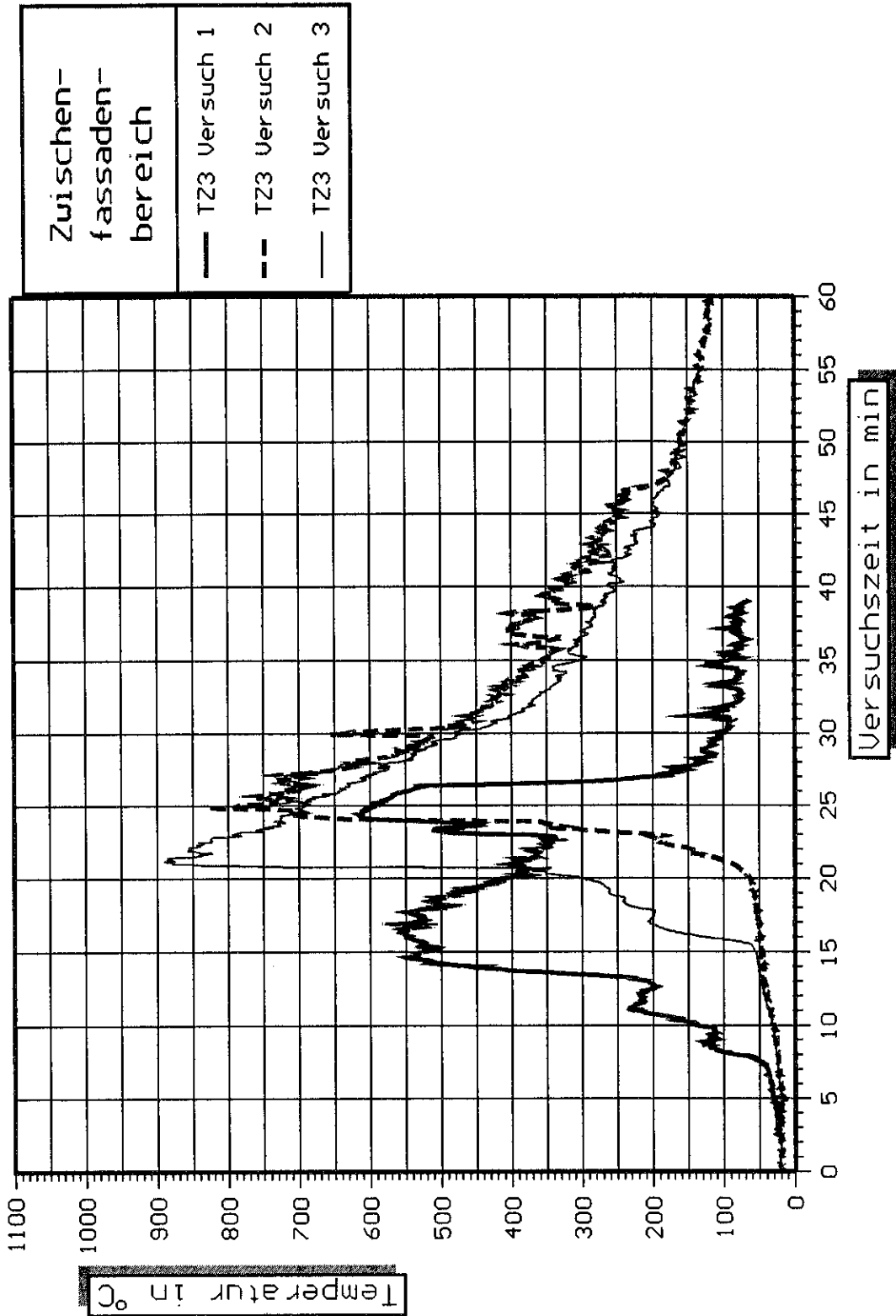


Bild 43 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TZ3 im Zwischenfassadenbereich bei den Versuchen 1, 2 und 3.

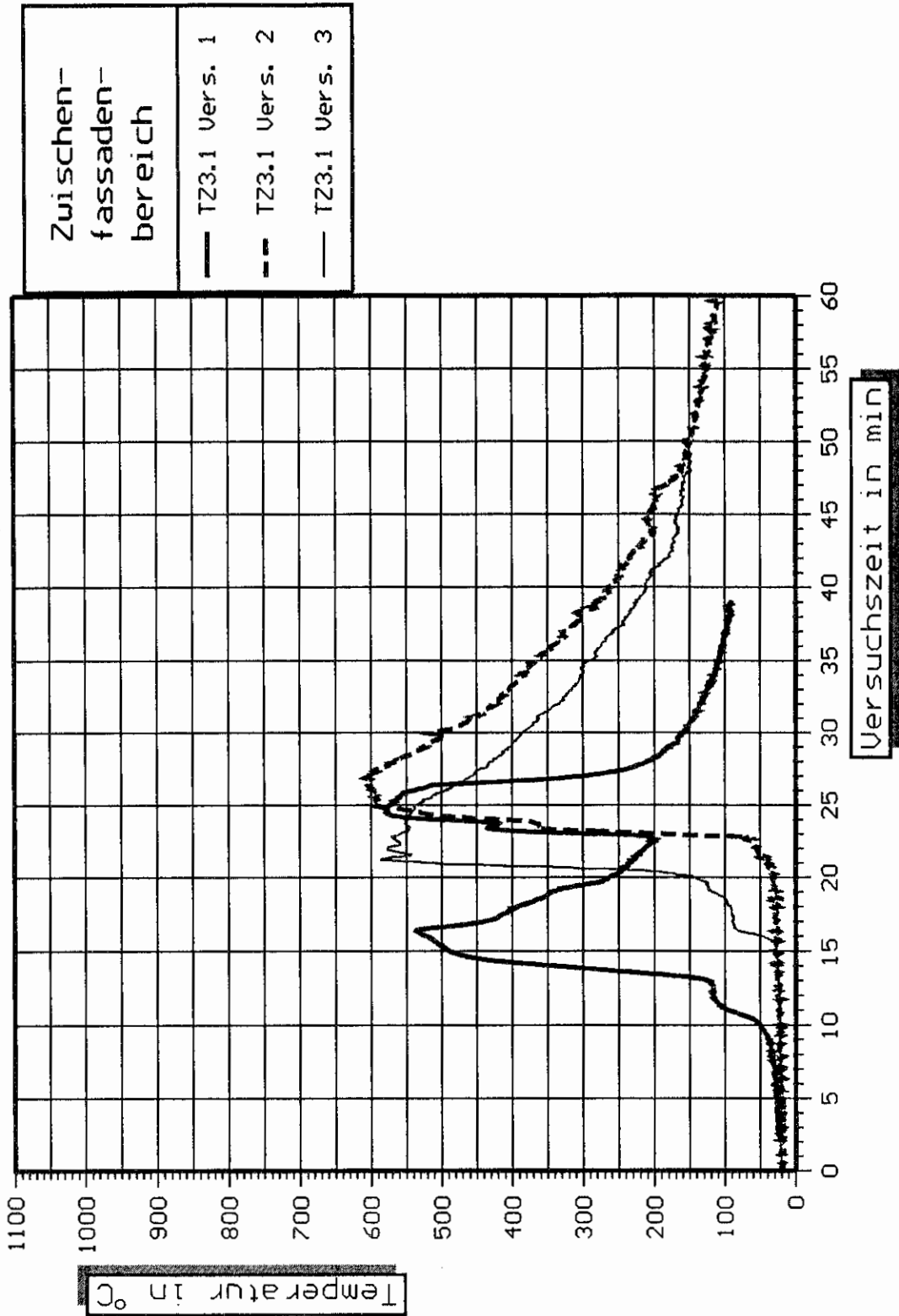


Bild 44 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TZ3.1 an der Außenfassade bei den Versuchen 1, 2 und 3.

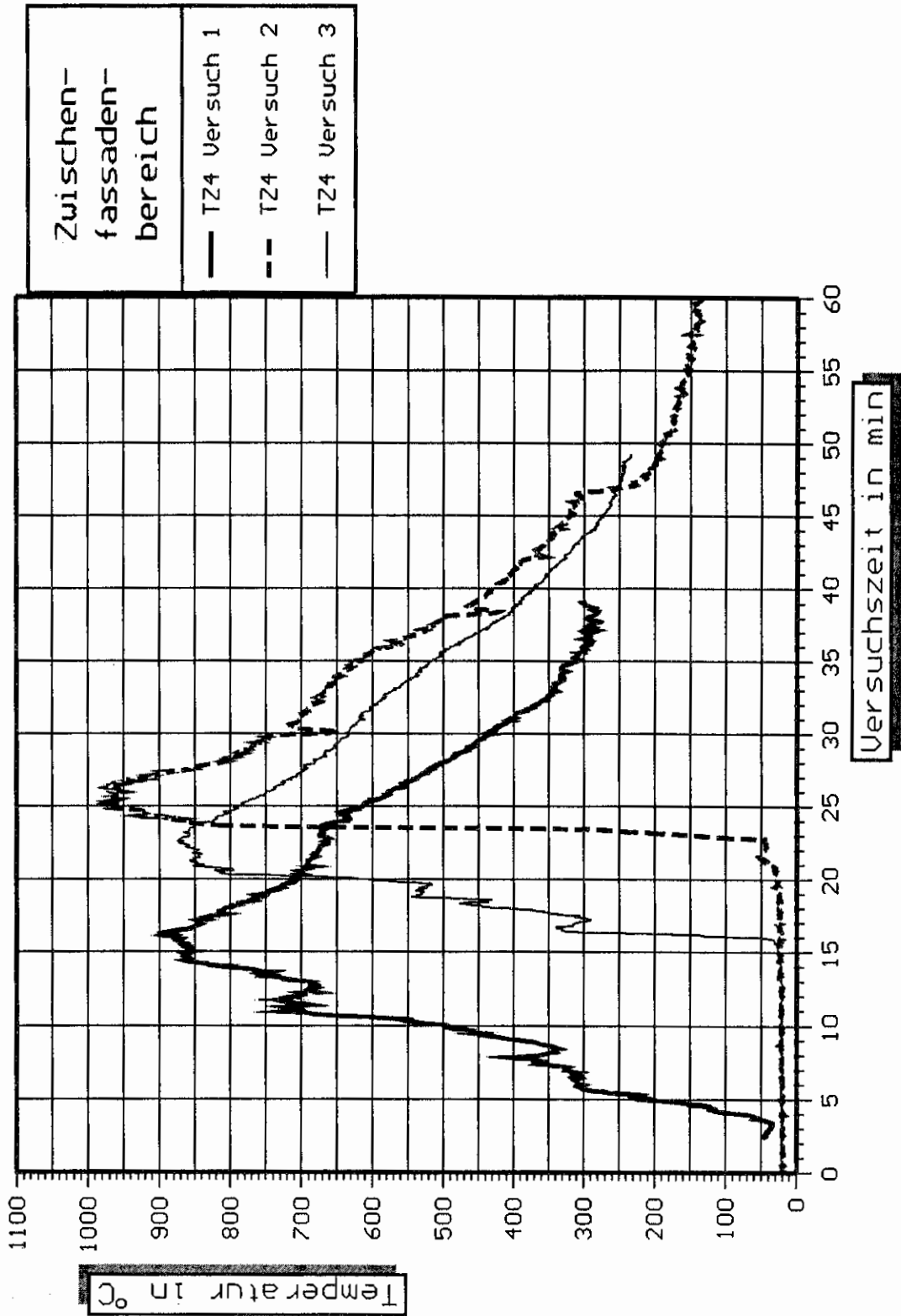


Bild 45 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TZ4 im Zwischenfassadenbereich bei den Versuchen 1, 2 und 3.

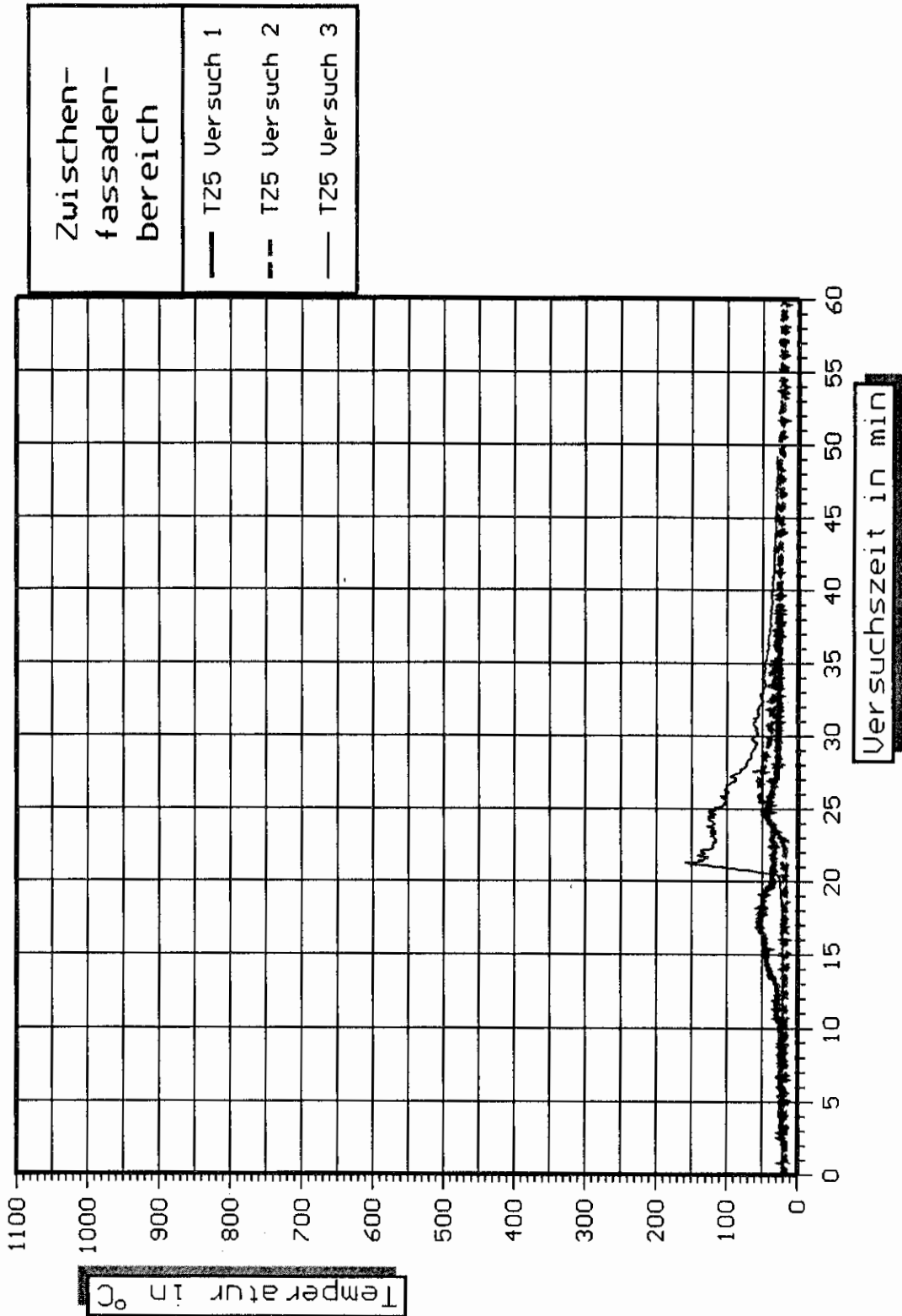


Bild 46 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TZ5 im Zwischenfassadenbereich bei den Versuchen 1, 2 und 3.

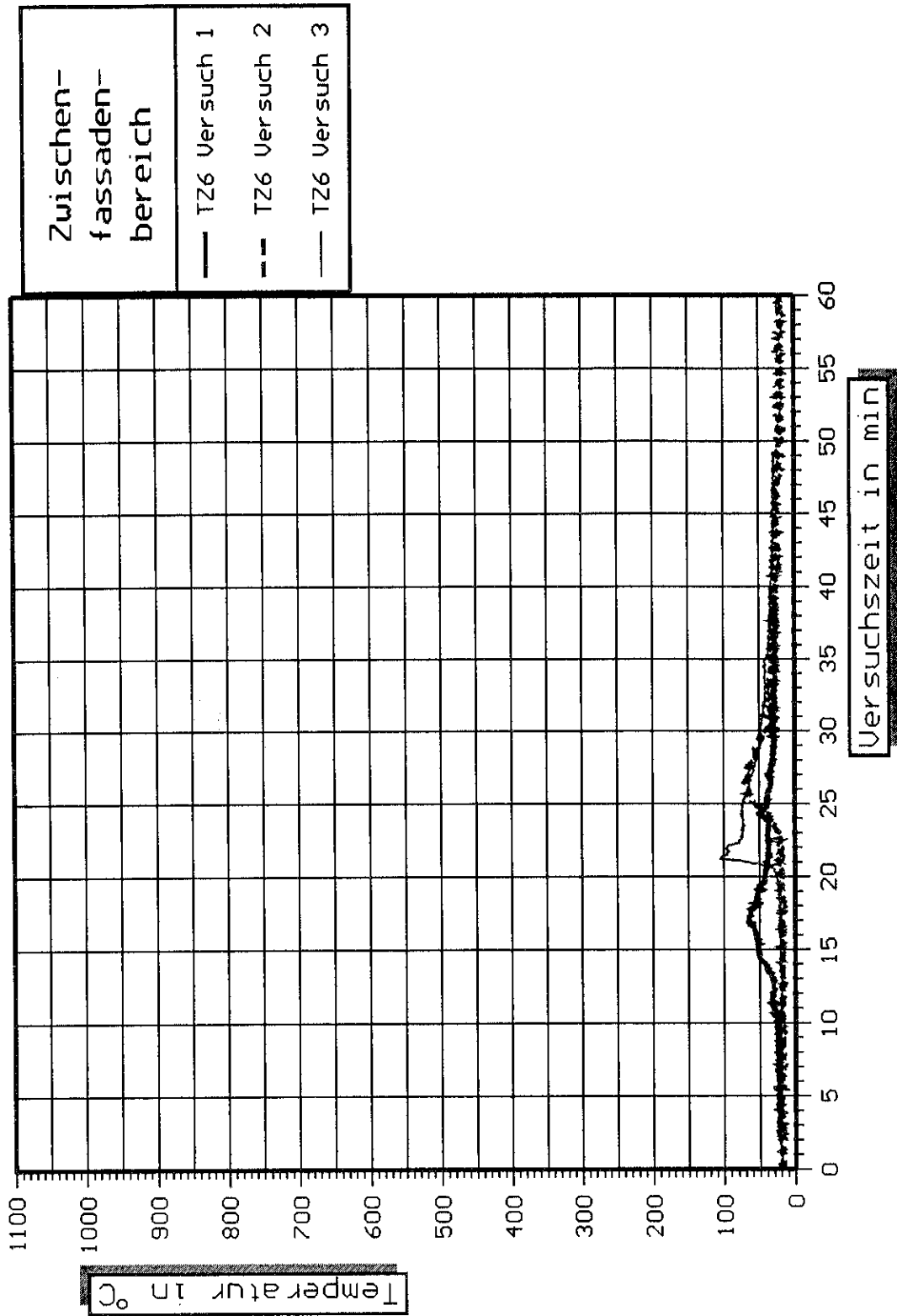


Bild 47 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TZ6 im Zwischenfassadenbereich bei den Versuchen 1, 2 und 3.

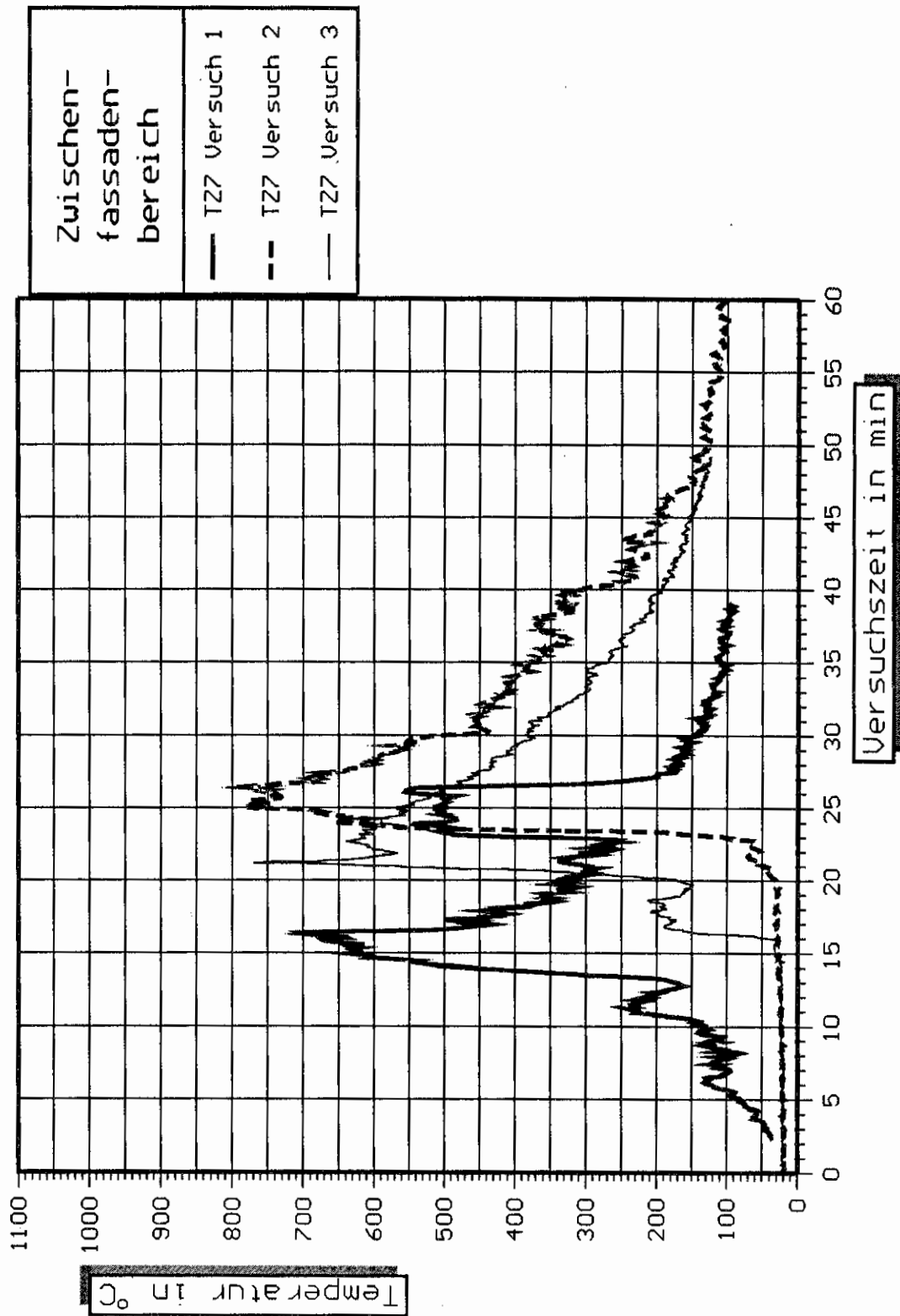


Bild 48 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TZ7 im Zwischenfassadenbereich bei den Versuchen 1, 2 und 3.

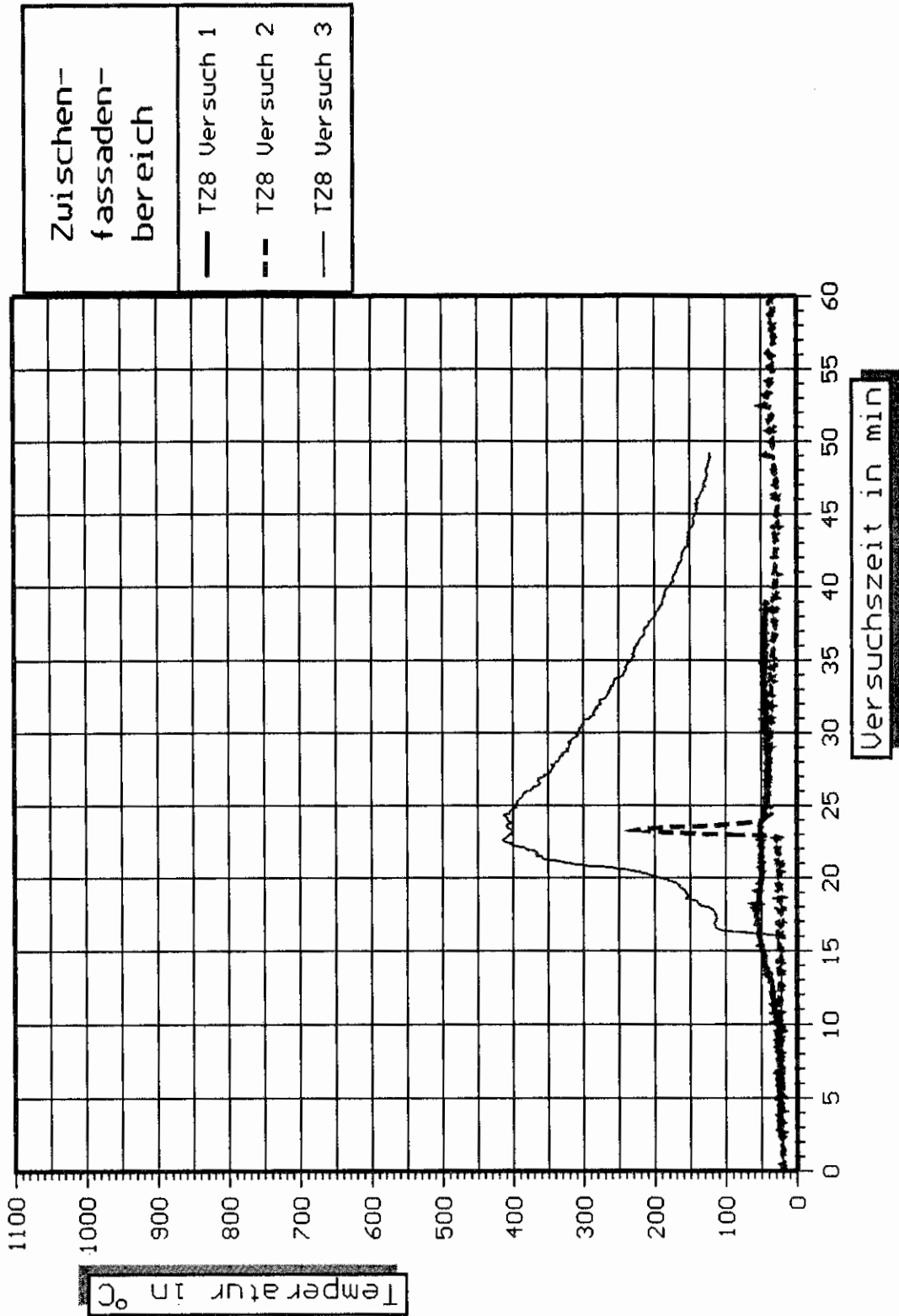


Bild 49 Zeitlicher Verlauf der Temperatur T28 im Zwischenfassadenbereich bei den Versuchen 1, 2 und 3.

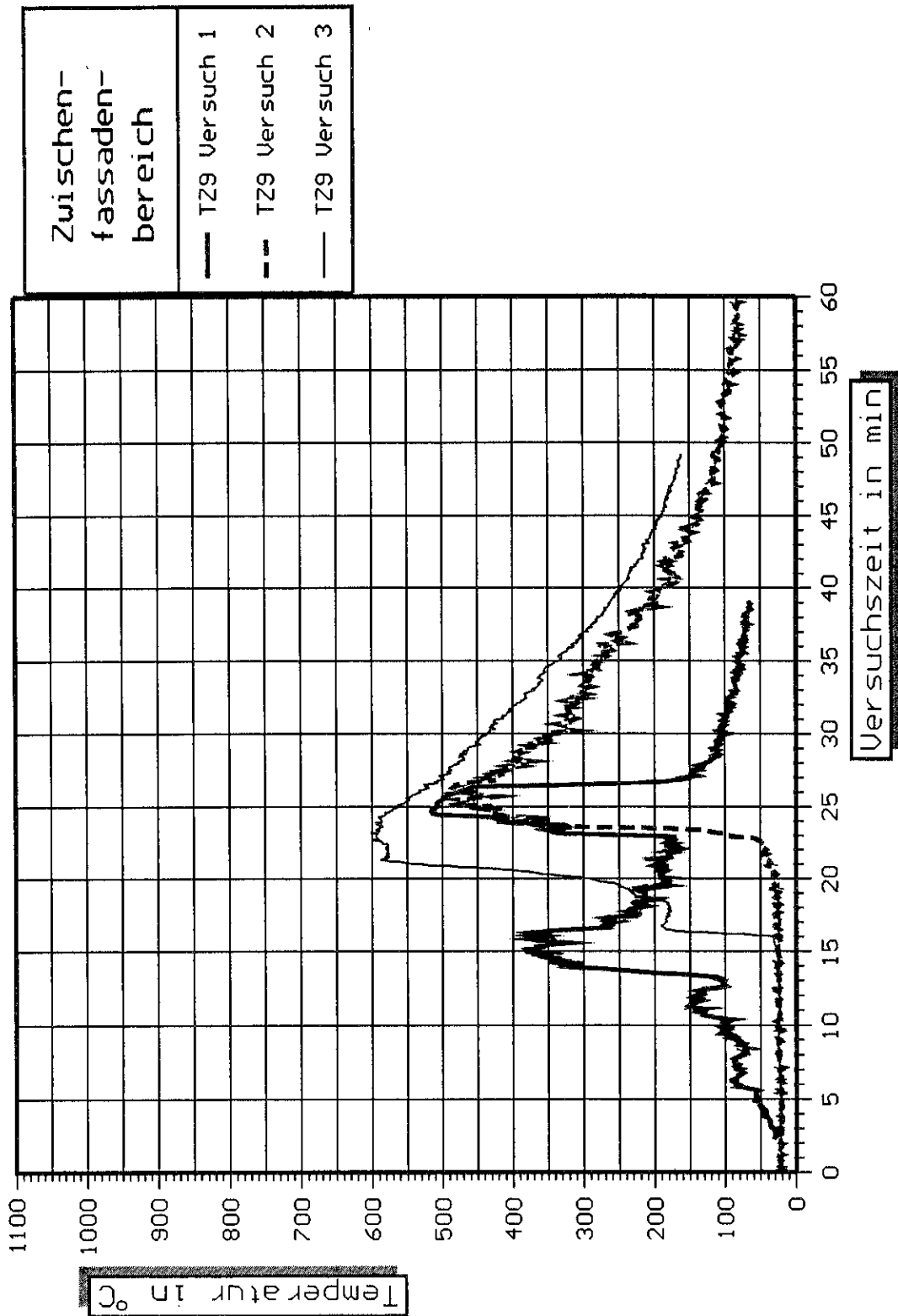


Bild 50 Zeitlicher Verlauf der Temperatur T29 im Zwischenfassadenbereich bei den Versuchen 1, 2 und 3.

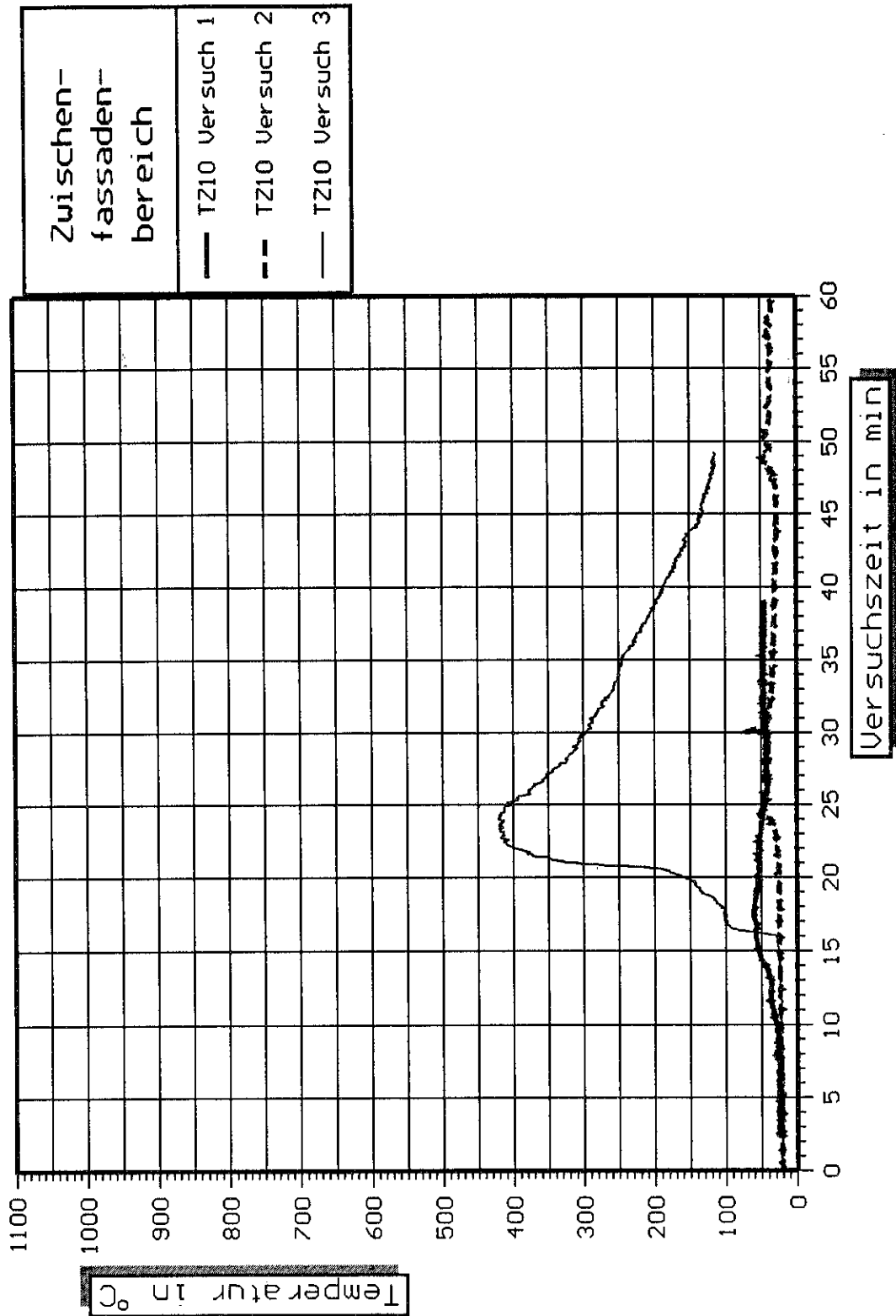


Bild 51 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TZ10 im Zwischenfassadenbereich bei den Versuchen 1, 2 und 3.

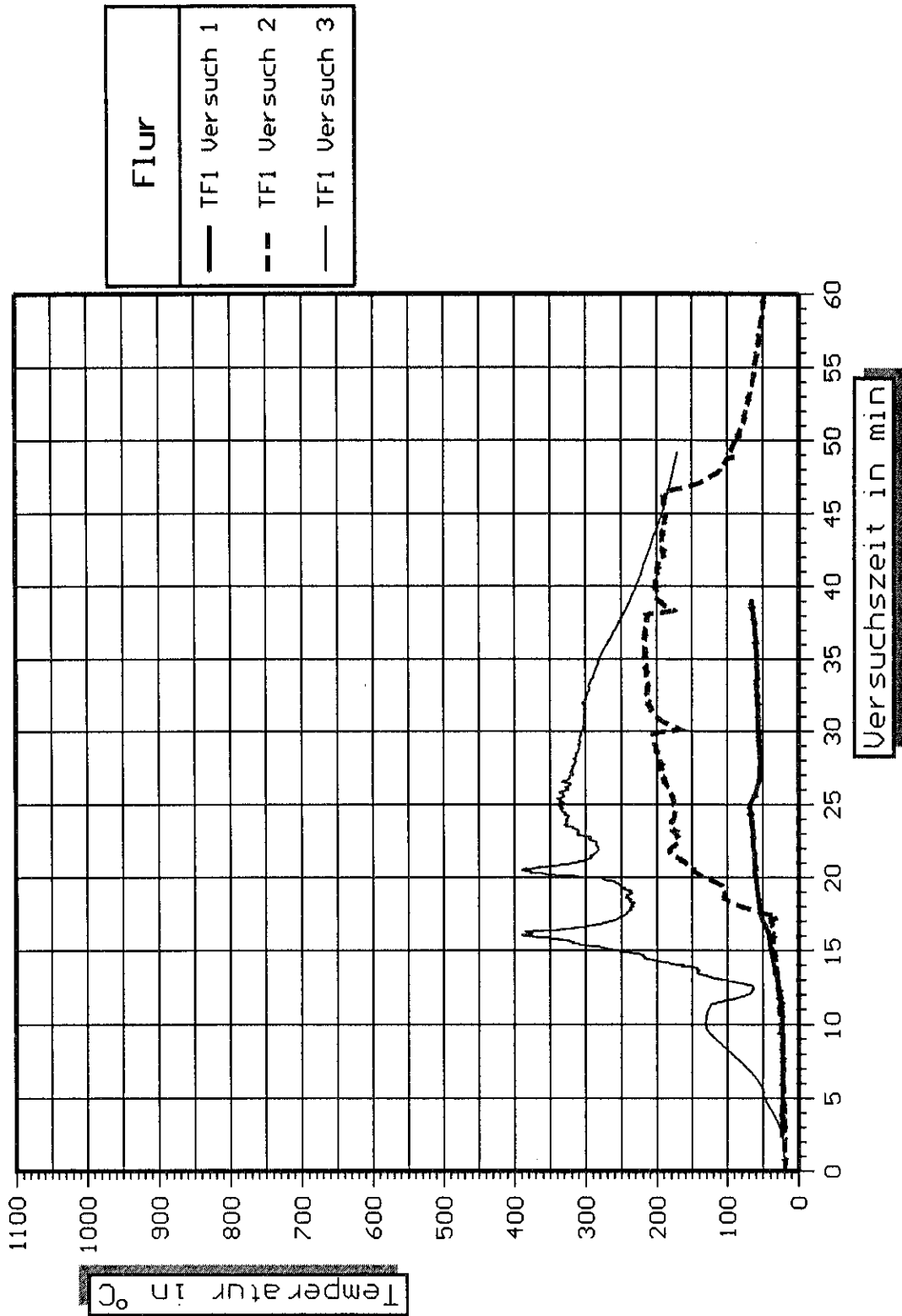


Bild 52 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TF1 im Flur bei den Versuchen 1, 2 und 3.

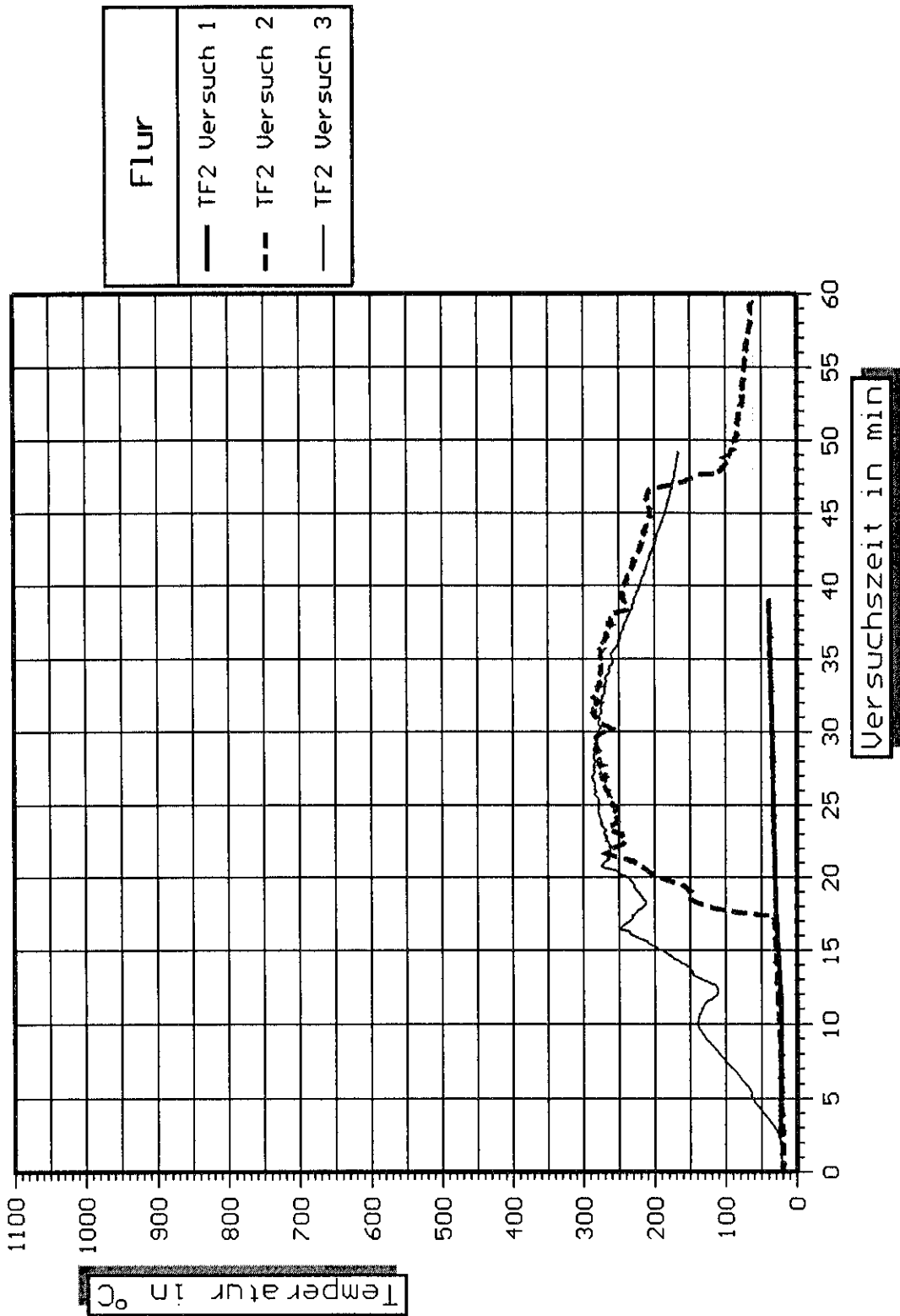


Bild 53 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TF2 im Flur bei den Versuchen 1, 2 und 3.

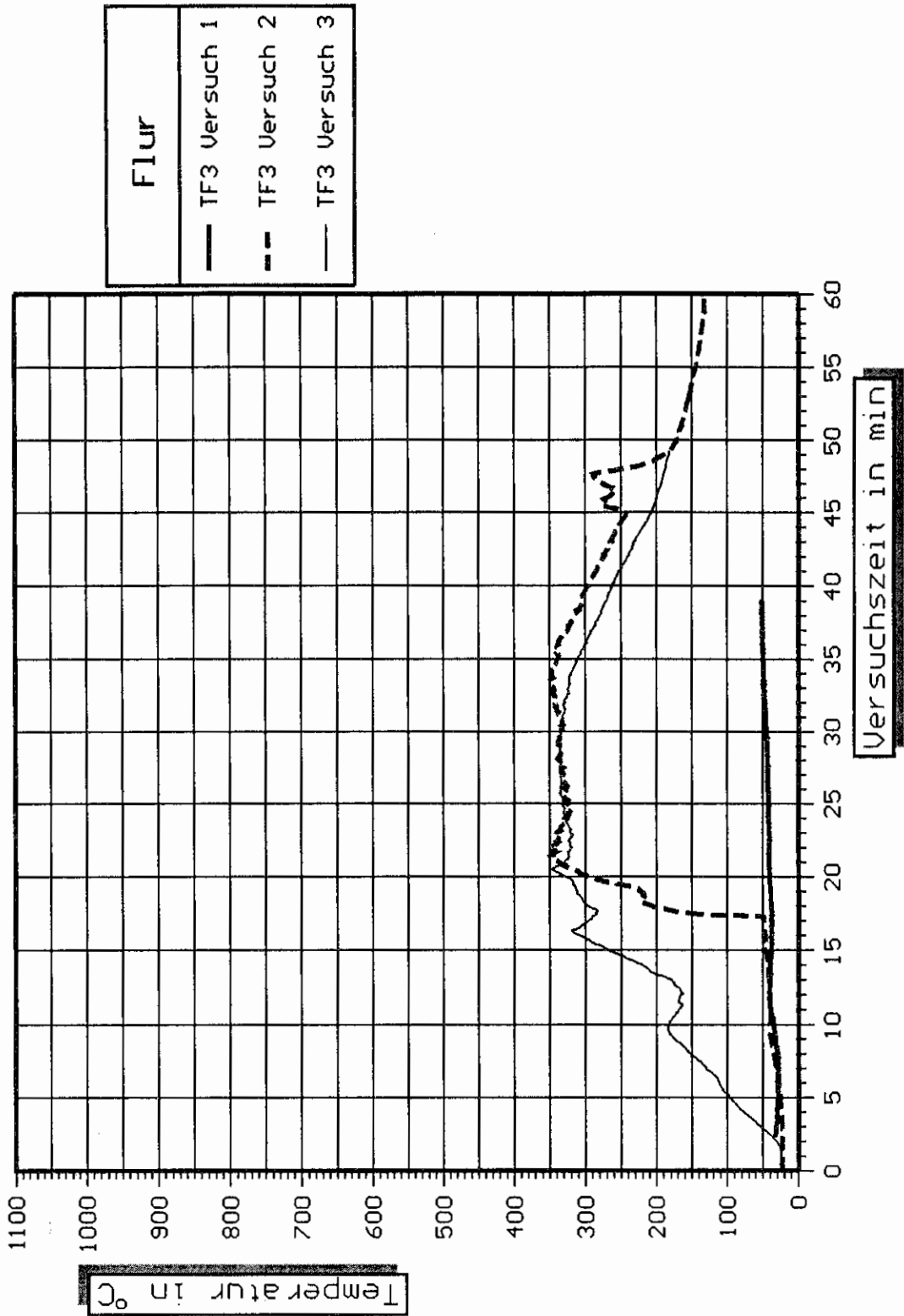


Bild 54 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TF3 im Flur bei den Versuchen 1, 2 und 3.

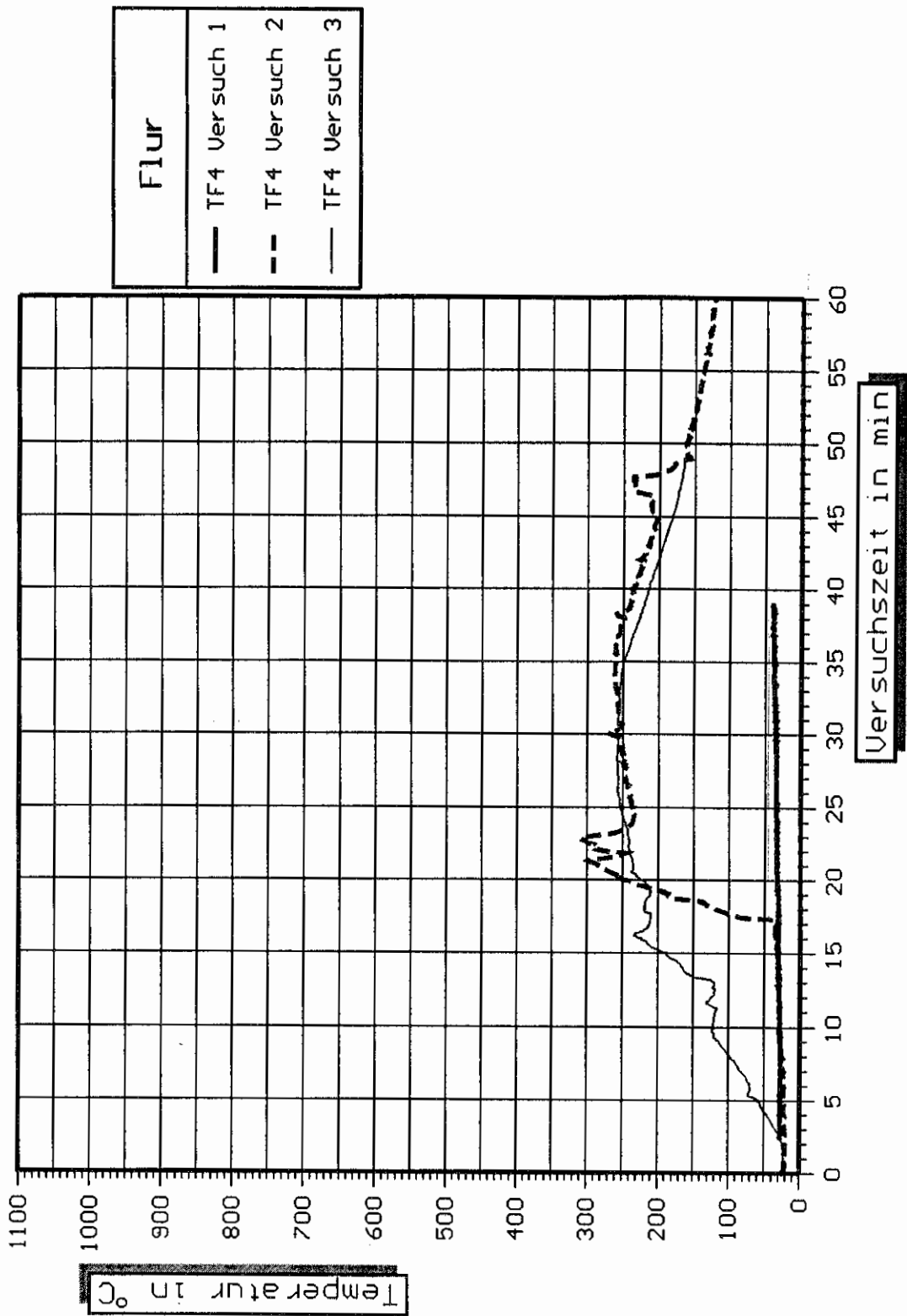


Bild 55 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TF4 im Flur bei den Versuchen 1, 2 und 3.

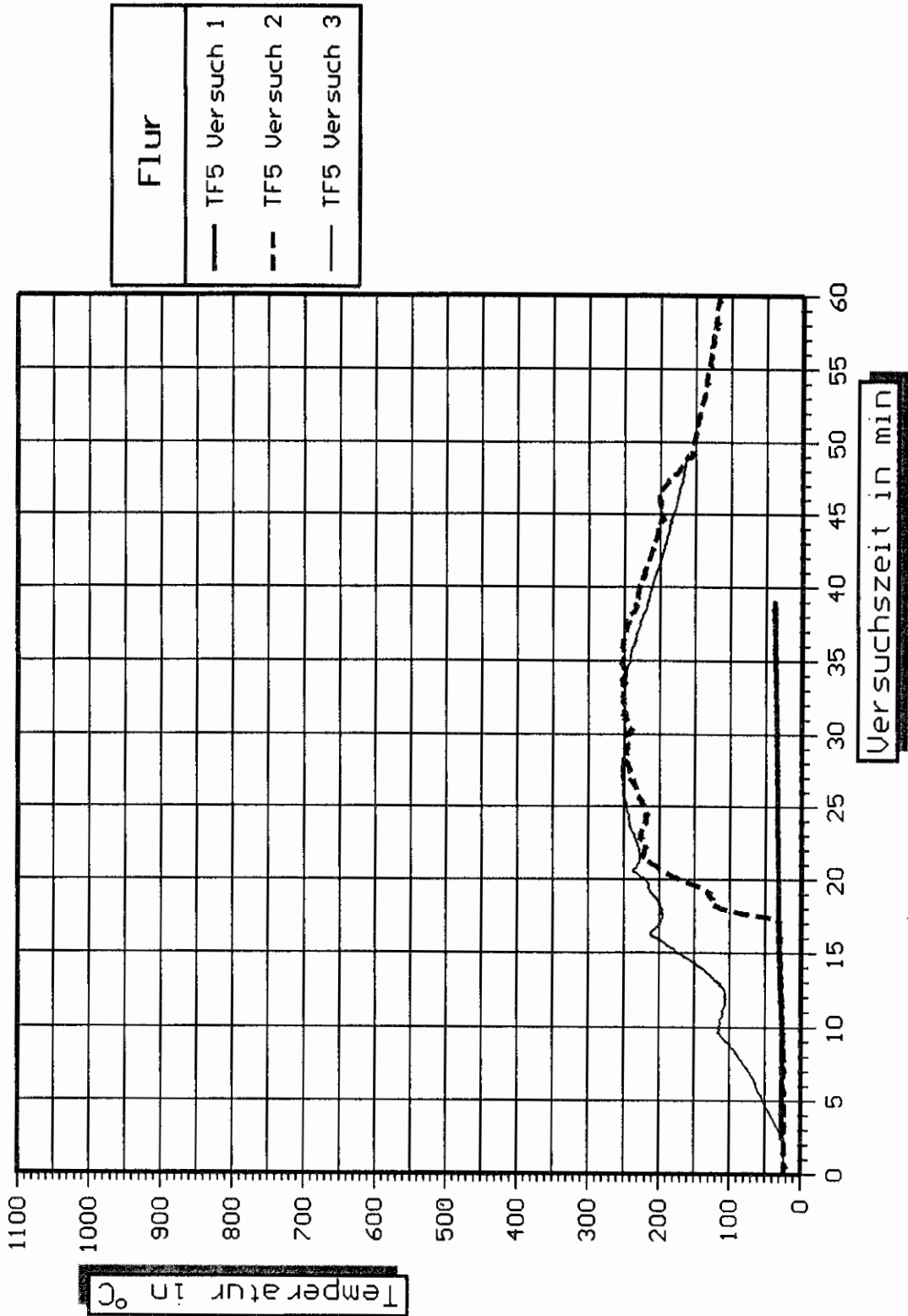


Bild 56 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TF5 im Flur bei den Versuchen 1, 2 und 3.

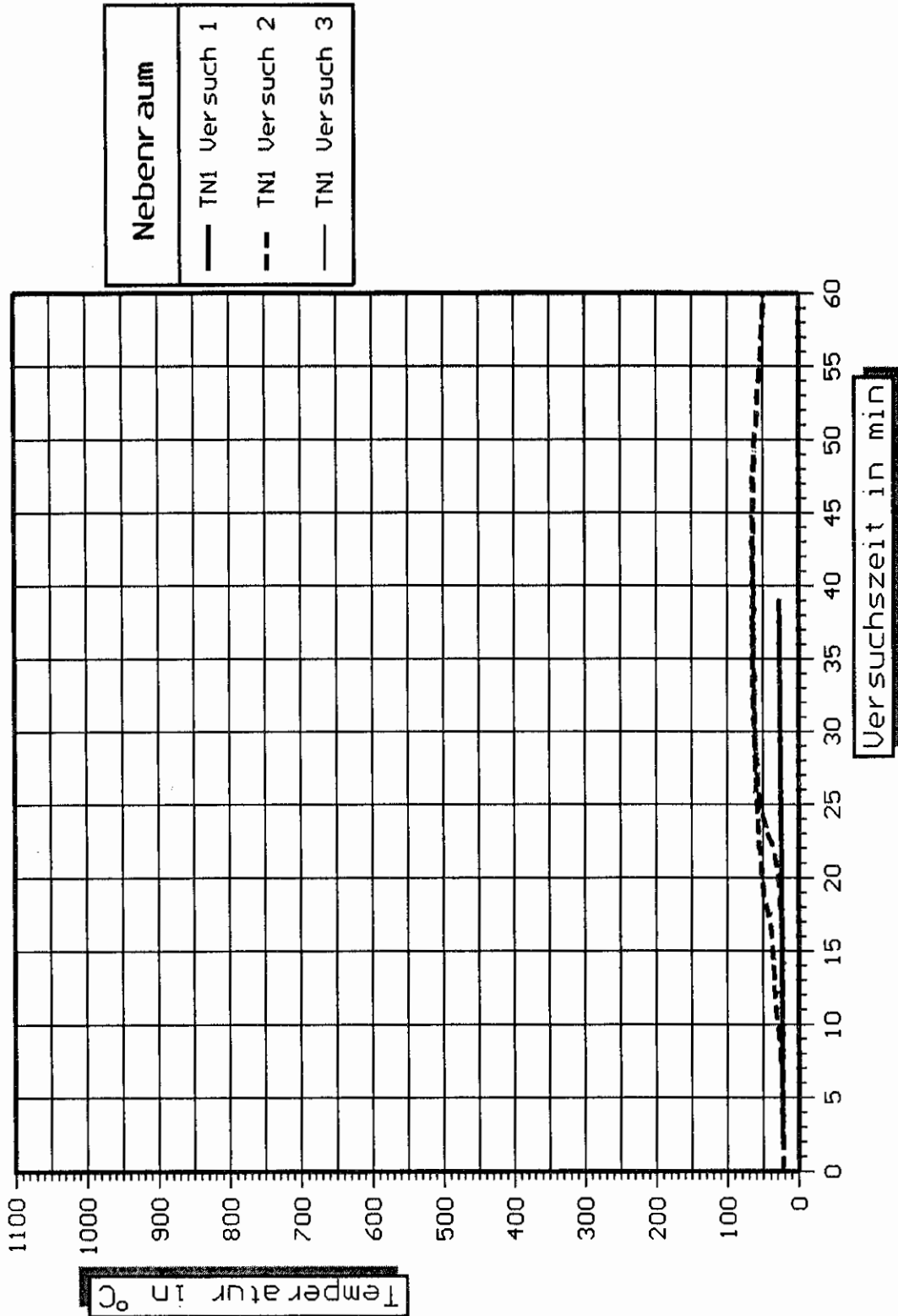


Bild 57 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TN1 im Nebenraum bei den Versuchen 1, 2 und 3.

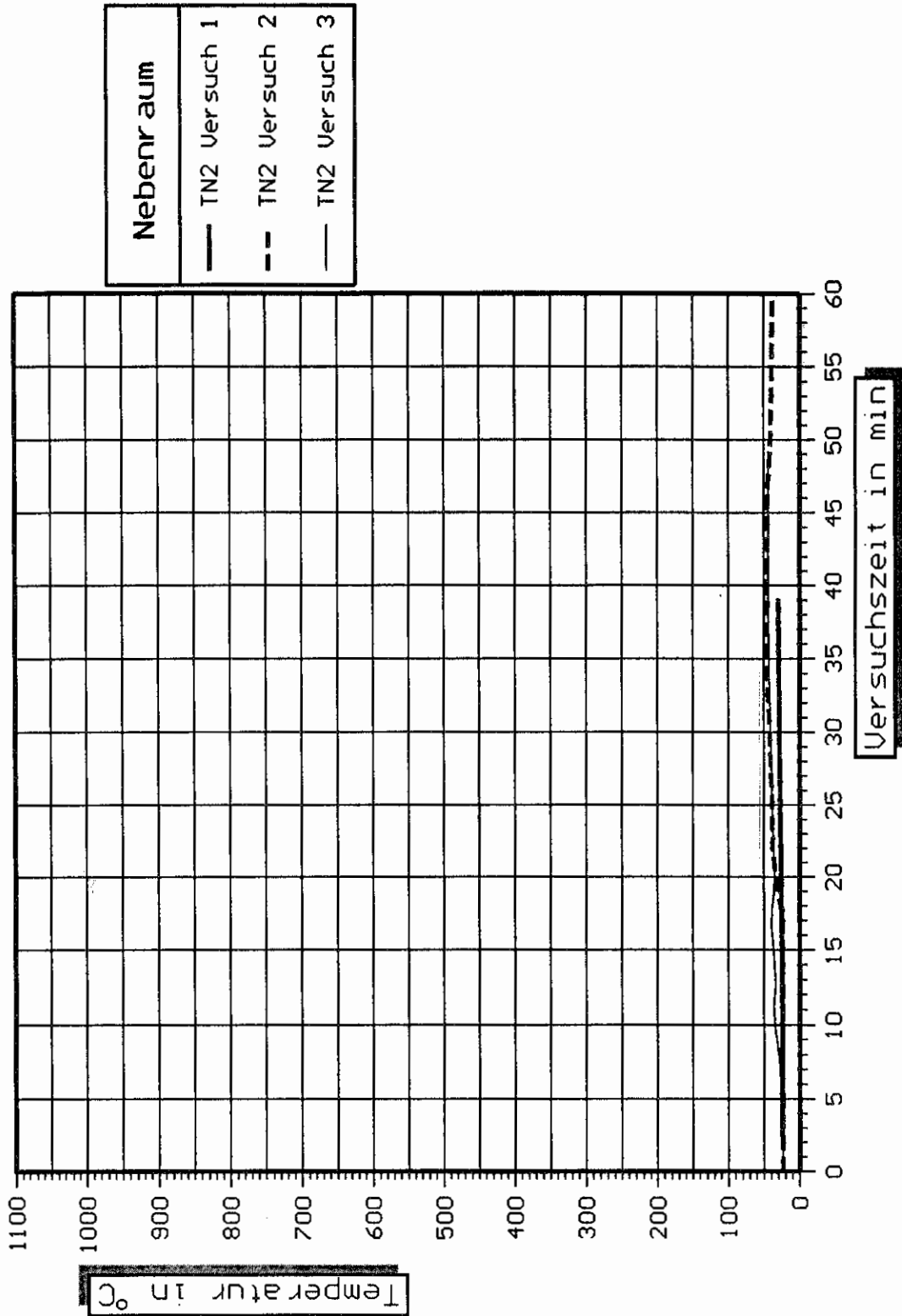


Bild 58 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TN2 im Nebenraum bei den Versuchen 1, 2 und 3.

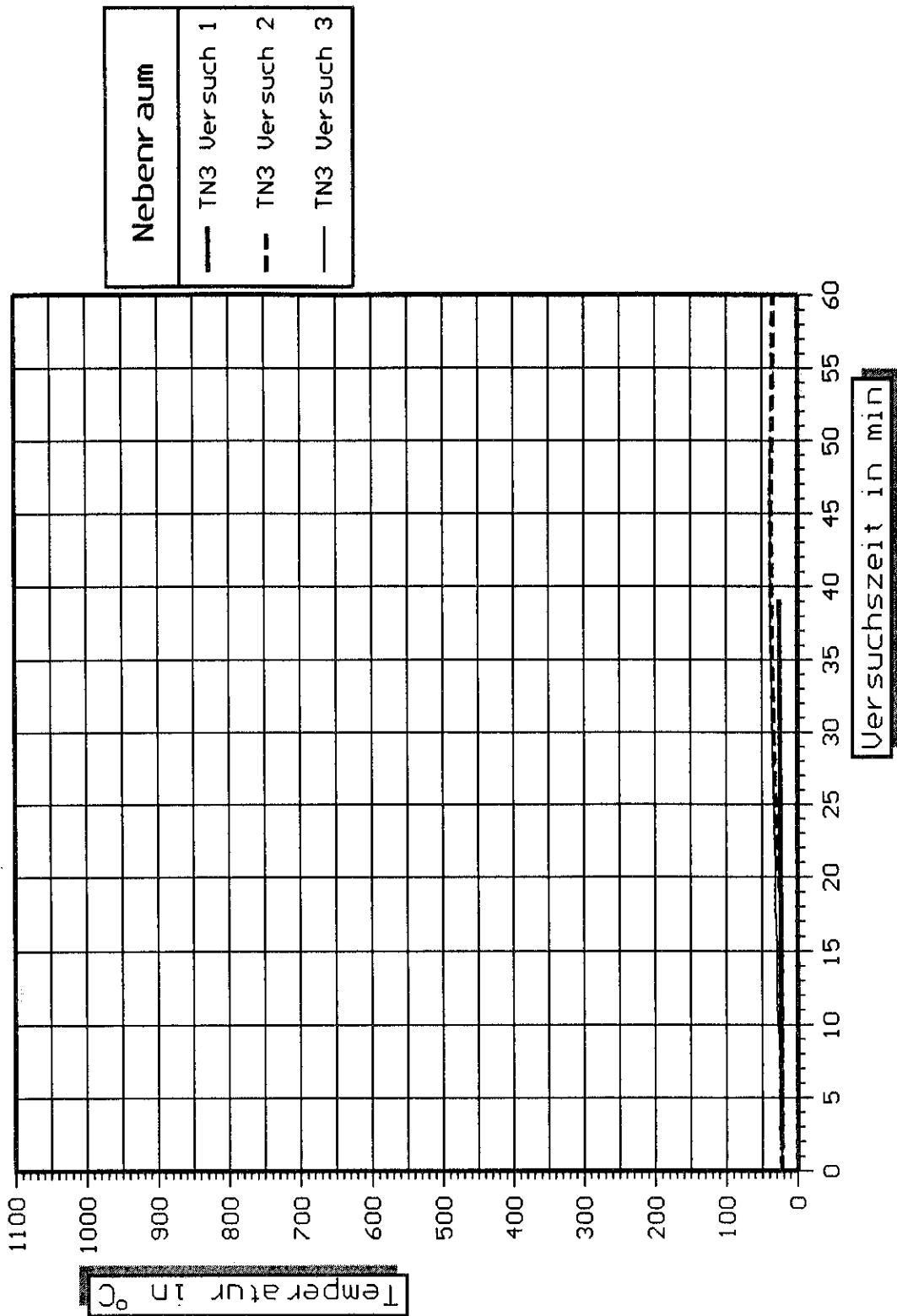


Bild 59 Zeitlicher Verlauf der Temperatur TN3 im Nebenraum bei den Versuchen 1, 2 und 3.

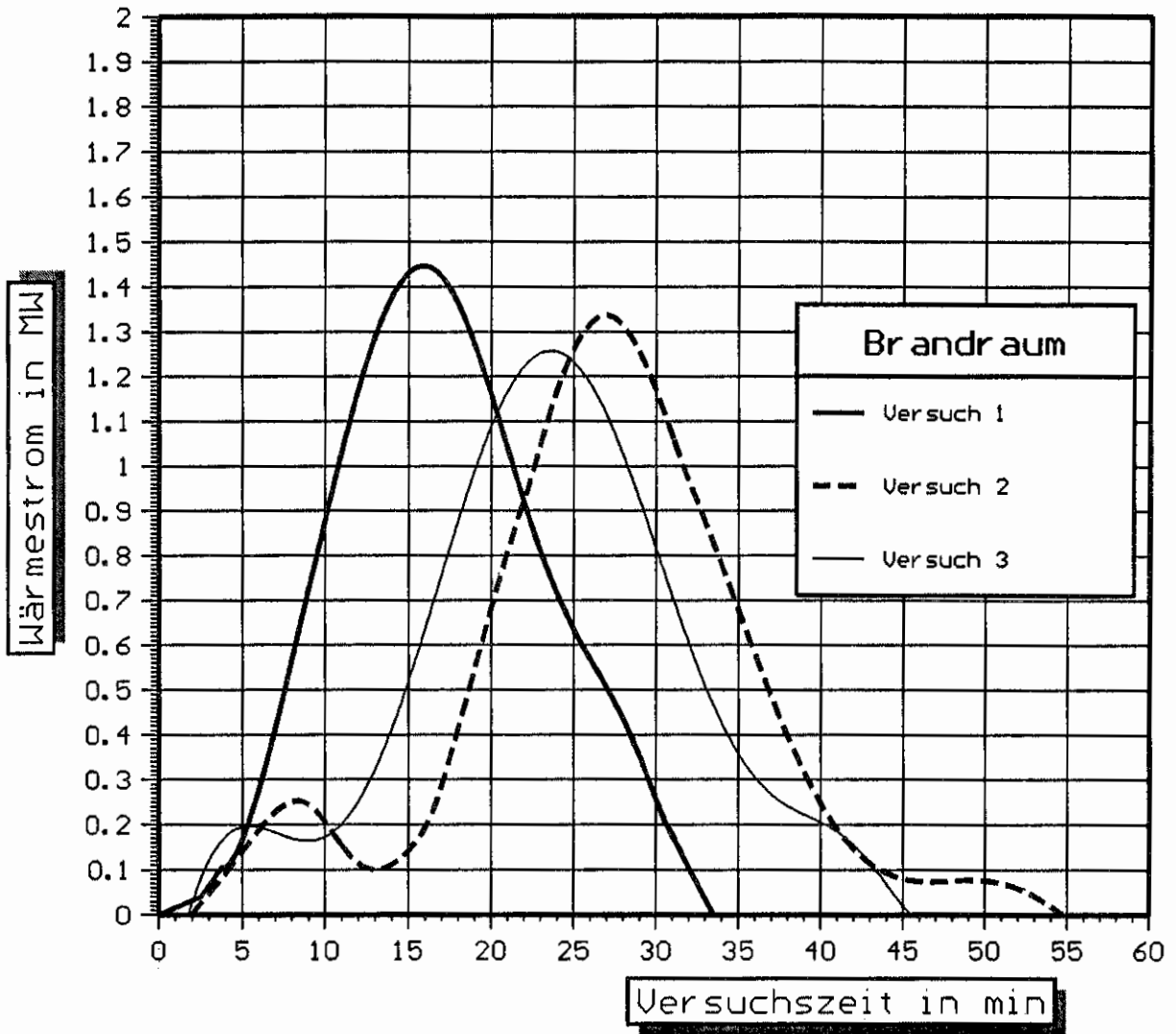


Bild 60 Zeitlicher Verlauf des freigesetzten Wärmestromes bei den Versuchen 1, 2 und 3.

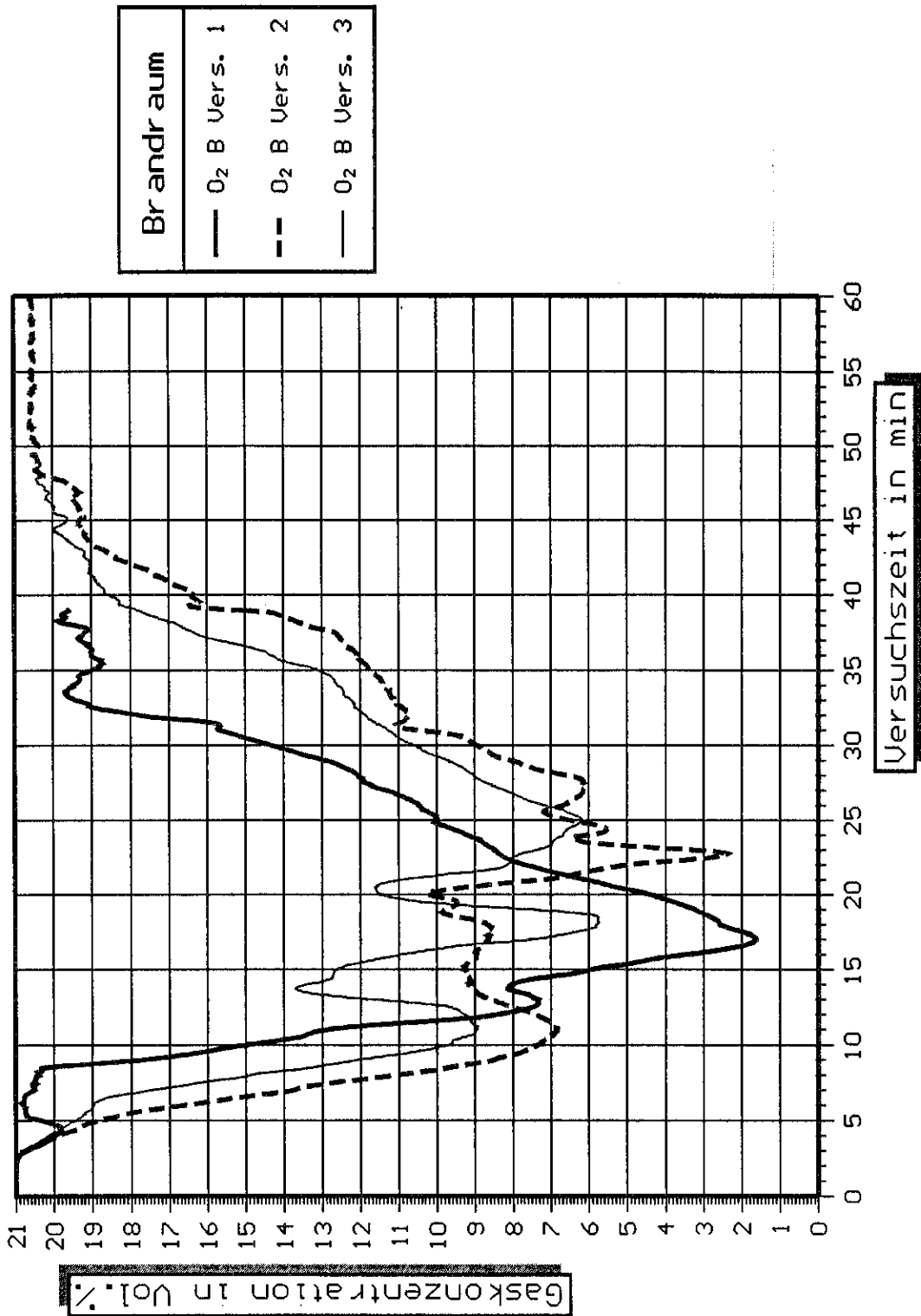


Bild 61 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Brandraum bei den Versuchen 1, 2 und 3.

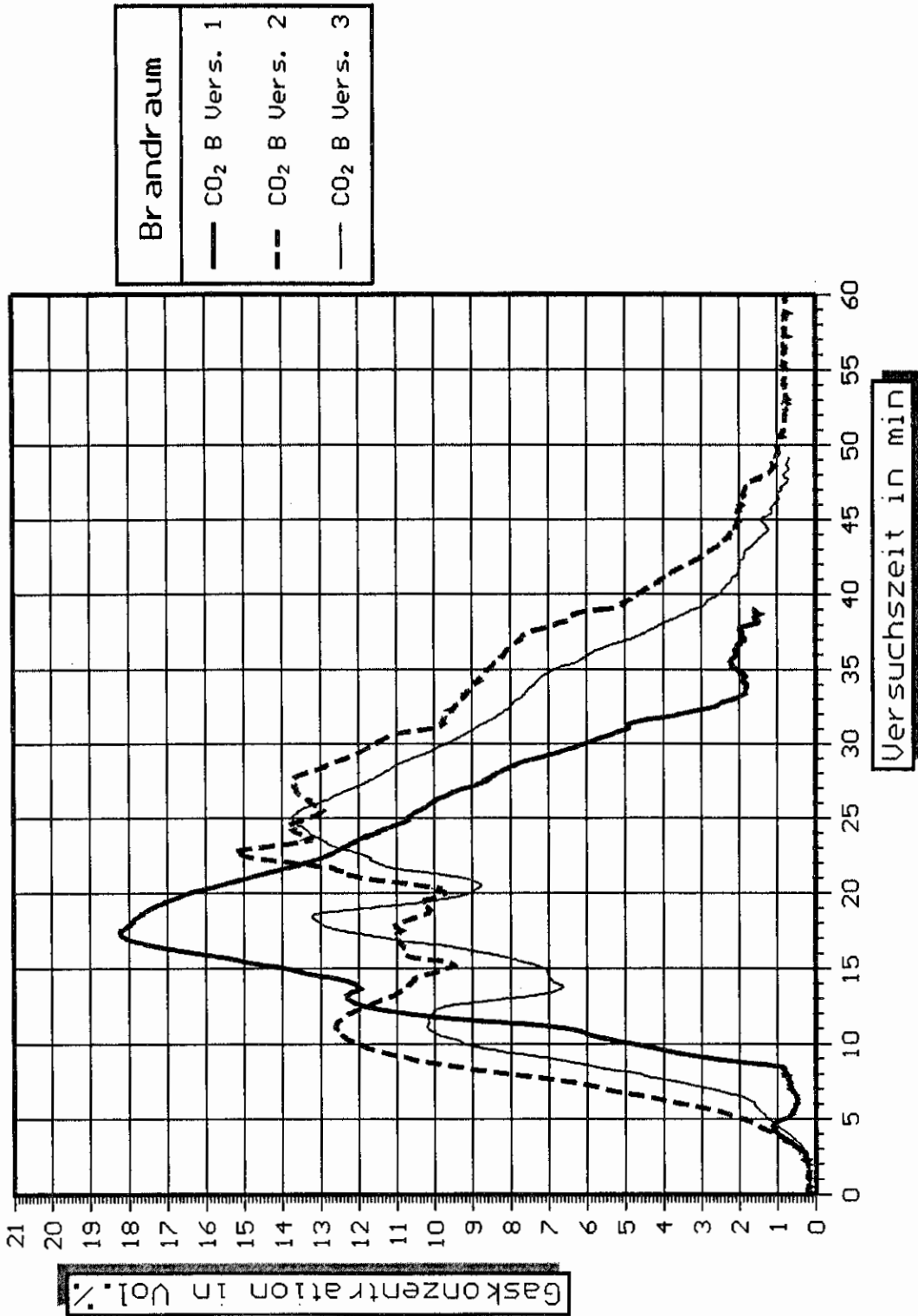


Bild 62 Zeitlicher Verlauf der Kohlendioxidkonzentration im Brandraum bei den Versuchen 1, 2 und 3.

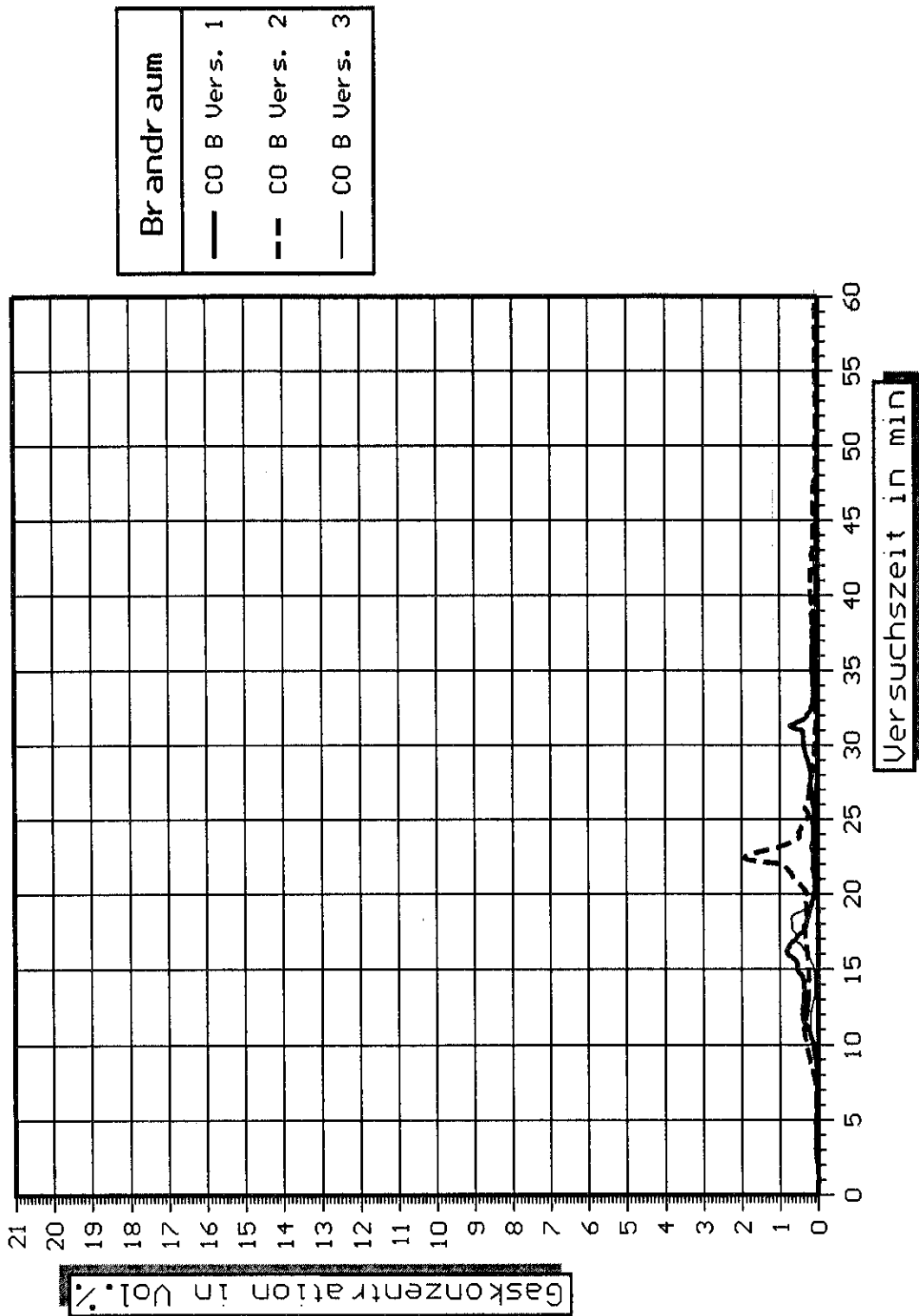


Bild 63 Zeitlicher Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum bei den Versuchen 1, 2 und 3.

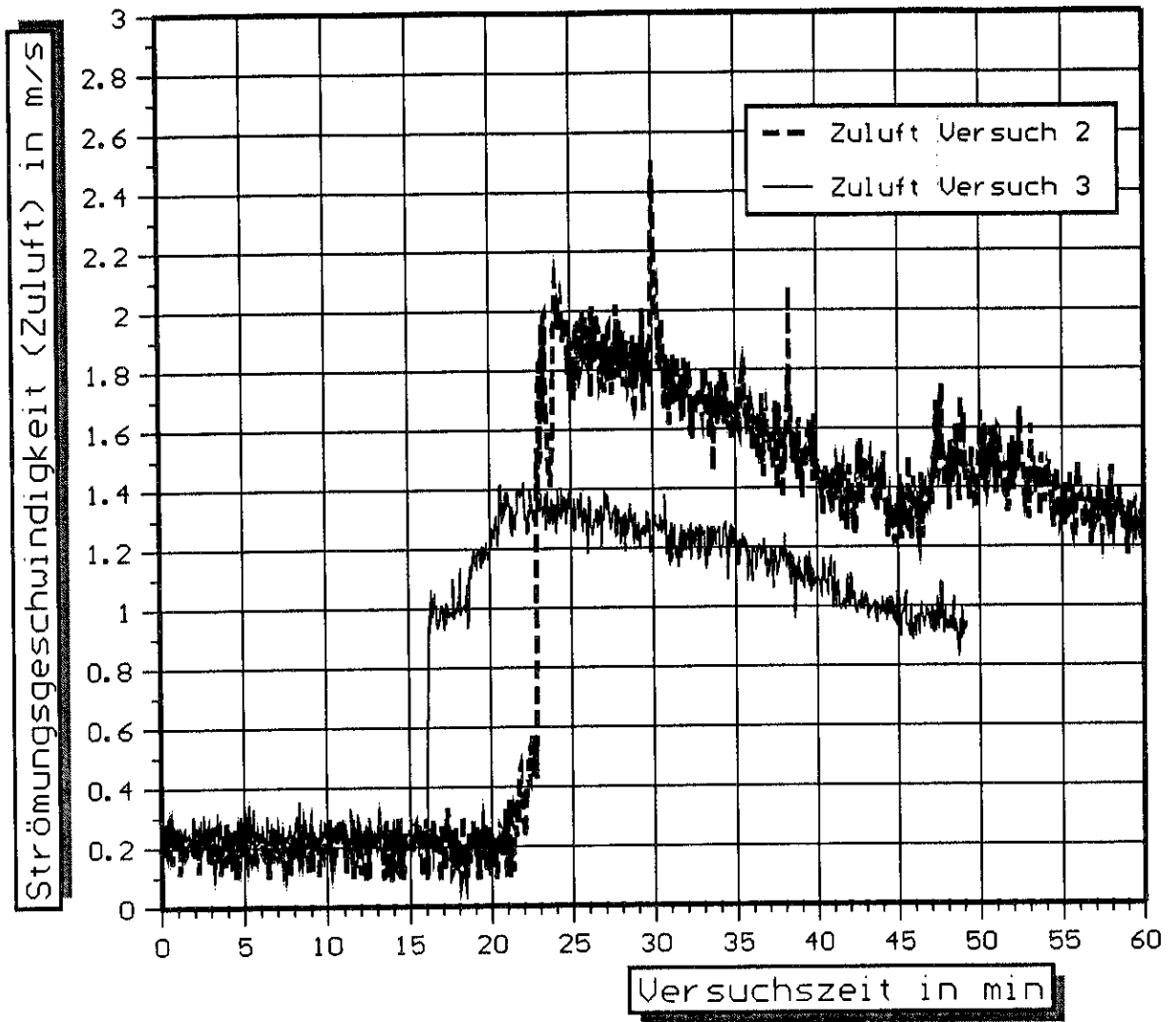


Bild 64 Zeitlicher Verlauf der Zuluftgeschwindigkeit an der Außenfassade bei den Versuchen 2 und 3.

11. FOTOS

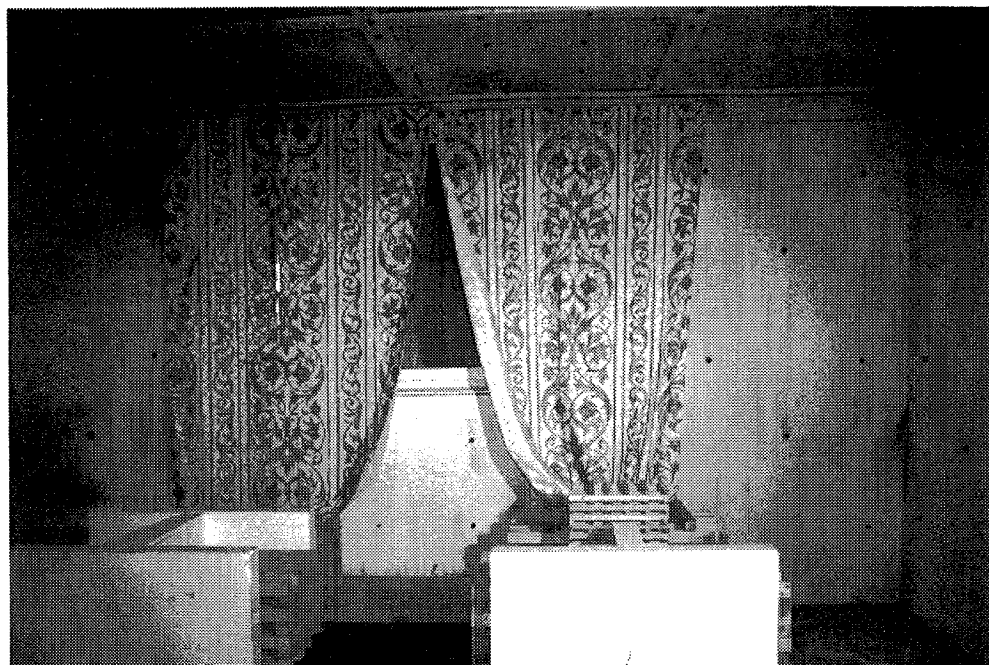


Foto 1 Brandraum mit Fenster und Brandlastpalette

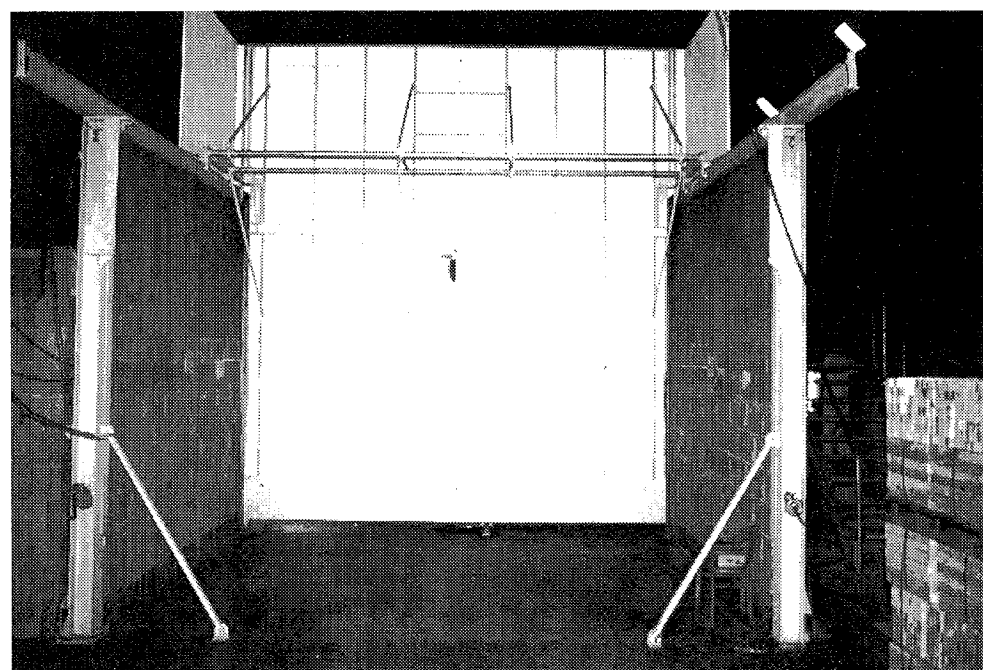


Foto 2 Verfahrbare Außenfassade



Foto 3 Versuch 2
23 min 55 s nach Zündung

Foto 4 Versuch 3
22 min 56 s nach Zündung

