

# 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 4: Brandversuche in einem Gebäudeausschnitt mit einer Kastendoppelfassade

# 114

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER  
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN,  
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

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

Forschungsbericht Nr. 114

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

Teil 4: Brandversuche in einem Gebäudeausschnitt mit einer Kastendoppelfassade

von

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

März 1999

# INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. UNTERSUCHUNGEN AN EINER KASTENDOPPELFASSADE	4
2.1 VERSUCHSPROGRAMM	4
2.2 VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK	4
3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	5
4. VERSUCHSBEOBACHTUNGEN, MEßWERTE UND VERSUCHSERGEBNISSE	6
4.1 VERSUCH 1: ALUMINIUMABSCHOTTUNGEN, 1 BRANDLASTPALETTE	6
4.2 VERSUCH 2: STAHLABSCHOTTUNGEN, 1 BRANDLASTPALETTE	8
4.3 VERSUCH 3: STAHLABSCHOTTUNGEN, 2 BRANDLASTPALETTEN	10
5. VERGLEICH DER BEI DEN VERSUCHEN ERMITTELTEN MESSWERTE UND BEWERTUNG	11
6. VERGLEICH DER BRAND- UND RAUCHAUSBREITUNG BEI KASTENDOPPELFASSADE UND GANZFLÄCHENDOPPEL- FASSADE	12
7. ZUSAMMENFASSUNG	14
8. LITERATURVERZEICHNIS	15
9. TABELLEN	16
10. BILDER	25
11. FOTOS	47

## 1. EINLEITUNG

Seit einiger Zeit werden von Architekten und Planern aus klima-, energie- und schallschutztechnischen Gründen in zunehmendem Maß Doppelfassaden eingesetzt. In einem mehrjährigen Forschungsprojekt wird an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik untersucht, welche Gefährdungen im Brandfall auftreten können und welche konstruktiven Vorkehrungen zu treffen sind, damit aus der Sicht des vorbeugenden Brandschutzes die Sicherheit der Konstruktion gewährleistet ist.

Doppelfassaden sind Wandkonstruktionen, bei denen vor eine konventionelle Fassade im Abstand von ca. 20 cm bis 2 m eine zweite Fassade aus Glas vorgesetzt wird. Durch Zu- und Abluftöffnungen kann Luft in den Fassadenzwischenraum gelangen und auch wieder entweichen. Eine natürliche Raumlüftung ist durch in der Innenfassade befindliche Fenster oder Lüftungsklappen, die geöffnet werden können, möglich. Der Sonnenschutz ist im Fassadenzwischenraum angeordnet.

Gegenüber einer einschaligen Außenwand weist eine Doppelfassade u.a. folgende Vorteile auf:

- ☞ Die äußere Glasscheibe sorgt für einen Wind- und Wetterschutz bei der Fensterlüftung sowie für Sonnenschutz.
- ☞ Das Öffnen von Fenstern ist auch bei extremen Wettersituationen möglich.
- ☞ Eine teure und energieaufwendige Vollklimatisierung des Gebäudes ist bei einer Doppelfassade mit Fenstern, die sich öffnen lassen, nicht notwendig.
- ☞ An verkehrsreichen Straßen mit hohem Lärmpegel wird der Schallpegel auch bei geöffneten Fenstern deutlich reduziert.

In der Praxis haben sich einige Konstruktionstypen für Doppelfassaden nach ihrem Prinzip der Luftführung in der Fassade herauskristallisiert (siehe Bild 1, S.25).

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

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

und Entlüften der Kastenfenster ermöglicht.

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

Neben diesen Hauptkonstruktionsprinzipien gibt es weitere Bauformen, die aber im wesentlichen auf diesen Konstruktionen aufbauen.

Aus diesen unterschiedlichen Bauformen und der Art der Luftführung ist bereits zu erkennen, daß bei Gebäuden mit Doppelfassaden viele Einflußgrößen die Brand- und Rauchausbreitung im Zwischenfassadenbereich sowie die Feuerwiderstandsdauer der Konstruktionsteile der Doppelfassade bestimmen. Besondere Bedeutung hat die Gefährdung der über dem Brandraum liegenden Geschosse durch Feuerüberschlag aufgrund direkten Flammenkontakts, infolge der Wärmestrahlung der Flammen und durch aufsteigende heiße Brandgase. Weiterhin ist durch die starke Verrauchung des Zwischenfassadenbereiches der Brandraum zeitweise von außen nicht zu erkennen. Einsatzkräfte der Feuerwehr haben hierdurch erhebliche Schwierigkeiten, Rettungsmaßnahmen schnell und gezielt einzuleiten. Aufgrund der hohen Stabilität der Verglasungen sind insbesondere die Einscheibensicherheitsverglasungen (ESG) der Außenfassade mechanisch nur sehr schwer zu zerstören. Dieses behindert ebenfalls erheblich die Personenrettung über die Außenfassade. Zusätzlich kann es zu einer verstärkten Rauchausbreitung im Gebäude kommen, falls der Brandrauch nicht in ausreichendem Maße über die Be- und Entlüftungsöffnungen der Doppelfassade abgeführt werden kann.

In den bisherigen experimentellen Untersuchungen von Kunkelmann /1, 2, 3/ wurde der Ausschnitt einer Ganzflächendoppelfassade untersucht. Durch die Auftriebsströmung im Zwischenfassadenbereich ergab sich durch die fehlenden horizontalen Abschottungen bei dem betrachteten Doppelfassadentyp eine schnelle Rauch- und Flammenausbreitung im Zwischenfassadenbereich, wobei die Flammenlängen noch das darüberliegende Stockwerk überschreiten können. Das Einscheibensicherheitsglas der Außenfassade zerspringt im Gegensatz zum Wärmeschutzglas schlagartig ohne Rißbildungsgeräusche, solange das ESG noch seine Vorspannung aufweist. Nach Herstellerangaben verliert ESG bei ca. 300°C seine Vorspannung. Es liegen hierzu jedoch noch keine näheren Untersuchungen vor. Beim Versagen der ESG-Verglasung schlagen sofort Stichflammen aus der Öffnung. Die Versuche haben gezeigt, daß durch die Zerstörung der Einscheibensicherheitsverglasung während des Brandes eine Temperaturerniedrigung an der Außenfassade erzielt wird. ESG-Scheiben, die durch die Wärmeeinwirkung während des Brandes ihre Vorspannung verlieren, können bei entsprechender thermischer Belastung plastische Verformungen aufweisen. ESG-Scheiben ohne Vorspannung zeigen ein Bruchverhalten wie normales Fensterglas. Scheiben, die nach der Brandeinwirkung noch intakt sind, lassen sich

mit stumpfen Schlagwerkzeugen nur schwer zerstören.

Ein Vergleich der Auswirkungen eines Raumbrandes in einem Gebäude mit vorgesetzter Ganzflächendoppelfassade mit und ohne Wassernebellöschanlage im Brandraum hat folgende Unterschiede gezeigt:

Bei einer Ganzflächendoppelfassade ohne Löschanlage im Brandraum ist mit einer schnellen Brand- und Rauchausbreitung über den Zwischenfassadenbereich in das darüberliegende Stockwerk zu rechnen. Weiterhin ist die Außenfassade durch die hohen Temperaturen sehr gefährdet. Durch die starke Verrauchung des Zwischenfassadenbereiches ist der Brandraum durch die Außenfassade zeitweise nicht zu erkennen.

Die Versuchsergebnisse mit einer Niederdruck-Wassernebellöschanlage im Brandraum haben gezeigt, daß durch den Einsatz dieser Löschanlagen der Brandschaden bedeutend reduziert, der Feuerüberschlag verhindert, die Verrauchung des Zwischenfassadenbereiches erheblich verringert und der Löschwasserschaden minimiert wird. Voraussetzung hierfür ist, daß die Wassernebellöschanlage schnell, d.h. noch in der Brandentwicklungsphase, ausgelöst wird. In den Versuchen wurde die Anlage innerhalb von 2,5 bis 4 Minuten beim Zerplatzen des Glasfasses eine Indikatorsprinklers ausgelöst. Der Brandschaden war bei diesen Versuchen gering. Vom Brand betroffen war lediglich der Bereich neben und oberhalb der Zündquelle. Nichteinmal der Vorhang war angebrannt. Das Temperaturniveau ist hierbei insgesamt sehr niedrig. Weiterhin ergab der Einsatz der Niederdruck-Wassernebellöschanlage im Brandraum eine vernachlässigbare Belastung der Außenfassade (Temperaturen unter 90°C). Die Verrauchung des Zwischenfassadenbereiches war hierbei sehr gering.

Die Wassernebellöschanlage weist aufgrund des geringeren Löschwasserschadens und der Löschwirkung bei flüssigen Brandstoffen und Kunststoffen Vorteile auf. Durch frühzeitiges Auslösen der Löschanlage kann verhindert werden, daß die Verglasung der Innenfassade versagt. Dadurch kann vermieden werden, daß Flammen in den Zwischenfassadenbereich schlagen bzw. daß große Mengen an Brandgasen in andere Stockwerke gelangen und ein Feuerüberschlag hervorgerufen wird. Von einer Löschanlage im Zwischenfassadenbereich ist abzuraten, da diese zum einen nichts zur Verringerung der Brandausbreitung im Brandraum beiträgt und zum anderen nur dazu führen würde, daß aufgrund des Impulses des Sprühnebels Rauch in darunterliegende Stockwerke gedrückt wird. Weiterhin würde durch die Abkühlung der Brandgase im Zwischenfassadenbereich die Entrauchung in diesem Bereich erschwert.

Durch Verwendung von feuerwiderstandsfähigen Abschottungen im Zwischenfassadenbereich kann die Brand- und Rauchausbreitung beträchtlich vermindert werden, wobei jede Konstruktion im Einzelfall überprüft werden muß.

In diesem Forschungsprojekt wird die Kastendoppelfassade, die in Fachkreisen als am unkritischste bezüglich der Brand- und Rauchausbreitung im Zwischenfassadenbereich gilt, untersucht.

## **2.       UNTERSUCHUNGEN AN EINER KASTENDOPPELFASSADE**

### **2.1     VERSUCHSPROGRAMM**

Zur Untersuchung der Brand- und Rauchausbreitung im Zwischenfassadenbereich sowie in benachbarte und darüberliegende Räume bei Gebäuden mit Kastendoppelfassade wurden Brandversuche in einer dafür errichteten Versuchseinrichtung durchgeführt. Von Interesse waren hierbei die Bestimmung des Wärmestromes beim Brand, die Brandgaszusammensetzung im Brandraum, die Temperaturen im Brandraum und in angrenzenden Räumen, im Zwischenfassadenbereich, an den Fenstern und Verglasungen, die Wärmestrahlung an Fenstern in dem über dem Brandraum liegenden Stockwerk, die Brandgaszusammensetzung im Abgas, die Druck- und Strömungsverhältnisse an den Zu- und Abluftöffnungen des Fensterkastens, am Fenster der Innenfassade (Brandraumfenster) sowie an der Brandraumtür. Besondere Aufmerksamkeit wurde auch dem Versagen der Wärmeschutzverglasung der Innenfassade, der Einscheibensicherheitsverglasung (kurz: ESG) der Außenfassade und den horizontalen und vertikalen Abschottungen im Zwischenfassadenbereich geschenkt. Die Auswahl der Versuchsparameter und Meßgrößen hatte das Ziel, Kriterien für die Konstruktion und den Brandschutz bereitzustellen, die den Personen- und Objektschutz bei derartigen Gebäuden gewährleisten.

### **2.2     VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK**

Bild 2 (S.26) zeigt die Prinzipskizze des Versuchsaufbaus bestehend aus Brandraum, Flur, Nebenraum und dem Teilbereich einer Kastendoppelfassade sowie den Meßstellenplan (siehe auch Meßstellenliste in Tabelle 1, S.16) mit den entsprechenden Abmessungen. Bild 3 (S.27), Foto 1 und 2 (S.47) zeigen im Detail die Außenfassade und den Zwischenfassadenbereich. Die Tabellen 2.1 bis 2.3 (Spalte 1, S.20-22) enthalten nähere Einzelheiten zu den Versuchsaufbauten, Konstruktionselementen, Brandlasten und Versuchsparametern. In Bild 2 (S.26) ist das durch eine Wand über dem Brandraum angedeutete weitere Stockwerk zu erkennen. Im Brandraum selbst befindet sich eine Fensteröffnung (siehe Bild 3, S.27). Die Fensteröffnung des oberen Stockwerkes ist bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen mit Silikat-Brandschutzbauplatten verschlossen, wobei in der Mitte des Fensters ein Wärmestrahlungsaufnehmer angebracht ist. An den Brandraum grenzen ein Flur sowie ein Nebenraum an. Die Räume sind jeweils durch eine Tür miteinander verbunden. Der Boden des Brandraumes ist als Waageplattform ausgebildet. Vor der Wand des Brandraumes und des "oberen Stockwerkes" befindet sich eine verfahrbare Außenfassade. Diese Außenfassade besteht aus einem verfahrbaren Stahlgerüst mit daran befestigten Silikat-Brandschutzbauplatten. Ein Teilbereich der Außenfassade wurde, wie in Bild 2 und 3 (S.26, 27) dargestellt und in den Tabellen 2.1, 2.2 und 2.3 (S.20-22) aufgeführt, mit einer Einscheibensicherheitsverglasung in einem handelsüblichen Aluminiumprofilsystem mit Glashalteleisten ausgeführt. Auf eine Vollverglasung der Außenfassade mußte aus Kostengründen verzichtet werden.

Als vertikale und horizontale Abschottungen (Bezeichnungen der Abschottungen: siehe Bild 3, S.27) wurden bei Versuch 1 Aluminiumabschottungen verwendet. Hierzu wurden Aluminiumvierkantrohre auf beiden Seiten mit 2,5 mm starkem Aluminiumblech beplankt. Im Zwischenraum befand sich kein Dämmmaterial. Die Dicke der Abschottungen betrug 25 mm.

Bei Versuch 2 und 3 wurden Stahlabschottungen verwendet. Diese wurden in der Weise gefertigt, daß Stahlvierkantrohre auf beiden Seiten mit 1 mm Stahlblech beplankt wurden. Die Dicke der Abschottungen betrug 22 mm.

### 3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Tabellen 2.1 bis 2.3 (S.20-22) sowie 3 (S.23) geben nähere Einzelheiten zu den Versuchsparametern (z.B. Zu- und Abluftöffnungen, Fenster- und Türstellungen, Brandlast).

Der Abstand zwischen Innen- und Außenfassade betrug bei allen Versuchen 0,6 m.

Als Brandlast wurden bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen Brandlastpaletten verwendet. Weitere Angaben zum Aufbau dieser Brandlastpaletten können aus /1/ und /2/ entnommen werden. Foto 5 (S.48) zeigt den Brandraum bei Versuch 3 mit 2 Brandlastpaletten.

Bei den Versuchen wurden in Abhängigkeit von der Branddauer folgende Werte gemessen und aufgezeichnet:

- ☛ Temperaturverläufe
- ☛ Massenverlust im Brandraum
- ☛ Dynamische Drücke der Luft bzw. der Brandgase in der Zu- bzw. Abluftöffnung des unteren Fensterkastens
- ☛ Dynamische Drücke der Zu- bzw. Abluft am Brandraumfenster
- ☛ Dynamische Drücke im unteren und oberen Bereich der Brandraumtür
- ☛ Dynamischer Druck im oberen Fensterkasten
- ☛ Wärmestrahlung am Fenster der Innenfassade des oberen Stockwerkes
- ☛ Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum
- ☛ Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas
- ☛ Dynamischer Druck und Temperatur im Abgas

Die Art und Position der Meßstellen sind Bild 2 und 3 (S.26, 27) sowie der Meßstellenliste nach Tabelle 1 (S.16) zu entnehmen. Zusätzlich wurde der Versuchsablauf mit mehreren Farb-Videokameras aufgezeichnet. Die Meßwerterfassung erfolgte mit computergesteuerten Datenerfassungsanlagen.



## 4. VERSUCHSBEOBSACHTUNGEN, MEßWERTE UND VERSUCHSERGEBNISSE

### 4.1 VERSUCH 1: ALUMINIUMABSCHOTTUNGEN, 1 BRANDLASTPALETTE

Der zeitliche Ablauf des Versuches sowie wichtige Versuchsergebnisse werden in Tabelle 2.1, Spalte 2 und 3 (S.20), wiedergegeben. Unter anderem werden Maximaltemperaturen an diversen Meßstellen, Versagenszeitpunkte der Verglasungen sowie maximal auftretende Gaskonzentrationen ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ) im Brandraum, im oberen Fensterkasten sowie im Abgas aufgeführt.

Bild 4 (S.28) zeigt den zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und des Wärmestromes.

Der Wärmestrom wurde sowohl über die Messung der Abbrandmasse als auch über die Sauerstoffverbrauchsmeßmethode ermittelt.

Aus dem zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse wurde für den Versuch 1 der theoretische Wärmestrom ermittelt. Der Maximalwert von 4,03 MW wurde nach 18 min 14 s erreicht. Für die Berechnung wurde ein mittlerer Heizwert von  $H_u = 16,9$  MJ/kg für die Brandlast im Brandraum angesetzt (siehe Tabelle 3, S.23).

Aus dem aus der gesamten Versuchshalle abgesaugten Abgasvolumenstrom und dessen  $O_2$ -,  $CO_2$ - und  $CO$ -Konzentration wurde mit der Sauerstoffverbrauchsmeßmethode der tatsächliche Wärmestrom ermittelt. Hierbei ergab sich bei Versuch 1 ein maximaler Wert von 2,17 MW nach 23 min.

Der aufsteigende fühlbare Wärmestrom (Sauerstoffverbrauchsmeßmethode) ist geringer als der maximale theoretische Wärmestrom (Abbrandwaage). Dies ist darauf zurückzuführen, daß durch die unvollständige Verbrennung der untere Heizwert nicht erreicht wird. Eine unvollständige Verbrennung entsteht z.B. durch den Einfluß flammenhemmender Zusätze auf die Verbrennung, durch Sauerstoffmangel und durch Abkühlung an den Wänden und führt u.a. zu einer Rußbildung.

Bei den Maximalwerten bzw. dem zeitlichen Verlauf des nach der Sauerstoffverbrauchsmeßmethode berechneten tatsächlichen Wärmestromes ist zu berücksichtigen, daß über das gesamte Hallendach abgesaugt wurde. Durch das relativ große Volumen, in dem sich der Brandrauch unterhalb des Hallendaches ansammelt, ergibt sich bei einer Änderung der Dicke der Rauchschiicht eine zeitliche Verzögerung des damit berechneten Wärmestromes. Die Meßwerte sind nur dann exakt, wenn sich eine konstante Rauchschiichtdicke unter der Hallendecke ausbildet und genau soviel Rauch abgesaugt wird wie neuer hinzukommt. Der zeitliche Verlauf des Absinkens bzw. der Veränderung der Höhenlage der Rauchschiicht unter dem Hallendach wurde bei diesem Versuch nicht ermittelt und konnte daher nicht bei der Berechnung des Wärmestromes berücksichtigt werden.

In Versuch 1 ergab sich eine zeitliche Verschiebung der Maximalwerte von theoretischem und tatsächlichen Wärmestrom von 4 min 46 s.

Vergleicht man die Maximalwerte des theoretischen Wärmestromes (Abbrandwaage), in diesem Brandstadium hat sich die Rauchsicht nicht verändert, mit dem Wert aus der Sauerstoffverbrauchsmessmethode, so ist der theoretische Wert in Versuch 1 ca. 46 % größer.

Nähere Angaben zur Bestimmung des Wärmestromes finden sich bei Kunkelmann /4/.

Bild 5 (S.29) zeigt eine Zusammenstellung von ausgewählten Temperaturen im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich und an der ESG-Verglasung der Außenfassade. Aufgrund des Durchbrandes der horizontalen Abschottung über dem Brandraumfenster nach 17 min 38 s ergibt sich eine maximale Temperatur von 798°C nach 19 min 21 s im oberen Fensterkasten. Die ESG-Scheibe des oberen Fensterkastens wird nach 18 min 59 s zerstört. Die kleinen Bruchstücke weisen auf eine noch vorhandene Vorspannung hin. Die untere ESG-Scheibe zerspringt nicht, hat aber, erkennbar an den plastischen Deformationen, ihre Vorspannung verloren. Die Fotos 3 und 4 (S.47) zeigen den Innen- und Außenbereich des unteren Fensterkastens mit zerstörten vertikalen und horizontalen Aluminiumabschottungen.

Wichtige Kriterium für die Ausbreitung von Brandgasen in Gebäuden sind die zeitlichen Verläufe von dynamischen Drücken und den hieraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten. Nähere Einzelheiten hierzu finden sich bei Kunkelmann /2, 3/.

In den vorliegenden Versuchen wurden die dynamischen Drücke mit Prandtl-Rohren ermittelt. Die Position und Ausrichtung der Prandtl-Rohre ist der Meßstellenliste in Tabelle 1 (S.16) zu entnehmen. Hierbei ist von Bedeutung, daß die Anzeige von Prandtl-Rohren nur in einem beschränkten Winkelbereich von der Anströmrichtung unabhängig ist und keine bidirektionalen Meßwerte liefern. In den nachfolgend aufgeführten Diagrammen soll daher quantitativ nur der positive Druckbereich und die hieraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten bewertet werden. Die negativen Druckwerte können jedoch qualitativ zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse herangezogen werden.

Die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke sowie die hieraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten, die an der Zu- und Abgasöffnung des **unteren Fensterkastens** gemessen wurden, sind in Bild 6 (S.30) dargestellt. Bis zum Durchbrand der oberen horizontalen Abschottung des unteren Fensterkastens (AHIII), siehe Bild 3, S.27) nach 17 min 38 s ergab sich am Prandtl-Rohr der Abluftöffnung ein Überdruck, d.h. Brandgase strömen aus dieser Öffnung. Das Prandtl-Rohr in der Zuluftöffnung zeigt negative Meßwerte, d.h. qualitativ kann gesagt werden, daß infolge der Ausrichtung des Prandtl-Rohres nach außen dieses von hinten angeströmt wird und somit auch Brandgase nach außen strömen. Wie Videoaufnahmen zeigen, strömt der Hauptteil der Brandgase zu dieser Zeit aus der Abluftöffnung des unteren Fensterkastens. Nach dem Durchbrand der horizontalen Abschottung AHIII kehren sich diese Verhältnisse um. Das

Prandtl-Rohr an der Zuluftöffnung wurde korrekt von vorne angeströmt, d.h. hier wurde Luft aus der Umgebung (Halle) angesaugt. Die Abluftöffnung zeigt negative Druckwerte, d.h. das Prandtl-Rohr an dieser Stelle wird von hinten aus der Umgebung angeströmt. Dies bedeutet, daß durch die Strömung der Brandgase aus dem unteren in den oberen Fensterkasten durch die zerstörte horizontale Abschottung im Zwischenfassadenbereich ein Unterdruck herrschte und infolgedessen Luft aus der Umgebung durch die Abluftöffnung des unteren Fensterkastens angesaugt wurde.

Bild 7 (S.31) zeigt die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke sowie die hieraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten, die im Bereich des **Brandraumfensters** gemessen wurden. Der Hauptanteil der Brandgase strömt hierbei aus den oberen 2/3 des Brandraumfensters in den Fensterkasten. Man erkennt, daß nach dem Durchbrand der oberen Abschottung des unteren Fensterkastens (AVIII) der dynamische Druck und damit die Strömungsgeschwindigkeit im oberen Bereich des Brandraumfensters zu- und im unteren Bereich leicht abnimmt.

Der zeitliche Verlauf des dynamischen Druckes sowie die hieraus ermittelte Strömungsgeschwindigkeit, die zentral im **oberen Fensterkasten** gemessen wurde, wird in Bild 8 (S.32) dargestellt. Auch hier steigt der dynamische Druck bzw. die Strömungsgeschwindigkeit mit dem Durchbrand der horizontalen Abschottung AVIII an. Brandgase strömen jetzt aus dem unteren in den oberen Fensterkasten.

Bild 9 (S.33) gibt die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke sowie die hieraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten, die im Bereich der **Brandraumtür** gemessen wurden, wieder. Nach dem Durchbrand der oberen Abschottung des unteren Fensterkastens (AVIII) steigt der dynamische Druck im unteren Bereich der Brandraumtür an und fällt im oberen Bereich ab. Daraus folgt, daß aus dem Brandraum vermehrt auch Brandgase durch die Fensteröffnung und die zerstörte Abschottung abströmen.

#### 4.2 VERSUCH 2: STAHLABSCHOTTUNGEN, 1 BRANDLASTPALETTE

Der zeitliche Ablauf des Versuches sowie wichtige Versuchsergebnisse werden in Tabelle 2.2, Spalte 2 und 3 (S.21), wiedergegeben. Unter anderem werden Maximaltemperaturen an diversen Meßstellen, Versagenszeitpunkte der Verglasungen sowie maximal auftretende Gaskonzentrationen ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ) im Brandraum, im oberen Fensterkasten sowie im Abgas aufgeführt.

Bild 10 (S.34) zeigt den zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und des Wärmestromes.

Aus dem zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse wurde für den Versuch 2, unter Berücksichtigung eines mittleren Heizwertes von  $H_u = 16,9$  MJ/kg, ein maximaler theoretischer Wärmestrom von 3,35 MW nach 16 min 12 s ermittelt.

Im Abgasstrom wurde in Versuch 2 mit Hilfe der Sauerstoffverbrauchsmessmethode ein maximaler tatsächlicher Wärmestrom von 2,1 MW nach 21 min 4 s ermittelt.

Aus den bereits bei Versuch 1 erläuterten Gründen ergab sich auch bei Versuch 2 eine zeitliche Verschiebung der Maximalwerte von theoretischem und tatsächlichem Wärmestrom von 4 min 52 s.

Vergleicht man die Maximalwerte des theoretischen Wärmestromes (Abbrandwaage), in diesem Brandstadium hat sich die Rauchsicht nicht verändert, mit dem Wert aus der Sauerstoffverbrauchsmessmethode, so ist der theoretische Wert in Versuch 2 ca. 37 % größer.

Eine Zusammenstellung von ausgewählten Temperaturen im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich und an der ESG-Verglasung der Außenfassade wird in Bild 11 (S.35) dargestellt. Im Vergleich zu Versuch 1 mit Aluminiumabschottungen ergeben sich bei diesem Versuch mit Stahlabschottungen höhere Temperaturen im unteren Fensterkasten. Die Stahlabschottungen verhinderten, daß im oberen Fensterkasten kritische Temperaturen auftraten. (siehe Tabelle 2.2, S.21)

Die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke sowie die hieraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten, die an der Zu- und Abgasöffnung des **unteren Fensterkastens** gemessen wurden, sind in Bild 12 (S.36) dargestellt. Auch bei diesem und den nachfolgenden Diagrammen soll quantitativ nur der positive Druckbereich und die hieraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten bewertet werden. Die negativen Druckwerte können jedoch qualitativ zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse herangezogen werden. Nach dem Versagen des Wärmeschutzglasfensters nach 7 min 51 s deuten sie darauf hin, daß ein geringer Teil der Brandgase durch die Zuluftöffnung des unteren Fensterkastens entweichen. Der Hauptteil der Brandgase wird jedoch durch die Abluftöffnung abgeführt.

Bild 13 (S.37) zeigt die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke sowie die hieraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten, die im Bereich des **Brandraumfensters** gemessen wurden. Der Hauptanteil der Brandgase strömt hierbei aus den oberen 2/3 des Brandraumfensters in den Fensterkasten.

Bild 14 (S.38) gibt den zeitlichen Verlauf des dynamischen Druckes sowie die hieraus ermittelte Strömungsgeschwindigkeit, die zentral im **oberen Fensterkasten** gemessen wurde, wieder. Aufgrund der intakten Abschottungen ergibt sich eine nur geringe Strömung. Nach dem Zerplatzen der unteren ESG-Scheibe nach 15 min 59 s wird das Prandtl-Rohr umgekehrt angeströmt. Die vor der ESG-Verglasung aufsteigenden heißen Brandgase führen dazu, daß kältere Brandgase aus der Zuluftöffnung des oberen Fensterkastens angesaugt werden. Die großen Bruchstücke der unteren ESG-Scheibe weisen auf einen Vorspannungsverlust hin. Die obere ESG-Scheibe wird bei diesem Versuch nicht zerstört.

Bild 15 (S.39) zeigt die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke sowie die hieraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten, die im Bereich der **Brandraumtür** gemessen wurden. Nach Versagen der ESG-Scheibe des unteren Fensterkastens nach 15 min 59 s fällt der dynamische Druck im oberen Teil der Brandraumtür ab, im unteren Bereich nimmt dieser zu. Daraus folgt, daß aus dem Brandraum vermehrt auch Brandgase durch die Fensteröffnung abströmen.

### 4.3 VERSUCH 3: STAHLABSCHOTTUNGEN, 2 BRANDLASTPALETTEN

Der zeitliche Ablauf des Versuches sowie wichtige Versuchsergebnisse werden in Tabelle 2.3, Spalte 2 und 3 (S.22), wiedergegeben. Unter anderem werden Maximaltemperaturen an diversen Meßstellen, Versagenszeitpunkte der Verglasungen sowie maximal auftretende Gaskonzentrationen ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ) im Brandraum, im oberen Fensterkasten sowie im Abgas aufgeführt.

Ein Besonderheit bei diesem Versuch war, daß aufgrund der zu erwartenden relativ großen Wärmefreisetzung die Brandraumtür zunächst geschlossen war. Hierdurch wurde die Brandentwicklung trotz der Belüftungsöffnungen im Fensterkasten und dem Versagen des Wärmeschutzglasfensters der Innenfassade nach 9 min 17 s stark behindert. Erst nach dem Öffnen der Brandraumtür nach 33 min 27 s ergab sich eine starke Brandentwicklung und die ESG-Scheibe des unteren Fensterkastens fällt nach 36 min 56 s vollständig aus dem schmelzenden Rahmen und zerspringt auf dem Boden in große Stücke (siehe Foto 6, 7 und 8, S.48, 49). Letzteres weist auf einen Vorspannungsverlust der Scheibe hin, d.h. die ESG-Scheibe verhält sich wie normales Fensterglas. Bedeutend ist dieses Phänomen für die Gefährdung von Passanten, wenn so eine Scheibe aus großer Höhe herunterfällt.

Bild 16 (S.40) zeigt den zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und des Wärmestromes.

Aus dem zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse wurde für den Versuch 3, unter Berücksichtigung eines mittleren Heizwertes von  $H_u = 16,9$  MJ/kg, ein maximaler theoretischer Wärmestrom von 4,74 MW nach 37 min 3 s ermittelt.

Im Abgasstrom wurde in Versuch 3 mit Hilfe der Sauerstoffverbrauchsmeßmethode ein maximaler tatsächlicher Wärmestrom von 2,85 MW nach 41 min 14 s ermittelt.

In Versuch 3 ergab sich eine zeitliche Verschiebung der Maximalwerte von theoretischem und tatsächlichem Wärmestrom von 4 min 11 s.

Vergleicht man die Maximalwerte des theoretischen Wärmestromes (Abbrandwaage), in diesem Brandstadium hat sich die Rauchschicht nicht verändert, mit dem Wert aus der Sauerstoffverbrauchsmeßmethode, so ist der theoretische Wert bei diesem Versuch ca. 40 % größer.

Bild 17 (S.41) zeigt eine Zusammenstellung von ausgewählten Temperaturen im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich und an der ESG-Verglasung der Außenfassade. Im unteren Fensterkasten traten an der Oberkante des Brandraumfensters im Zwischenfassadenbereich Temperaturen von über 1200° C auf. Die untere ESG-Scheibe fällt als ganze Scheibe aus dem schmelzenden Rahmen und zerspringt auf dem Boden in große Stücke. Diese ESG-Scheibe hatte ebenfalls während der Brandbelastung ihre Vorspannung verloren. Die obere ESG-Scheibe zersprang während des Brandversuches nicht, sondern erst im erkalteten Zustand. Die kleinen Bruchstücke deuten auf eine noch vorhandene Vorspannung hin.

Die Stahlabschottungen hielten der Brandbelastung stand (siehe Foto 7, S.48).

Die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke sowie die hieraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten, die an der Zu- und Abgasöffnung des **unteren Fensterkastens** gemessen wurden, sind in Bild 18 (S.42) dargestellt. Der Hauptteil der Brandgase wird durch die Abluftöffnung bzw. im oberen Bereich des Fensterkastens abgeführt.

Bild 19 (S.43) zeigt die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke sowie die hieraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten, die im Bereich des **Brandraumfensters** gemessen wurden. Der Hauptanteil der Brandgase strömt hierbei aus den oberen 2/3 des Brandraumfensters in den Fensterkasten.

Bild 20 (S.44) zeigt den zeitlichen Verlauf des dynamischen Druckes sowie die hieraus ermittelte Strömungsgeschwindigkeit, die zentral im **oberen Fensterkasten** gemessen wurde. Nach dem Öffnen der Brandraumtür nach 33 min 27 s und der damit verbundenen starken Brandentwicklung ergeben sich negative Druckwerte am Prandtl-Rohr. Die vor der ESG-Verglasung aufsteigenden heißen Brandgase führen dazu, daß kältere Brandgase aus der Zuluftöffnung des oberen Fensterkastens angesaugt werden.

Dynamische Drücke an der **Brandraumtür** wurden bei diesem Versuch nicht gemessen.

## 5. VERGLEICH DER BEI DEN VERSUCHEN ERMITTELTEN MESSWERTE UND BEWERTUNG

Bild 21 (S.45) zeigt im Vergleich die maximalen Temperaturen an der Oberfläche der ESG-Verglasung im Zwischenfassadenbereich. Der Vergleich der Versuche 1, 2 und 3 mit Kastendoppelfassade zeigt, daß im oberen Fensterkasten im Brandfall durch die nichtversagenden Stahlabschottungen nur relativ geringe Temperaturen auftreten. Die maximalen Temperaturen an der ESG-Verglasung des unteren Fensterkastens liegen bei Stahlabschottungen durch das Aufheizen des Fensterkastens höher als bei Aluminiumabschottungen.

Bild 22 (S.46) vergleicht die Maximalwerte der Wärmestrahlung und Temperatur zentral am

Fenster der Innenfassade des darüberliegenden Stockwerkes bei Ganzflächen- und Kastendoppelfassade. Man erkennt, daß beim Abstand von 0,6 m zwischen Innen- und Außenfassade Werte erreicht werden, die im Bereich der Bestrahlungsstärke für Fremdentzündung liegen.

Bei Verringerung des Abstandes von 0,6 m auf 0,3 m ist mit einer höheren Bestrahlungsstärke zu rechnen. Ebenfalls wird dies bei höherer Brandlast (z.B. Wohnzimmerbrand) der Fall sein.

Bei der Verwendung von Aluminiumabschottungen kann ein Feuerüberschlag über den Zwischenfassadenbereich nicht mit Sicherheit verhindert werden. Ebenfalls können Brandgase aufgrund der versagenden vertikalen und horizontalen Abschottungen in benachbarte und darüberliegende Räume gelangen.

## **6. VERGLEICH DER BRAND- UND RAUCHAUSBREITUNG BEI KASTENDOPPELFASSADE UND GANZFLÄCHENDOPPELFASSADE**

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß bei einer Kastendoppelfassade die Brand- und Rauchausbreitung sehr stark von den vertikalen und horizontalen Abschottungen des Fensterkastens abhängt. Reine Aluminiumabschottungen können aufgrund der gegenüber Stahl (ca. 1450°C) niedrigen Schmelztemperatur von ca. 660°C auch bei kleiner Brandlast (166 kg) nur kurzzeitig der Wärmebelastung durch die Flammen und Brandgase standhalten. Bei den Versuchen hat sich gezeigt, daß die obere horizontale Aluminiumabschottung des Brandraumfensterkastens nach 17 min 38 s vollständig, die vertikalen Abschottungen nach ca. 18 min teilweise durchbrennen. Beim Vergleich mit Versuchen mit einer Ganzflächendoppelfassade (Kunkelmann /2/) und gleicher Brandlast, jedoch geschlossenem statt gekipptem Wärmeschutzglasfenster der Innenfassade, ergibt sich bei Verwendung einer Kastendoppelfassade mit Aluminiumabschottungen ein um etwa 2 Minuten verzögerter Temperaturanstieg im Zwischenfassadenbereich des über dem Brandraum liegenden Stockwerkes.

Die Versuche mit Kastendoppelfassade haben weiterhin gezeigt, daß Stahlabschottungen eine Brand- und Rauchausbreitung im Zwischenfassadenbereich auch bei größeren Brandlasten (hier 332 kg) wirksam verhindern. Die Brand- und Rauchausbreitung in insbesondere darüberliegende Stockwerke kann hierbei allerdings von außen durch Feuerüberschlag aus dem Fensterkasten des Brandraumes erfolgen. Hierbei ist vor allem die Zerstörung der Verglasung in darüberliegenden Stockwerken möglich als auch die Brandausbreitung infolge der Wärmestrahlung durch die Verglasung. Weiterhin können heiße Brandgase durch Belüftungsöffnungen in der Außenfassade in andere Fassadenbereiche gelangen.

Die Auswirkung von Dämmstoffen, z.B. aus Mineral- oder Keramikfaser in den Aluminiumabschottungen auf das Durchbrandverhalten wurde nicht untersucht. Es ist jedoch damit zu rechnen, daß insbesondere bei den horizontalen Abschottungen diese Dämmstoffe durch das schnelle großflächige Versagen nach unten fallen und somit wirkungslos bleiben.

Die Verwendung von Glas als Abschottungsmaterial wurde ebenfalls nicht untersucht. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen von Kunkelmann /2,3/ haben jedoch gezeigt, daß bei der Verwendung von 8 mm starkem Einscheibensicherheitsglas in der Außenfassade dieses je nach Brandbelastung zwischen ca. 6 Minuten und ca. 37 Minuten versagt.

Die Versuche haben weiterhin gezeigt, daß die ESG-Scheiben der Kastendoppelfassade durch die Art der Brandbelastung in erhöhtem Maß ihre Vorspannung verlieren und sich wie normales Fensterglas verhalten. Hierdurch fallen große Scheibenstücke, teilweise sogar vollständige Scheiben, nach unten, wodurch Passanten und Hilfskräfte beträchtlich gefährdet werden können. Ursache hierfür ist mit großer Wahrscheinlichkeit die Geschwindigkeit des Aufheizvorganges der Scheiben bei der Brandbelastung. Insbesondere Versuch 1 (siehe Tabelle 3.1 und Tabelle 4) liefert hierzu Hinweise. Die ESG-Scheibe des oberen Fensterkastens wird in 1 min 26 s um ca. 580°C aufgeheizt und zerspringt nach 18 min 59 s in kleine Bruchstücke. Die ESG-Scheibe des unteren Fensterkastens dagegen wird in dem gleichen Zeitraum von 18 min 59 s auf ca. 700°C aufgeheizt und zerspringt nicht. Diese Scheibe weist plastische Verformungen auf und hat somit ihre Vorspannung verloren. Dieser langsame Aufheizvorgang war bei allen Versuchen mit Kastendoppelfassade mehr oder weniger stark ausgeprägt und führte bei den versagenden ESG-Scheiben zu teilweise sehr großen Bruchstücken. Dieser Vorspannungsverlust trat bei Ganzflächendoppelfassaden aufgrund der gegenüber der Kastendoppelfassade schnelleren Aufheizung der ESG-Scheiben nicht in dem Maße auf.

Im Vergleich zu einer Ganzflächendoppelfassade ergibt sich bei einer Kastendoppelfassade mit rauchdichten und feuerwiderstandsfähigen Abschottungen eine deutlich geringere Brand- und Rauchausbreitung im Zwischenfassadenbereich.

Bild 21 (S.45) zeigt einen Vergleich der maximalen Temperaturen an der ESG-Verglasung und zu welchem Zeitpunkt diese bei der Ganzflächen- und Kastendoppelfassade auftreten.

Bild 22 (S.46) vergleicht die Maximalwerte der Wärmestrahlung und Temperatur zentral am Fenster der Innenfassade des darüberliegenden Stockwerkes bei Ganzflächen- und Kastendoppelfassade. Die Meßwerte liegen bei der Kastendoppelfassade, vergleicht man die Versuche 1, 2, 3 (Abstand 0,6 m) mit den Versuchen mit der Ganzflächendoppelfassade Versuch 5 (Abstand: 0,8 m), Versuch 6 (Abstand: 0,3 m), Versuch 7 (Abstand: 0,8 m), insgesamt niedriger als bei der Ganzflächendoppelfassade. Es ist jedoch zu beachten, daß Werte erreicht werden, die im Bereich der Bestrahlungsstärke für Fremdentzündung liegen. Auch wird sich der Bestrahlungswert bei der Kastendoppelfassade bei Verringerung des Abstandes von 0,6 m auf 0,3 m erhöhen.



## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Zur experimentellen Untersuchung der Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden im Zwischenfassadenbereich sowie in benachbarte und darüberliegende Räume wurden Brandversuche in einer dafür aufgebauten Versuchseinrichtung mit Brandraum, Flur, Nebenraum und Kastendoppelfassade durchgeführt. Weiterhin werden die hieraus gewonnenen Versuchsergebnisse mit den bereits an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Versuchen an einer Ganzflächendoppelfassade verglichen. Die Kastendoppelfassade zählt in Fachkreisen zu den unkritischsten Doppelfassadentypen bezüglich der Brand- und Rauchausbreitung in angrenzende Fassadenbereiche. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß bei einer Kastendoppelfassade die Brand- und Rauchausbreitung im Zwischenfassadenbereich sehr stark von den vertikalen und horizontalen Abschottungen des Fensterkastens abhängt. Reine Aluminiumabschottungen können aufgrund der gegenüber Stahl niedrigeren Schmelztemperatur auch bei kleiner Brandlast nur kurzzeitig der Wärmebelastung durch die Flammen und Brandgase standhalten. Beim Vergleich mit Versuchen mit einer Ganzflächendoppelfassade bei ähnlichen Versuchsbedingungen ergibt sich bei Verwendung einer Kastendoppelfassade mit Aluminiumabschottungen ein nur etwas verzögerter Temperaturanstieg im Zwischenfassadenbereich des über dem Brandraum liegenden Stockwerkes. Die Versuche mit Kastendoppelfassade haben weiterhin gezeigt, daß rauchdichte Stahlabschottungen eine Brand- und Rauchausbreitung im Zwischenfassadenbereich auch bei größeren Brandlasten wirksam verhindern. Die Brand- und Rauchausbreitung insbesondere in darüberliegende Stockwerke kann hier allerdings von außen durch Feuerüberschlag aus dem Fensterkasten des Brandraumes erfolgen. Hierbei ist vor allem die Zerstörung der Verglasung in darüberliegenden Stockwerken möglich als auch die Brandausbreitung infolge der Wärmestrahlung durch die Verglasung. Weiterhin können heiße Brandgase durch Belüftungsöffnungen in der Außenfassade in andere Fassadenbereiche gelangen. Von besonderer Bedeutung bei der Kastendoppelfassade ist, daß aufgrund des auftretenden Temperaturanstiegs im Kastenbereich die Scheiben der Außenfassade aus Einscheibensicherheitsglas ihre Vorspannung verlieren können und sich dann wie normales Fensterglas verhalten. Hierdurch fallen große Scheibenstücke, teilweise sogar vollständige Scheiben, nach unten, wodurch Passanten und Hilfskräfte beträchtlich gefährdet werden können. Dieser Vorspannungsverlust tritt bei Ganzflächendoppelfassaden nicht in dem Maße auf. Im Vergleich zu einer Ganzflächendoppelfassade ergibt sich bei einer Kastendoppelfassade mit rauchdichten und feuerwiderstandsfähigen Abschottungen eine deutlich geringere Brand- und Rauchausbreitung im Zwischenfassadenbereich.

## 8. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Kunkelmann J.: Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung.  
Teil 1: - Literaturoberwertung  
- Einflußgrößen auf die Brand- und Rauchausbreitung  
- Brandversuche  
Forschungsbericht Nr. 100 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrrangelegenheiten  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1996)
- /2/ Kunkelmann J.: Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung.  
Teil 2: Untersuchungen an einer Ganzflächendoppelfassade  
- Brandversuche bei unterschiedlichen Abständen zwischen Innen- und Außenfassade  
- Verhalten von Wärmeschutzglas und Einscheibensicherheitsglas im Brandfall  
Forschungsbericht Nr. 105 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1997)
- /3/ Kunkelmann J.: Auswirkung des Einsatzes ortsfester Wassernebellöschanlagen auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden.  
Teil 3: - Literaturoberwertung (Wassernebel löschanlagen - Entwicklung, Löschrinzipien, Einsatzgebiete, Anwendungsgrenzen, Anlagentechnik, Normung)  
- Brand- und Löschrversuche in einem Gebäudeausschnitt mit einer Ganzflächendoppelfassade  
Forschungsbericht Nr. 108 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1998)
- /4/ Kunkelmann J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 12: - Zusammenstellung von Erkenntnissen aus theoretischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen als Planungshilfe zur Ausführung von Lagern und Sprinkleranlagen sowie zur Überprüfung von numerischen Simulationen.  
- Darstellung der Problematik bei der meßtechnischen Erfassung von physikalisch/chemischen Größen bei Brand- und Löschrversuchen insbesondere im Hinblick auf die Verwendung bei numerischen Simulationen.  
Forschungsbericht Nr. 95 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1995)

9. Tabellen

Tabelle 1: Meßstellenliste

Meßstellenbezeichnung	Versuchs-Nr.	Position der Meßstellen
$\Delta M$	1, 2, 3	Abbrandwaage - Brandraumboden
		<b>Prandtl-Rohre (dynamischer Druck, Strömungsgeschwindigkeit)</b>
p1	1, 2, 3	<b>Mitte der Zuluftöffnung des unteren Fensterkastens in den Zwischenfassadenbereich</b> Sondenöffnung Richtung Umgebung
p2	1, 2, 3	<b>Mitte der Abluftöffnung des unteren Fensterkastens aus dem Zwischenfassadenbereich</b> Sondenöffnung Richtung Zwischenfassadenbereich
p3	1, 2, 3	<b>Zentral im unteren Drittel des Brandraumfensters</b> Sondenöffnung Richtung Zwischenfassadenbereich
p4	1, 2, 3	<b>Zentral in den oberen zwei Drittel des Brandraumfensters</b> , Sondenöffnung Richtung Brandraum
p5	1, 2, 3	<b>Zentral im oberen Fensterkasten</b> Sondenöffnung vertikal nach unten, Richtung unterer Fensterkasten
p6	1, 2	<b>Zentral im unteren Drittel der Brandraumtür</b> Sondenöffnung Richtung Flur
p7	1, 2	<b>Zentral in den oberen zwei Drittel der Brandraumtür</b> Sondenöffnung Richtung Brandraum
WSA	1, 2, 3	<b>Wärmestrahlungsaufnehmer</b> (Typ: Gardon, Sichtwinkel: 180°) Sensor bündig mit Oberfläche der Innenfassade, Mitte der oberen, durch Silikat-Brandschutzbauplatte verschlossenen Fensteröffnung, im Bereich von Temperaturmeßstelle TOR1
		<b>Temperaturmeßstellen</b>
TB1	1, 2, 3	<b>Brandraum</b> , zentral im Raum in 1,5m Höhe
TB2	1, 2, 3	<b>Brandraum</b> , zentral im Raum 5 cm unter der Decke

zu Tabelle 1		
Meßstellenbezeichnung	Versuchs-Nr.	Position der Meßstellen
		<b>Temperaturmeßstellen</b>
TB4	1, 2, 3	<b>Brandraum</b> , 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: vorne links
TB5	1, 2, 3	<b>Brandraum</b> , 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: hinten links
TB6	1, 2, 3	<b>Brandraum</b> , 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: hinten rechts
TB7	1, 2, 3	<b>Brandraum</b> , 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: vorne rechts
TBF2	1, 2, 3	<b>Brandraum, Fenster</b> , innen, 5 cm unter Oberkante des Rahmens, 5 cm entfernt vom rechten (Blick auf die Fassade) Rahmen
TBFi	1, 2, 3	<b>Brandraum, Fenster</b> , innen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze in kleiner Bohrung im Rahmen direkt neben dem Glas
TBFa	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich, Fenster</b> , außen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze in kleiner Bohrung im Rahmen direkt neben dem Glas
TBo	1, 2, 3	<b>Brandraumtür</b> , Mitte Türumrahmung oben, 5 cm Abstand
TBu	1, 2	<b>Brandraumtür</b> , Mitte unten, 5 cm Abstand vom Boden
TOR1	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich</b> , Mitte der oberen, durch Silikat-Brandschutzbauplatte verschlossenen Fensteröffnung, Oberfläche der Innenfassade
Tp1	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich</b> , Temperatur am Prandtl-Rohr p1
Tp2	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich</b> , Temperatur am Prandtl-Rohr p2
Tp3	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich</b> , Temperatur am Prandtl-Rohr p3
Tp4	1, 2, 3	Zwischenfassadenbereich, Temperatur am Prandtl-Rohr p7
Tp5	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich</b> , Temperatur am Prandtl-Rohr p5

zu Tabelle 1		
Meßstellenbezeichnung	Versuchsnr.	Position der Meßstellen
Tp6	1, 2	<b>Brandraumtür</b> , Temperatur am Prandtl-Rohr p6
Tp7	1, 2	<b>Brandraumtür</b> , Temperatur am Prandtl-Rohr p7
TZ3.1	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich, Mitte der unteren ESG-Scheibe (Oberfläche)</b>
TZ3.2	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich, Oberkante Mitte der unteren ESG-Scheibe</b>
TZ3.3	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich, Mitte der oberen ESG-Scheibe (Oberfläche)</b>
TZ5	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich, über oberer horizontaler Abschottung des unteren Fensterkastens links (Blick von außen auf die Außenfassade), Mitte zwischen Innen- und Außenfassade</b>
TZ6	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich, über oberer horizontaler Abschottung des unteren Fensterkastens rechts (Blick von außen auf die Außenfassade), Mitte zwischen Innen- und Außenfassade</b>
TZ7	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich, über oberer horizontaler Abschottung des unteren Fensterkastens Mitte (Blick von außen auf die Außenfassade), Mitte zwischen Innen- und Außenfassade</b>
TZ9	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich, Oberkante der Außenfassade, Mitte, Mitte zwischen Innen- und Außenfassade</b>
TZ10	1, 2, 3	<b>Zwischenfassadenbereich, über oberer horizontaler Abschottung des oberen Fensterkastens Mitte (Blick von außen auf die Außenfassade), Mitte zwischen Innen- und Außenfassade</b>
TF2	1, 2, 3	<b>Flur</b> , zentral im Raum, 5 cm unter der Decke
TF3	1, 2, 3	<b>Flur</b> , zentral im Raum in 1,5 m Höhe
TF4	1, 2, 3	<b>Flur</b> , Tür zur Halle, Oberkante, Mitte
TF5	1, 2, 3	<b>Flur</b> , Tür zum Nebenraum, Oberkante, Mitte
TN1	1, 2, 3	<b>Nebenraum</b> , Tür, Mitte, Höhe 1,5 m
TN2	1, 2, 3	<b>Nebenraum</b> , zentral im Raum, 5 cm unter der Decke
TN3	1, 2, 3	<b>Nebenraum</b> , zentral im Raum, Höhe 1,5 m

zu Tabelle 1		
Meßstellenbezeichnung	Versuchsnr.	Position der Meßstellen
		<b>Gaskonzentrationen</b>
O <sub>2</sub> B	1, 2, 3	<b>Brandraum - Sauerstoffkonzentration</b> , zentral im Raum in 1,5 m Höhe
CO <sub>2</sub> B	1, 2, 3	<b>Brandraum - Kohlendioxidkonzentration</b> , zentral im Raum in 1,5 m Höhe
COB	1, 2, 3	<b>Brandraum - Kohlenmonoxidkonzentration</b> , zentral im Raum in 1,5 m Höhe
O <sub>2</sub> A	1, 2, 3	<b>Sauerstoffkonzentration in der Abluft</b>
CO <sub>2</sub> A	1, 2, 3	<b>Kohlendioxidkonzentration in der Abluft</b>
COA	1, 2, 3	<b>Kohlenmonoxidkonzentration in der Abluft</b>
CO <sub>2</sub> Z	1, 2, 3	<b>Kohlendioxidkonzentration</b> , zentral im oberen Fensterkasten

Tabelle 2.1: Kastendoppelfassade - Versuch 1

Versuchsaufbau / Brandlast	Versuchsablauf (Versuchszeit in min : s - Bemerkungen)	Versuchsergebnisse
<p>* <b>Brandraum:</b> 1 Brandlastpalette mit ca. 166 kg bestehend aus 152,1 kg Holz 3,2 kg Styropor, 8,8 kg Linoleum, 1,1 kg Nadelstizpechboden, 1,1 kg Vorhang und 1 Zündwanne (250 mm * 175 mm * 30 mm) mit 0,5 l (0,35 kg) Heptan, Brandlast vor dem Fenster angeordnet, - Vorhang am Fenster (Baumwolle/Polyester-Mischgewebe ohne Brandstaurausrüstung), 1,1 kg + Dachlatte als Vorhangschiene 1,75 kg - Brandraumtür: 1985 mm * 985 mm (1,96m<sup>2</sup>), geöffnet - Flurtür zum Nebenraum: 1985 mm * 985 mm (1,96m<sup>2</sup>), geschlossen - Flurtür zur Halle: 1985 mm * 985 mm (1,96m<sup>2</sup>), geöffnet</p> <p>* <b>Innenfassade:</b> PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum (Öffnungsfläche: 0,15 m<sup>2</sup>), (4-16-4, k=1,5 W/m<sup>2</sup>K) Rahmen: Höhe: 1350mm, Breite: 1050 mm (1,42 m<sup>2</sup>), Glas:Höhe: 1160mm, Breite: 860 mm (1m<sup>2</sup>), gekippt (Öffnungsfläche: 0,15 m<sup>2</sup>) 2. Geschöß durch Wand aus Silikat-Brandschutzbauplatten angedeutet</p> <p>* <b>Zwischenfassadenbereich:</b> Kastendoppelfassade: Geschößweise durchlüftete Fassade mit horizontalen Abschottungen je Geschöß und vertikalen Abschottungen je Fenster Abschottungen vertikal und horizontal: 25 mm dick (Aluminiumverkanthohr, beiderseits mit 2,5 mm Aluminiumblech beplankt)</p> <p>* <b>Außenfassade:</b> Abstand: 0,6 m Material: Silikat-Brandschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofilssystem mit Glashalteristen (Material: AlMgSi0,5F22), 2 Einzelrahmen übereinander [Rahmen jeweils: Höhe: 1180 mm, Breite: 1050 mm (1,24 m<sup>2</sup>), Glas: Höhe: 1048 mm, Breite: 918 mm (0,96m<sup>2</sup>)], ESG: 8mm stark, Verglasungsgummi: EPDM Zu- u. Abluftöffnung: offen, je Fensterkasten: jeweils 100 mm hoch * Breite der Verglasung (0,1m<sup>2</sup>)</p>	<p>0 : 00 Zündung der Brandlastpalette unterhalb der Zündkrippe 3 : 42 Linke Vorhanghälfte beginnt sich an der Vorhangleiste zu lösen 4 : 25 Linke Vorhanghälfte fällt herunter (Bis zu diesem Zeitpunkt nur Abschmelzen, keine Entflammung des Vorhanges erkennbar) 4 : 30 Rechte Vorhanghälfte beginnt sich an der Vorhangleiste zu lösen 5 : 00 Rauchschicht im Brandraum ist ca. bis zur halben Brandraumfensterhöhe abgesunken 6 : 18 Rechte Vorhanghälfte fällt herunter (Bis zu diesem Zeitpunkt nur Abschmelzen, keine Entflammung des Vorhanges erkennbar), ESG-Verglasung beschlägt durch Wasserdampf aus der Brandlast und dem Verbrennungsvorgang 8 : 10 Flammen im Deckenbereich des Brandraumes durch untere ESG-Scheibe erkennbar 9 : 38 Flammen im Brandraum durch starke Ver Rauchung des unteren Fensterkastens nicht mehr erkennbar, Rauchaustritt aus den Zu- und Abluftöffnungen des unteren Fensterkastens <b>10 : 28 Gekipptes Wärmeschutzglasfenster der Innenfassade fällt in den Brandraum.</b> 13 : 54 Starker Rauchaustritt aus den Zu- und Abluftöffnungen des unteren Fensterkastens 14 : 12 Flammerscheinung durch hinteres Beobachtungsfenster des Brandraumes aufgrund starker Ver Rauchung nicht mehr erkennbar 16 : 50 Flammen im oberen Bereich des unteren Fensterkastens wiedererkennbar <b>17 : 38 Durchbrand der oberen Abschottung des unteren Fensterkastens</b> 17 : 40 Hinter der unteren ESG-Scheibe sind vollflächig Flammen erkennbar, Flammen im oberen Fensterkasten 17 : 43 Flammen im Brandraum durch Brandraumfenster wieder erkennbar <b>17 : 49 Durchbrand im linken oberen vertikalen Abschottungsbereich des unteren Fensterkastens (Öffnung ca. 1cm * 8cm)</b> 17 : 56 Verglasungsgummi und Aluminiumrahmentteile (hell-grelles Licht) brennen <b>18 : 10 Durchbrand im rechten oberen vertikalen Abschottungsbereich des unteren Fensterkastens (Öffnung ca. 50cm Durchmesser)</b> <b>18 : 59 Obere ESG-Scheibe zerspringt schlagartig ohne Ribbildungsgerausche in kleinen Bruchstücken</b> 19 : 40 Beginnende Abklingphase des Brandes</p> <p><i>Die untere ESG-Scheibe zerspringt nicht. Sie hat leichte plastische Verformungen und Ribbildungen (Scheibe hat Vorspannung verloren).</i></p>	<p><b>Versuchsergebnisse</b></p> <p>* <b>Maximale Deckentemperatur im Brandraum:</b> TBk=967 °C nach 17 min 33 s, (TBF2=1080 °C nach 17 min 48 s)</p> <p>* <b>Temperaturen an der Innenfassade bzw. im Zwischenfassadenbereich:</b> Maximale Temperatur im unteren Fensterkasten: TBFa=1068 °C nach 17 min 51 s * <b>Durchbrand der oberen horizontalen Aluminiumabschottung des unteren Fensterkastens:</b> 17 min 38 s (TZ7) Maximale Temperatur im oberen Fensterkasten: TZ7=946 °C nach 18 min 27 s</p> <p>* <b>Durchbrand im linken oberen vertikalen Abschottungsbereich des unteren Fensterkastens (Öffnung ca. 1cm * 8 cm) nach 17 min 49 s</b></p> <p>* <b>Durchbrand im rechten oberen vertikalen Abschottungsbereich des unteren Fensterkastens (Öffnung ca. 50cm Durchmesser) nach 18 min 10 s</b></p> <p>* <b>Maximale Temperaturen an der Innenseite der ESG-Verglasung der Außenfassade:</b> Untere Fensterkasten: TZ3.1=811 °C nach 18 min 39 s, TZ3.2=819 °C nach 17 min 45 s Obere Fensterkasten: TZ3.3=798 °C nach 19 min 21 s</p> <p>* <b>Versagen der Verglasungen:</b> - <b>Wärmeschutzglasfenster</b> fällt nach 10 min 28 s in den Brandraum, da sich durch die Wärmeinwirkung die in den PVC-Rahmen genieteten Kippscharniere lösen Temperaturen beim Versagen: TBFF= 640 °C, TBF2= 581 °C, TBFa= 154 °C - <b>ESG-Verglasung des unteren Fensterkastens:</b> zerspringt nicht, leichte plastische Verformung und Ribbildung, Scheibe hat Vorspannung verloren Temperaturen beim Zerspringen: -- [Temperaturanstieg um ca. 700 °C in 18 min 59 s (Zeitpunkt des Zerspringens der oberen ESG-Scheibe)]</p> <p>- <b>ESG-Verglasung des oberen Fensterkastens:</b> zerspringt nach 18 min 59 s Temperaturen beim Zerspringen: TZ3.3=657 °C Temperaturanstieg um ca. 580 °C in 1 min 26 s</p> <p>* <b>Flur:</b> Maximale Temperaturen: TBTu=69 °C nach 18 min 48 s, TBTa=500 °C nach 15 min 39 s, TP2=449 °C nach 18 min 57 s</p> <p>* <b>Nebenraum - Tür zum Nebenraum geschlossen</b> Temperaturen unter 62 °C</p> <p>* <b>Gaskonzentrationen im Brandraum:</b> <i>minimaler O<sub>2</sub>-Wert:</i> 3,8 Vol% nach 19 min 9 s <i>maximaler CO<sub>2</sub>-W:</i> 16,2 Vol% nach 19 min 3 s <i>max. CO-W:</i> 0,56 Vol% nach 16 min 6 s</p> <p>* <b>Gaskonzentrationen im Abgas:</b> <i>minimaler O<sub>2</sub>-Wert:</i> 19,3 Vol% nach 23 min 42 s <i>maximaler CO<sub>2</sub>-W:</i> 1,45 Vol% nach 23 min 9s <i>maximaler CO-W:</i> 0,07 Vol% nach 18 min 36 s</p> <p>* <b>Gaskonzentrationen im oberen Fensterkasten:</b> <i>maximaler CO<sub>2</sub>-W:</i> 15,0 Vol% nach 20 min 12s, steiler Anstieg nach 17 min 36 s</p>

<sup>1</sup> Die Angaben "links" und "rechts" ergeben sich aus der Blickrichtung von außen auf die Außenfassade.

Tabelle 2.2: Kastendoppelfassade - Versuch 2

Versuchsaufbau / Brandlast	Versuchsablauf (Versuchszeit in min : s - Bemerkungen)	Versuchsergebnisse
<p><b>* Brandraum:</b> 1 Brandlastpalette mit ca. 166 kg bestehend aus 152,1 kg Holz, 3,2 kg Styropor, 8,8 kg Linoleum, 1,1 kg Nadelnadelstoppichboden, 1,1 kg Vorhang und 1 Zündwanne (250 mm * 175 mm * 30 mm) mit 0,5 l (0,35 kg) Heptan, Brandlast vor dem Fenster angeordnet. - Vorhang am Fenster (Baumwolle/Polyester-Mischgewebe ohne Brandschutztausrüstung), 1,1 kg + Dachlatte als Vorhangschiene 1,75 kg - Brandraumtür: 1985 mm * 985 mm (1,96m<sup>2</sup>), geöffnet - Flur zur Nebenraum: 1985 mm * 985 mm (1,96m<sup>2</sup>), geschlossen - Flur zur Halle: 1985 mm * 985 mm (1,96m<sup>2</sup>), geöffnet</p> <p><b>* Innenfassade:</b> PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum (Öffnungsfläche: 0,15 m<sup>2</sup>), (4-16-4, k=1,5 W/m<sup>2</sup>K), Rahmen: Höhe: 1350mm, Breite: 1050 mm, (1,42 m<sup>2</sup>), Glas: Höhe: 1160mm, Breite: 860 mm (1m<sup>2</sup>), gekippt (Öffnungsfläche: 0,15 m<sup>2</sup>) 2. Geschob durch Wand aus Silikat-Brandschutzbauplatten angedeutet</p> <p><b>* Zwischenfassadenbereich:</b> Kastendoppelfassade: Geschobweise durchlüftete Fassade mit horizontalen Abschothungen je Geschob und vertikalen Abschothungen je Fenster Abschothungen vertikal und horizontal: 22 mm dick (Stahlvierkantrohre, beiderseits mit 1 mm Stahlblech beplankt)</p> <p><b>* Außenfassade:</b> Abstand: 0,6 m Material: Silikat-Brandschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofilsystem mit Glashalbleisten (Material: AlMgSi0,5F22), 2 Einzelrahmen übereinander (Rahmen jeweils: Höhe: 1180 mm, Breite: 1050 mm (1,24 m<sup>2</sup>), Glas: Höhe: 1048 mm, Breite: 918 mm (0,96m<sup>2</sup>), ESG: 8mm stark, Verglasungsgummi: EPDM Zu- u. Abluftöffnung: offen, je Fensterkasten: jeweils 100 mm hoch * Breite der Verglasung (0,1m<sup>2</sup>)</p>	<p>0 : 00 Zündung der Brandlastpalette unterhalb der Zündkrippe 2 : 51 Linke Vorhanghälfte beginnt sich an der Vorhangleiste zu lösen 4 : 04 Linke Vorhanghälfte fällt herunter (Bis zu diesem Zeitpunkt nur Abschmelzen, keine Entflammung des Vorhanges erkennbar) 4 : 11 Rechte Vorhanghälfte beginnt sich an der Vorhangleiste zu lösen 5 : 27 Flammen im Deckenbereich des Brandraumes durch untere ESG-Scheibe erkennbar 5 : 40 Rechte Vorhanghälfte fällt herunter (Bis zu diesem Zeitpunkt nur Abschmelzen, keine Entflammung des Vorhanges erkennbar), ESG-Verglasung beschlägt durch Wasserdampf aus der Brandlast und dem Verbrennungsvorgang 7 : 47 Unterer Fensterkasten stark verrauchert, Rauchaustritt aus den Zu- und Abluftöffnungen des unteren Fensterkastens 7 : 51 <b>Gekipptes Wärmeschutzglasfenster der Innenfassade fällt in den Brandraum</b> 13 : 00 Starker Rauchaustritt aus den Zu- und Abluftöffnungen des unteren Fensterkastens 13 : 21 Flammen im Brandraum wegen vollständiger Verrauchung nicht mehr erkennbar 15 : 50 Unterer Fensterkasten mit Flammen wieder vollständig erkennbar 15 : 59 <b>Untere ESG-Scheibe zerspringt schlagartig in großen Stücken (größtes Stück hat 3/4 der Scheibengröße) ohne Ribbildungsgerausche Die großen Stücke zerspringen zum Teil beim Aufprall auf den Boden.</b> 16 : 10 Leichte Koglut im oberen Bereich der linken vertikalen Abschothung des unteren Fensterkastens 17 : 30 Beginnende Abklingphase des Brandes  <i>Die obere ESG-Scheibe zerspringt nicht. Beim Zerschlagen der Scheibe nach dem Versuch mit einem Nothammer mit kegelförmiger Stahlspitze zerspringt die ESG-Scheibe wie eine Scheibe mit Vorspannung in kleine Bruchstücke.</i> <b>Kein Durchbrand der Stahlabschottungen, nur leichte Verformungen.</b></p>	<p><b>Versuchsergebnisse</b></p> <p><b>* Maximale Deckentemperatur im Brandraum:</b> TB6=948 °C nach 15 min 54 s, (TBFI=1132 °C nach 15 min 51 s)</p> <p><b>* Temperaturen an der Innenfassade bzw. im Zwischenfassadenbereich:</b> Maximale Temperatur im unteren Fensterkasten: TBFa=1144 °C nach 15 min 36 s Maximale Temperatur im oberen Fensterkasten: TZ7=529 °C nach 16 min 57 s</p> <p><b>* Kein Durchbrand der Stahlabschottungen, nur leichte Verformungen</b></p> <p><b>* Maximale Temperaturen an der Innenseite der ESG-Verglasung der Außenfassade:</b> Unterer Fensterkasten: TZ3.1=863 °C nach 15 min 39 s TZ3.2=997 °C nach 16 min 6 s Oberer Fensterkasten: TZ3.3=202 °C nach 17 min 3 s</p> <p><b>* Versagen der Verglasungen:</b> - <b>Wärmeschutzglasfenster</b> fällt nach 7 min 51 s in den Brandraum, da sich durch die Wärmeeinwirkung die in den PVC-Rahmen genieteten Kippscharniere lösen Temperaturen beim Versagen: TBFI= 529 °C, TBFI2= 568 °C, TBFa= 401 °C</p> <p><b>- ESG-Verglasung des unteren Fensterkastens:</b> zerspringt schlagartig in großen Stücken ohne Ribbildungsgerausche (größtes Stück hat 3/4 der Scheibengröße - die großen Stücke zerspringen zum Teil beim Aufprall auf den Boden.) nach 15 min 59 s, Temperaturen beim Zerspringen: TZ3.1=833 °C, TZ3.2=838 °C, Temperaturanstieg um ca. 800 °C in ca. 12 min 40 s</p> <p><b>- ESG-Verglasung des oberen Fensterkastens:</b> zerspringt nicht. Beim Zerschlagen der Scheibe nach dem Versuch mit einem Nothammer mit kegelförmiger Stahlspitze zerspringt die ESG-Scheibe wie eine Scheibe mit Vorspannung in kleine Bruchstücke</p> <p><b>* Flur</b> Maximale Temperaturen: TBTu= 47 °C nach 18 min 51 s, TBTo=614 °C nach 15 min 51 s, TF2=430 °C nach 15 min 57 s</p> <p><b>* Nebenraum - Tür zum Nebenraum geschlossen</b> Temperaturen unter 64 °C</p> <p><b>* Gaskonzentrationen im Brandraum:</b> minimaler O<sub>2</sub>-Wert: 5,5 Vol% nach 16 min 33 s maximaler CO<sub>2</sub>-W.: 13,4 Vol% nach 16 min 51 s maximaler CO-W.: 0,56 Vol% nach 15 min 6 s</p> <p><b>* Gaskonzentrationen im Abgas:</b> minimaler O<sub>2</sub>-Wert: 19,4 Vol% nach 21 min 9 s maximaler CO<sub>2</sub>-W.: 1,4 Vol% nach 22 min 24 s maximaler CO-W.: 0,08 Vol% nach 19 min 42 s</p> <p><b>* Gaskonzentrationen im oberen Fensterkasten:</b> maximaler CO<sub>2</sub>-W.: 1,4 Vol% nach 17 min 33 s</p>

<sup>2</sup> Die Angaben "links" und "rechts" ergeben sich aus der Blickrichtung von außen auf die Außenfassade.



Tabelle 2.3: Kastendoppelfassade - Versuch 3

Versuchsaufbau / Brandlast	Versuchsablauf (Versuchszeit in min : s - Bemerkungen)	Versuchsergebnisse
<p>* <b>Brandraum:</b>                  2 Brandlastpaletten mit ca. 332 kg bestehend aus 304,2 kg Holz, 6,4 kg Styropor, 17,6 kg Linoleum, 2,2 kg Nadelholzsperrholz, 2,2 kg Vorhang und 2 Zündwannen (250 mm * 175 mm * 30 mm) mit je 0,5 l (0,35 kg) Heptan, Brandlast vor dem Fenster angeordnet.                  - Vorhang am Fenster (Baumwolle/Polyester-Mischgewebe ohne Brandschutzaustrüstung), 1,1 kg + Dachlatte als Vorhangschiene 1,75 kg                  - Brandraumtür: 1985 mm * 985 mm                  (1,96m<sup>2</sup>), Brandraumtür in der Anfangsphase geschlossen und dann wegen Luftmangel im Brandraum geöffnet                  - Flurtür zum Nebenraum: 1985 mm * 985 mm (1,96m<sup>2</sup>), geschlossen                  - Flurtür zur Halle: 1985 mm * 985 mm (1,96m<sup>2</sup>), geöffnet                  * <b>Innenfassade:</b>                  PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum (Öffnungsfläche: 0,15 m<sup>2</sup>), (4-16-4, k=1,5 W/m<sup>2</sup>K), Rahmen: Höhe:1350mm, Breite:1050 mm, (1,42 m<sup>2</sup>), Glas:Höhe: 1160mm, Breite: 860 mm (1m<sup>2</sup>), gekippt (Öffnungsfläche: 0,15 m<sup>2</sup>)                  2. Geschloß durch Wand aus Silikat-Brandschutzbauplatten angedeutet                  * <b>Zwischenfassadenbereich:</b>                  Kastendoppelfassade: Geschloßweise durchlüftete Fassade mit horizontalen Abschothungen je Geschloß und vertikalen Abschothungen je Fenster                  Abschothungen vertikal und horizontal: 22 mm dick (Stahlvierkantrohre, beiderseits mit 1mm Stahlblech beplankt)                  * <b>Außenfassade:</b> Abstand: 0,6 m                  Material: Silikat-Brandschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofilssystem mit Glashalfeisten (Material: AlMgSi0,5F22), 2 Einzelrahmen übereinander [Rahmen jeweils: Höhe: 1180 mm, Breite:1050 mm (1,24 m<sup>2</sup>), Glas: Höhe: 1048 mm, Breite: 918 mm (0,96m<sup>2</sup>)], ESG: 8mm stark, Verglasungsgummi: EPDM                  Zu- u. Abluftöffnung: offen, je Fensterkasten: jeweils 100 mm hoch * Breite der Verglasung (0,1m<sup>2</sup>)</p>	<p>0 : 00 Zündung der Brandlastpaletten unterhalb der beiden Zündkrippen                  2 : 39 Linke<sup>3</sup> Vorhanghälfte beginnt sich an der Vorhangleiste zu lösen                  3 : 11 Linke Vorhanghälfte fällt herunter (Bis zu diesem Zeitpunkt nur Abschmelzen, keine Entflammung des Vorhanges)                  3 : 41 Rechte<sup>3</sup> Vorhanghälfte beginnt sich an der Vorhangleiste zu lösen                  5 : 39 Rechte Vorhanghälfte fällt herunter (Bis zu diesem Zeitpunkt nur Abschmelzen, keine Entflammung des Vorhanges erkennbar), ESG-Verglasung beschlägt durch Wasserdampf aus der Brandlast und dem Verbrennungsvorgang                  7 : 00 Keine Flammen im Brandraum durch untere ESG-Scheibe aufgrund der starken Verrauchung des Fensterkastens                  9 : 17 <i>Gekipptes Wärmeschutzglasfenster der Innenfassade fällt in den Brandraum, etwas stärkerer Rauchaustritt aus den Zu- und Abluftöffnungen des unteren Fensterkastens</i>                  33 : 27 Brandraumtür wird wegen Luftmangel geöffnet, starke Rauchentwicklung im Bereich des unteren Fensterkastens, starke Brandentwicklung durch Zündung der großen Menge an noch nicht verbrannten Zersetzungsgase                  33 : 49 Brandgase entzündet sich an der Abluftöffnung des unteren Fensterkastens                  33 : 54 Unterer Fensterkasten wird vollständig beflammt                  37 : 00 Rechte vertikale Abschothung des unteren Fensterkastens glüht in der oberen Hälfte                  36 : 56 <i>Untere ESG-Scheibe fällt vollständig aus dem schmelzenden und brennenden (hellgelbes Licht) Rahmen und zerspringt auf dem Boden in große Stücke (keine Vorspannung)</i>                  ~42 : 00 Beginnende Abklingphase des Brandes</p> <p>Die obere ESG-Scheibe zerspringt während des Brandversuches nicht, sondern erst in erkaltem Zustand. Die kleinen Bruchstücke deuten auf eine noch vorhandene Vorspannung hin.  <b>Kein Durchbrand der Stahlabschottungen, nur leichte Verformungen.</b></p>	<p><b>Versuchsergebnisse</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* <b>Maximale Deckentemperatur im Brandraum:</b>                      TB6=1097 °C nach 36 min 39 s, (TBFF=1203 °C nach 37 min 24 s)</li> <li>* <b>Temperaturen an der Innenfassade bzw. im Zwischenfassadenbereich:</b>                      Maximale Temperatur im unteren Fensterkasten: TBFa=1235 °C nach 37 min 6 s                      Maximale Temperatur im oberen Fensterkasten: TZ5=704 °C nach 40 min</li> <li>* <b>Kein Durchbrand der Stahlabschottungen, nur leichte Verformungen</b></li> <li>* <b>Maximale Temperaturen an der Innenseite der ESG-Verglasung der Außenfassade:</b>                      Unterer Fensterkasten: TZ3.1=1003 °C nach 35 min 30 s                      TZ3.2=1108 °C nach 37 min 05 s                      Oberer Fensterkasten: TZ3.3= 394 °C nach 40 min 27 s</li> <li>* <b>Versagen der Verglasungen:</b>                      - <b>Wärmeschutzglasfenster</b> fällt nach 9 min 17 s in den Brandraum, da sich durch die Wärmeeinwirkung die in den PVC-Rahmen genieteten Kippscharniere lösen                      Temperaturen beim Versagen:                      TBFF= 511 °C, TBF2= 228 °C, TBFa= 424 °C</li> <li>- <b>ESG-Verglasung des unteren Fensterkastens:</b>                      Untere ESG-Scheibe fällt vollständig aus dem schmelzenden und brennenden (hellgelbes Licht) Rahmen und zerspringt auf dem Boden in große Stücke (keine Vorspannung)                      nach 36 min 56 s, Temperaturen: TZ3.1=927 °C, TZ3.2= 1047 °C, Temperaturanstieg um ca. 550 °C in ca. 34 min, dann weiterer schneller Temperaturanstieg um ca. 420 °C in 3 min 20 s!</li> <li>- <b>ESG-Verglasung des oberen Fensterkastens:</b>                      Die obere ESG-Scheibe zerspringt während des Brandversuches nicht, sondern erst in erkaltem Zustand. Die kleinen Bruchstücke deuten auf eine noch vorhandene Vorspannung hin.</li> <li>* <b>Flur</b>                      Maximale Temperaturen: TBTo=1004 °C nach 35 min 39 s                      TF2=792 °C nach 35 min 45 s</li> <li>* <b>Nebenraum</b> - Tür zum Nebenraum geschlossen                      Temperaturen unter 73 °C</li> <li>* <b>Gaskonzentrationen im Brandraum:</b>                      minimaler O<sub>2</sub>-Wert: 0 Vol% nach 35 min 30 s                      maximaler CO<sub>2</sub>-W.: 19,9 Vol% nach 37 min 42 s                      maximaler CO-W.: 3,8 Vol% nach 34 min 57 s</li> <li>* <b>Gaskonzentrationen im Abgas:</b>                      minimaler O<sub>2</sub>-Wert: 18,6 Vol% nach 41 min 9 s                      maximaler CO<sub>2</sub>-W.: 2,1 Vol% nach 41 min 51 s                      maximaler CO-W.: 0,18 Vol% nach 37 min 48 s</li> <li>* <b>Gaskonzentrationen im oberen Fensterkasten:</b>                      maximaler CO<sub>2</sub>-W.: 2,4 Vol% nach 38 min 30 s</li> </ul>

<sup>3</sup> Die Angaben "links" und "rechts" ergeben sich aus der Blickrichtung von außen auf die Außenfassade.

**Tabelle 3:** Heizwerte und Einzelmassen des Brandgutes  
(1 bzw. 2 Brandlastpaletten [in eckigen Klammern])

Stoff	Heizwert $H_u$ MJ/kg	Masse kg	Massenanteil
Styropor (PS 15 SE)	40	3,2 [6,4]	0,019
Holz <sup>4</sup>	16	152,1 [304,2]	0,912
Linoleum	19	8,8 [17,6]	0,053
Nadelfilz- teppichboden (Polypropylen)	43	1,1 [2,2]	0,007
Vorhang 50 % Baumwolle 50 % Polyester	20	1,1	0,007
n-Heptan	44,7	0,35 (0,5 l) [0,7 (1,0 l)]	0,002
<b>Mittlerer Heizwert bzw. Summe</b>	16,9	166,7 [332,2]	1

<sup>4</sup> Holzfeuchte zwischen 7% und 8,5 %

Tabelle 4: Versagen der Verglasungen von Innen- und Außenfassade

	Temperatur	Ganzflächen- doppelfassade Versuch 4	Ganzflächen- doppelfassade Versuch 5	Ganzflächen- doppelfassade Versuch 6	Ganzflächen- doppelfassade Versuch 7	Ganzflächen- doppelfassade Versuch 8	Kastendoppel- fassade Versuch 1	Kastendoppel- fassade Versuch 2	Kastendoppel- fassade Versuch 3
Wärmeschutzglasfenster (Innenfassade) 1. Rißbildung im Glas	TBFi	9 min 59 s 321°C	12 min 47 s 594°C	13 min 14 s 251°C	3 min 26 s 105°C <sup>5</sup>	- <sup>6</sup>	10 min 28 s 640°C <sup>5</sup>	7 min 51 s 529°C <sup>5</sup>	9 min 17 s 511°C <sup>5</sup>
	TBFa	9 min 59 s 53°C	12 min 47 s 84°C	13 min 14 s 99°C	3 min 26 s 35°C	"	10 min 28 s 154°C <sup>3</sup>	7 min 51 s 401°C <sup>5</sup>	9 min 17 s 424°C <sup>5</sup>
	TBFi	20 min 40 s 748°C	13 min 53 s 700°C	14 min 35 s 713°C	4 min 57 s 341°C	2 min 38 s 549°C	- <sup>7</sup>	- <sup>7</sup>	- <sup>7</sup>
	TBFa	20 min 40 s 167°C	13 min 53 s 103°C	14 min 35 s 136°C	4 min 57 s 340°C	-	- <sup>7</sup>	- <sup>7</sup>	- <sup>7</sup>
ESG-Verglasung (Außenfassade) Zerspringen der unteren ESG-Scheibe	TZ3.1	kein Zerspringen	kein Zerspringen	16 min 38 s 770°C	16 min 38 s 667°C <sup>8</sup>	7 min 50 s 612°C	kein Zerspringen <sup>9</sup>	15 min 59 s <sup>10</sup> 833°C	36 min 56 s <sup>11</sup> 927°C
	TZ3.2	"	"	16 min 38 s 703°C	16 min 34 s 745°C	7 min 50 s 702°C	"	15 min 59 s 838°C	36 min 56 s 1047°C
	TZ3.3	"	"	16 min 38 s 500°C	16 min 34 s 579°C	7 min 50 s 952°C	-	-	-
ESG-Verglasung (Außenfassade) Zerspringen der oberen ESG-Scheibe	TZ3.1	"	19 min 22 s 308°C	18 min 32 s 619°C	13 min 28 s 574°C	5 min 53 s 281°C	-	kein Zerspringen <sup>12</sup>	kein Zerspringen <sup>13</sup>
	TZ3.2	"	19 min 22 s 511°C	18 min 32 s 849°C	13 min 28 s 725°C	5 min 53 s 509°C	-	"	"
	TZ3.3	"	19 min 22 s 466°C	18 min 32 s 376°C	13 min 28 s 829°C	5 min 53 s 682°C	18 min 59 s 657°C	"	"

5 Gekippter Fensterflügel fällt durch Versagen des Kippmechanismus (Wärmeinwirkung auf PVC-Rahmen) in den Brandraum

6 Ohne Wärmeschutzglasfenster

7 Aufgrund der starken Verrauchung des unteren Fensterkastens und der vertikalen Abschottungen sind die ersten Flammen im Zwischenfassadenbereich sowohl von vorne als auch von der Seite nur sehr schwer erkennbar.

8 Kein Zerspringen, Beginn der plastischen Deformation der Scheibe im oberen Rahmenbereich - Scheibe hat Vorspannung verloren

9 Leichte plastische Deformation der ESG-Scheibe - Scheibe hat Vorspannung verloren

10 ESG-Scheibe zerspringt in großen Stücken - Scheibe hat einen Teil ihrer Vorspannung verloren

11 Die ESG-Scheibe fällt vollständig aus dem schmelzenden u. brennenden Rahmen u. zerspringt auf dem Boden in große Stücke - Scheibe hat Vorspannung verloren

12 Beim Zerschlagen der ESG-Scheibe mit einem Nothammer mit kegelförmiger Spitze nach dem Versuch zerspringt diese wie eine Scheibe mit Vorspannung in kleine Bruchstücke.

13 Die ESG-Scheibe zerspringt während des Brandversuches nicht, sondern erst in erkaltem Zustand. Die kleinen Bruchstücke deuten auf eine noch vorhandene Vorspannung hin.

10. BILDER

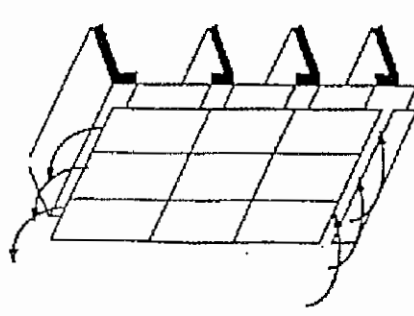
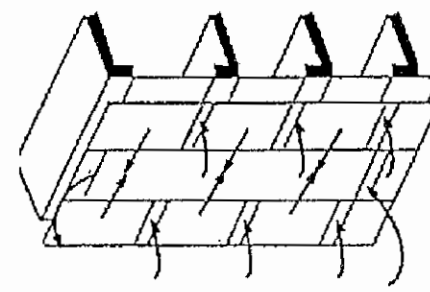
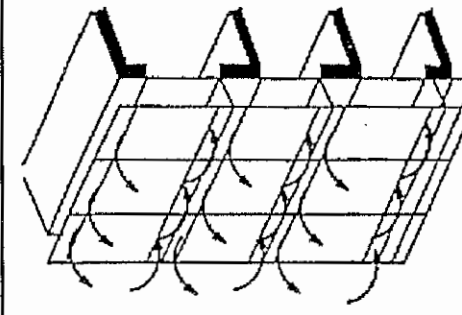
<b>Doppelfassadentypen</b>		
<b>Ganzflächendoppelfassade</b>	 <p>The diagram shows a double facade with a central cavity. Arrows indicate air flow from the interior through the cavity to the exterior. The facade is divided into a grid of rectangular panels.</p>	<p>Luftführung im Zwischenfasadenbereich erfolgt über das gesamte Gebäude. Der Zwischenfasadenbereich weist abgesehen von den Randbereichen des Gebäudes keine vertikalen und horizontalen Abschlottungen auf.</p>
<b>Kanaldoppelfassade</b>	 <p>The diagram shows a double facade with a central cavity. Arrows indicate air flow from the interior through vertical channels in the facade to the exterior. The facade is divided into a grid of rectangular panels.</p>	<p>Kastenfenster wechseln sich mit vertikalen Abluftkanälen ab. Die Kastenfenster haben Zulufföffnungen nach außen und Ablufföffnungen seitwärts zu den Abluftkanälen.</p>
<b>Kastendoppelfassade</b>	 <p>The diagram shows a double facade with a central cavity. Arrows indicate air flow from the interior through the cavity to the exterior. The facade is divided into a grid of rectangular panels, with horizontal lines indicating divisions between floors.</p>	<p>Geschoßweise durchlüftete Fassade mit horizontalen Abschlottungen je Geschloß und vertikalen Abschlottungen je Fenster.</p>

Bild 1: Doppelfassadentypen

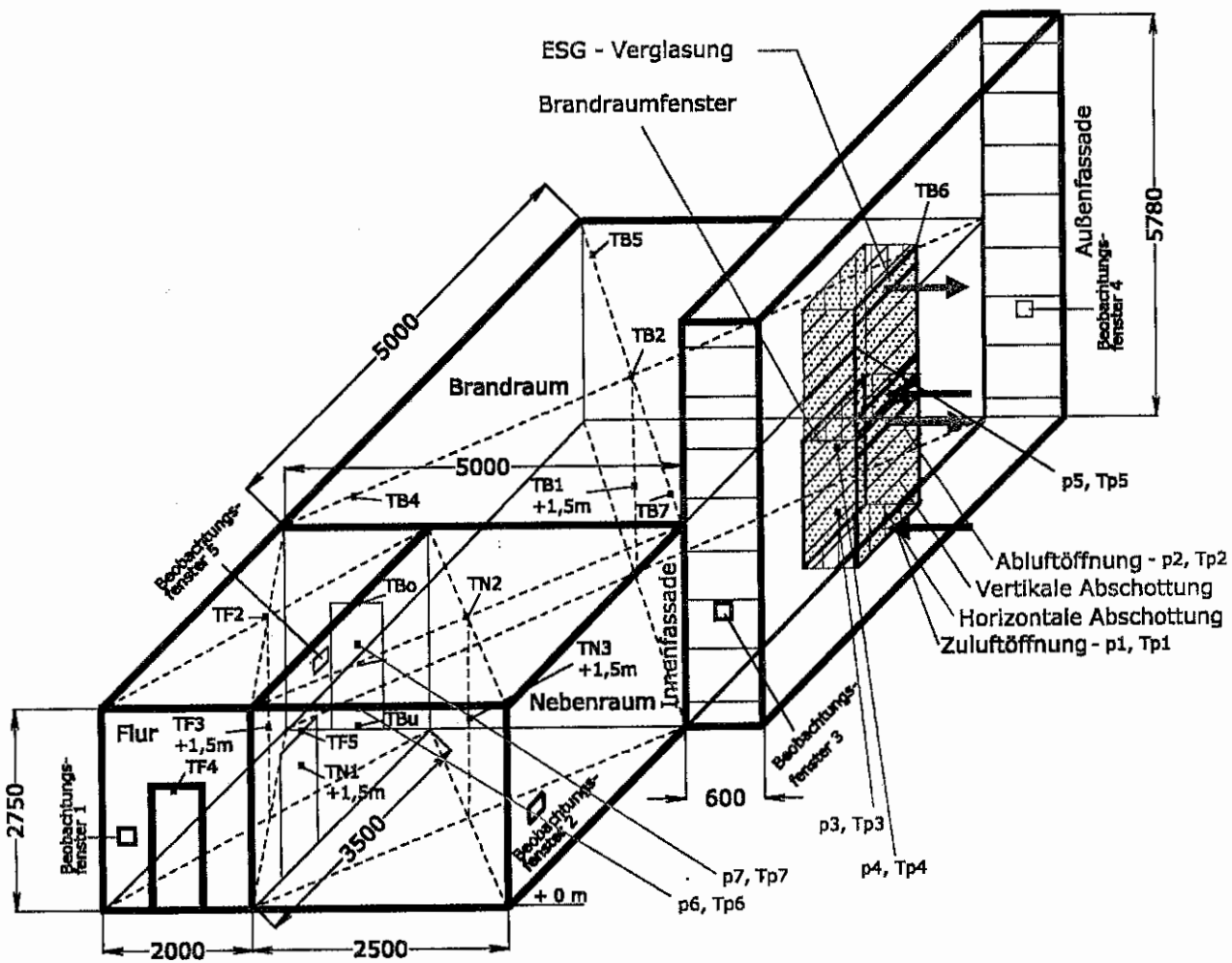
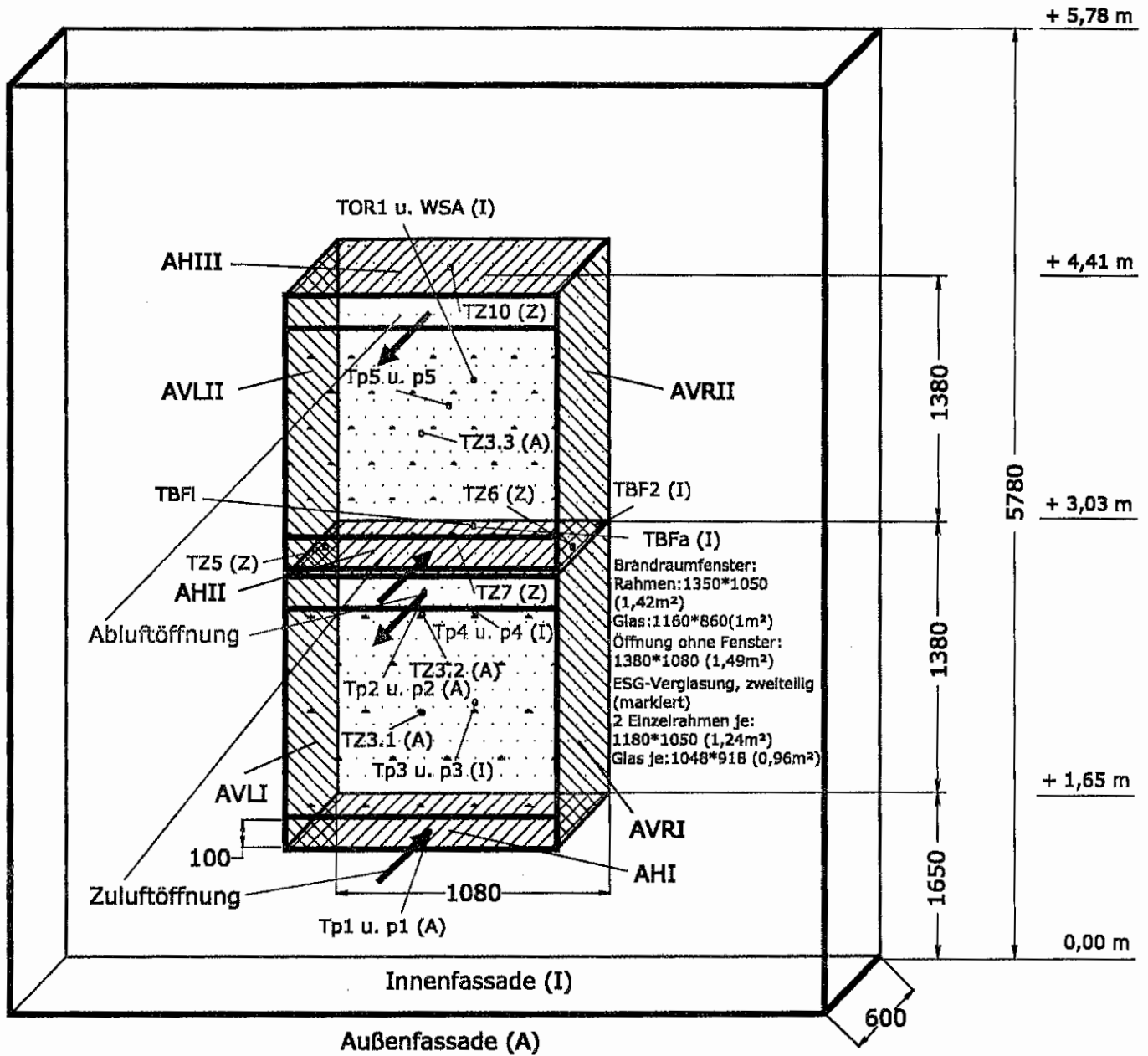


Bild 2: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus und Meßstellenplan - Gesamtdarstellung.



- Z: Zwischenfassadenbereich
- A: Außenfassade
- I: Innenfassade
- AHI, AHI, AHIII: horizontale Abschottungen
- AVLI, AVLII: vertikale Abschottungen links
- AVRI, AVRII: vertikale Abschottungen rechts

Bild 3: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus und Meßstellenplan - Zwischenfassadenbereich und Außenfassade.

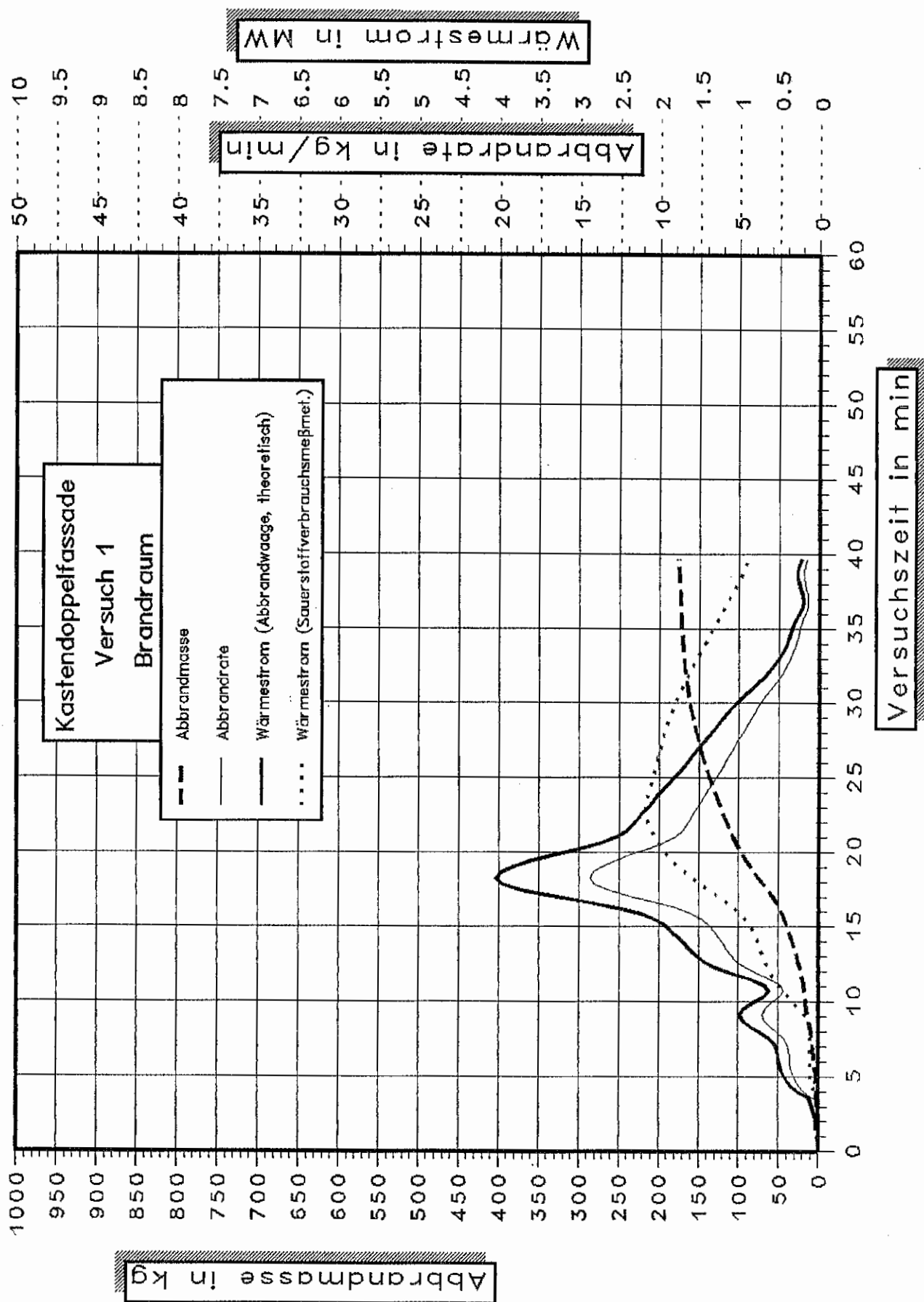
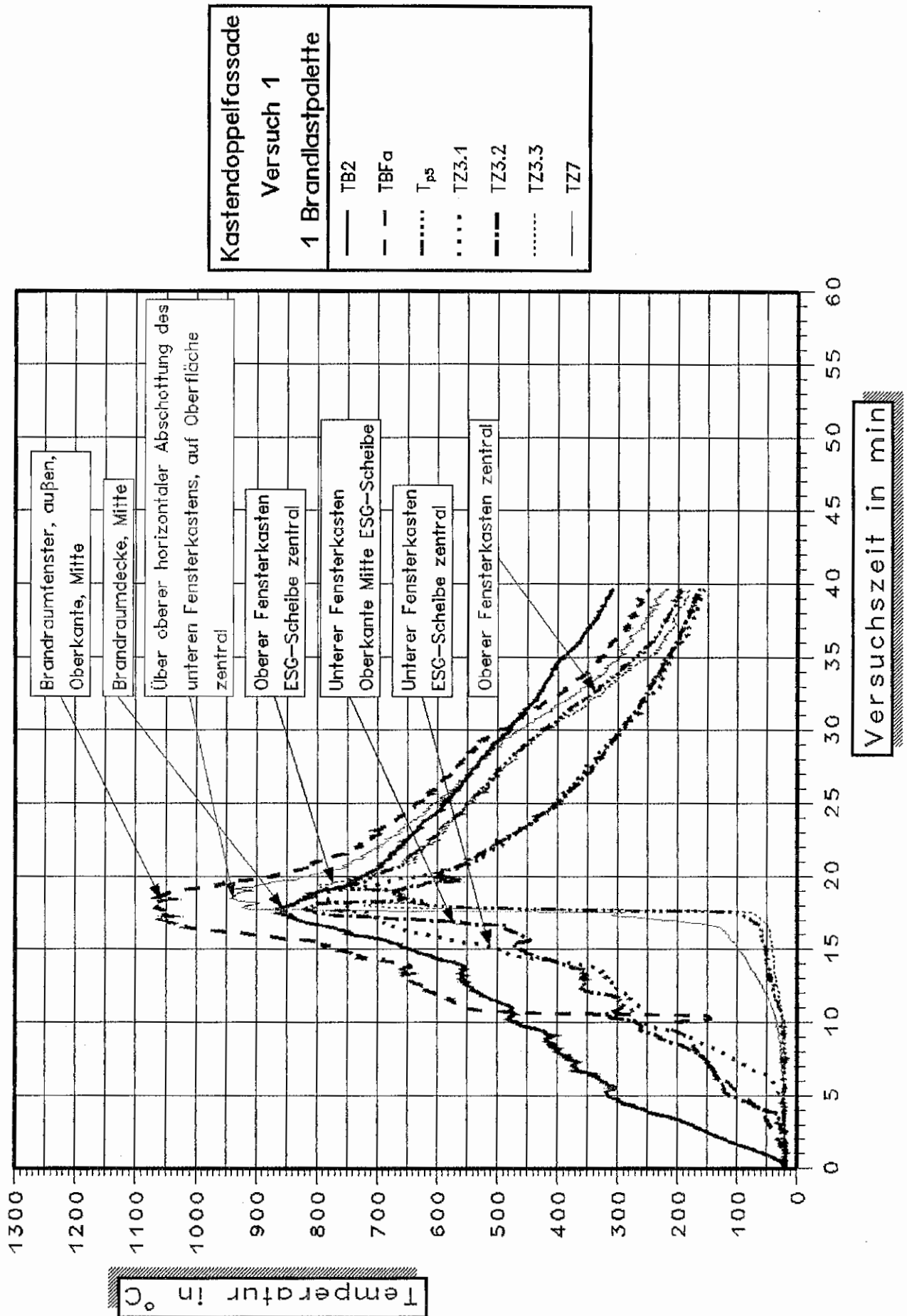


Bild 4: Zeitlicher Verlauf von Abbrandmasse, Abbrandrate und Wärmestrom.  
- Versuch 1 -



**Bild 5:** Vergleich ausgewählter zeitlicher Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, unterer und oberer Fensterkasten sowie an der Außenfassade.  
 - Versuch 1 -



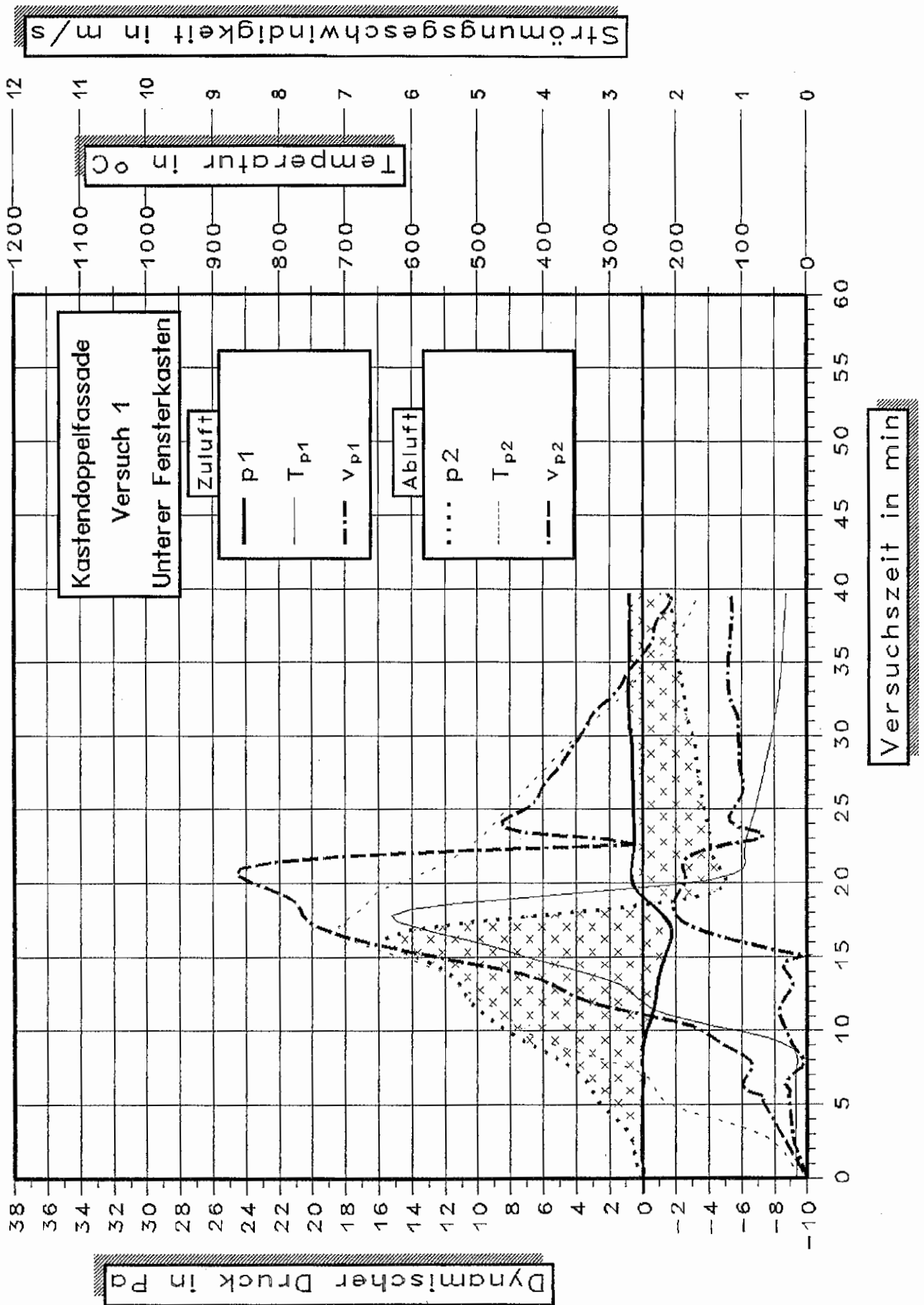


Bild 6: Zeitlicher Verlauf der dynamischen Drücke sowie der Strömungsgeschwindigkeiten an der Zu- und Abluftöffnung des unteren Fensterkastens. - Versuch 1 -

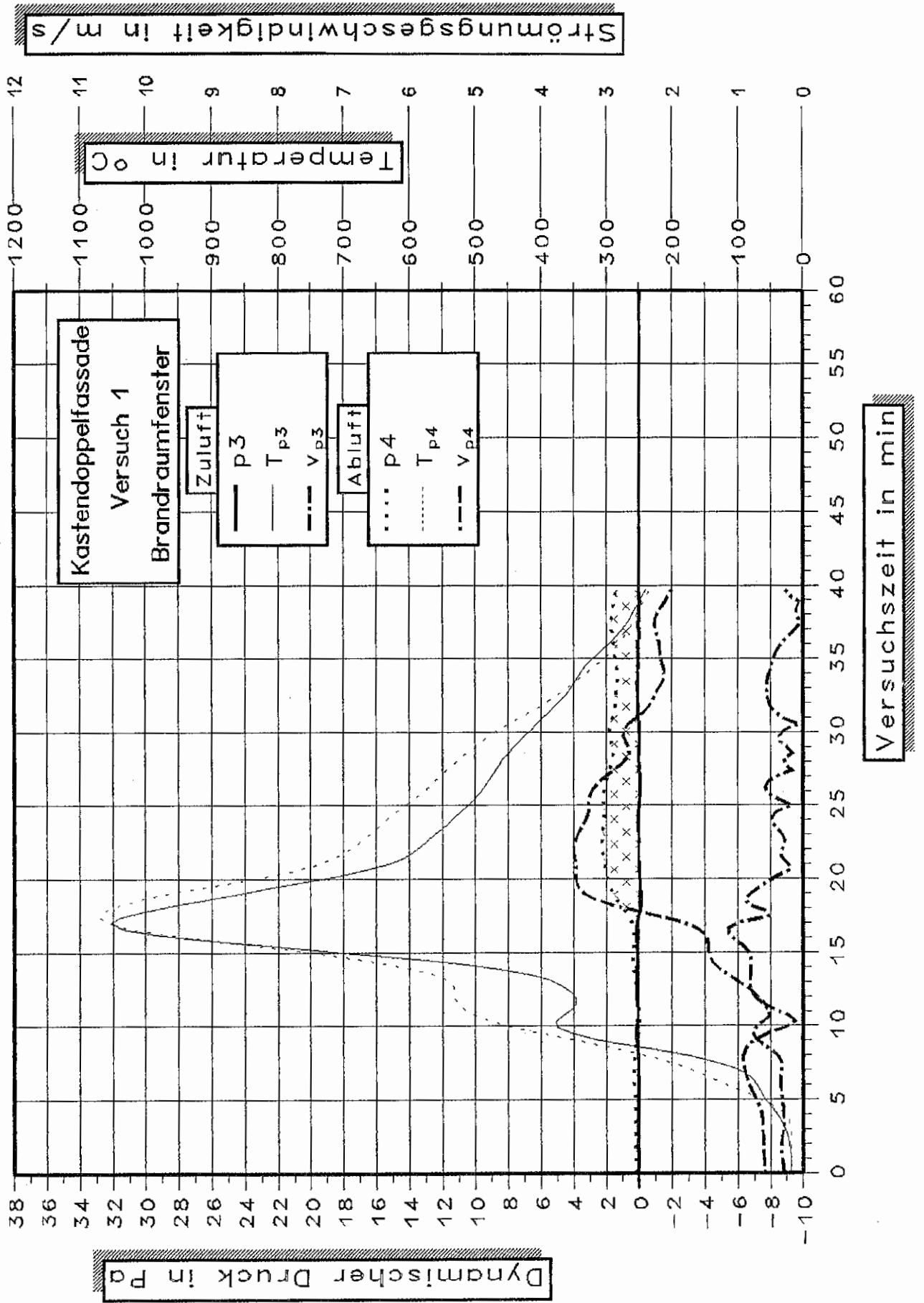
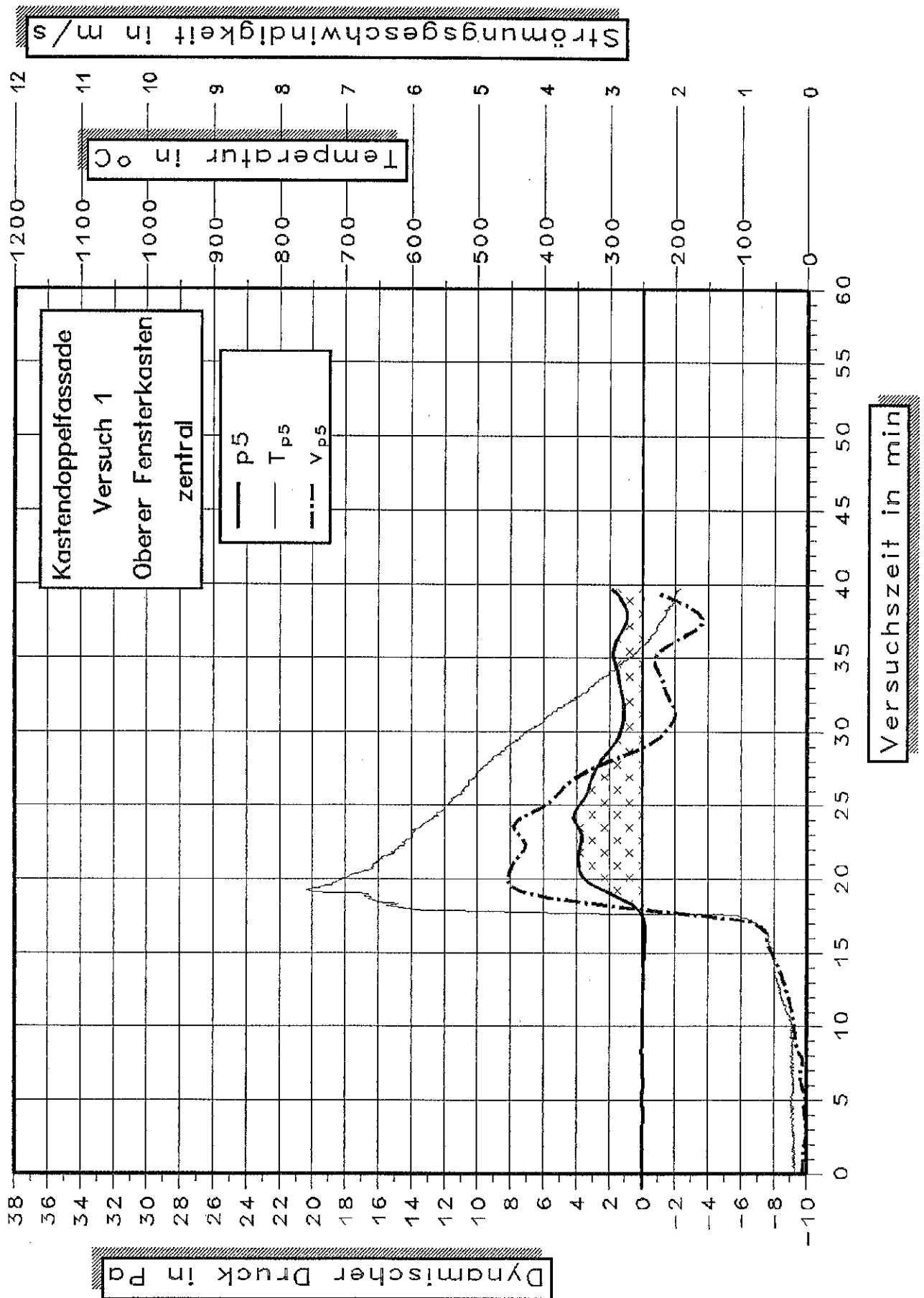


Bild 7: Zeitlicher Verlauf der dynamischen Drücke sowie der Strömungsgeschwindigkeiten im unteren und oberen Teil des Brandraumfensters. - Versuch I -



**Bild 8:** Zeitlicher Verlauf des dynamischen Druckes und der Strömungsgeschwindigkeit im oberen Fensterkasten. - Versuch 1 -

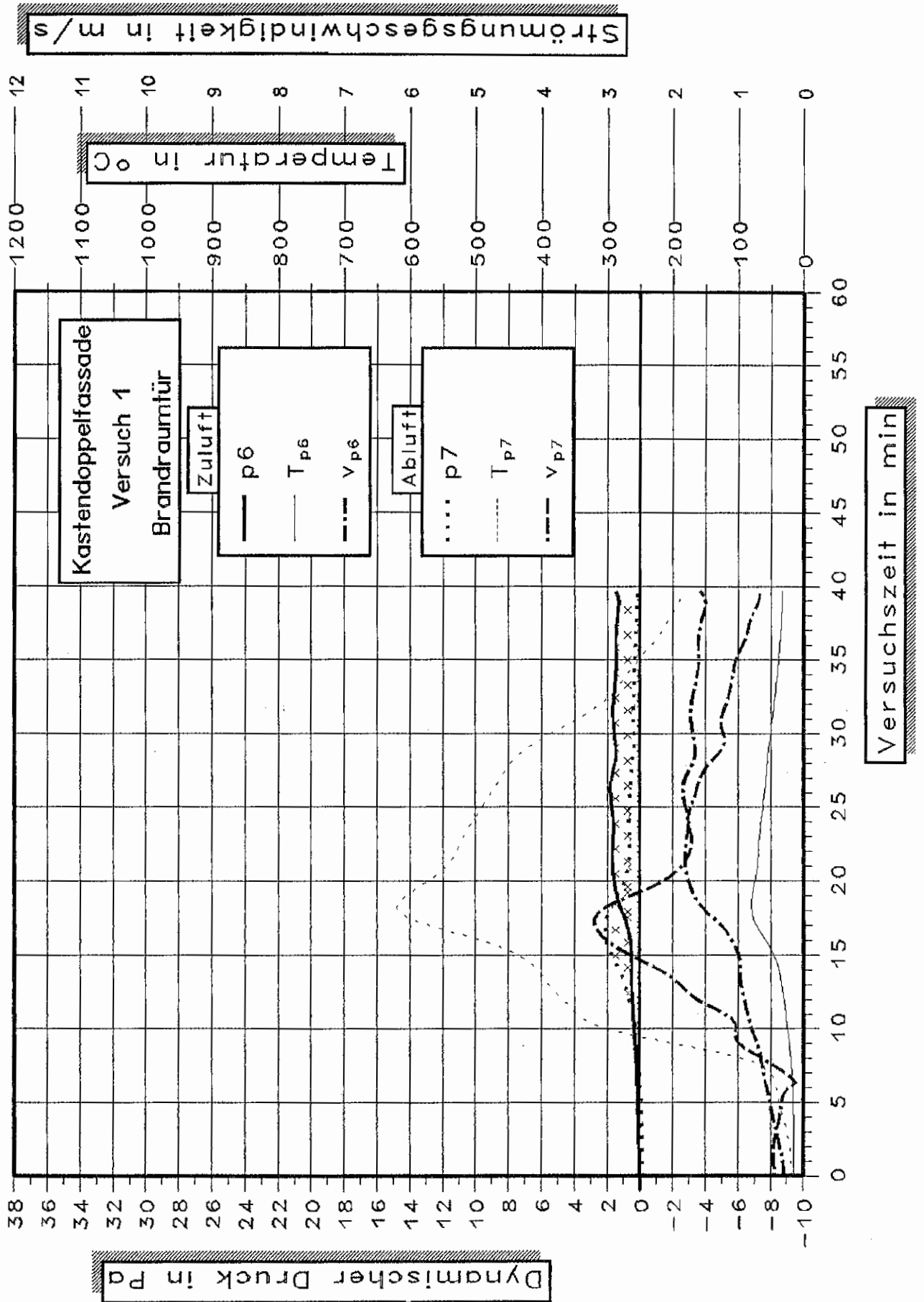


Bild 9: Zeitlicher Verlauf der dynamischen Drücke sowie der Strömungsgeschwindigkeiten im unteren und oberen Teil der Brandraumtür. - Versuch 1 -

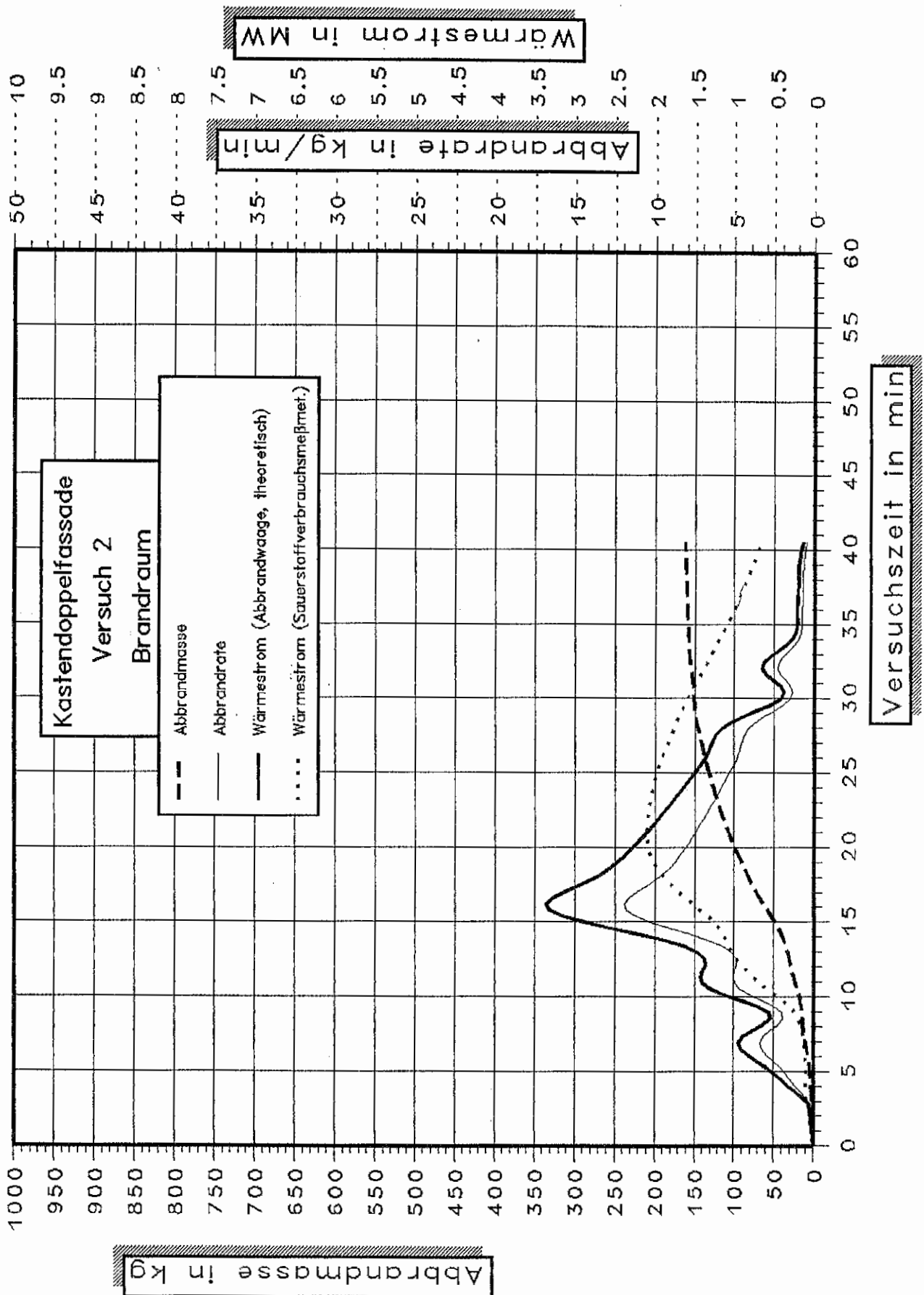
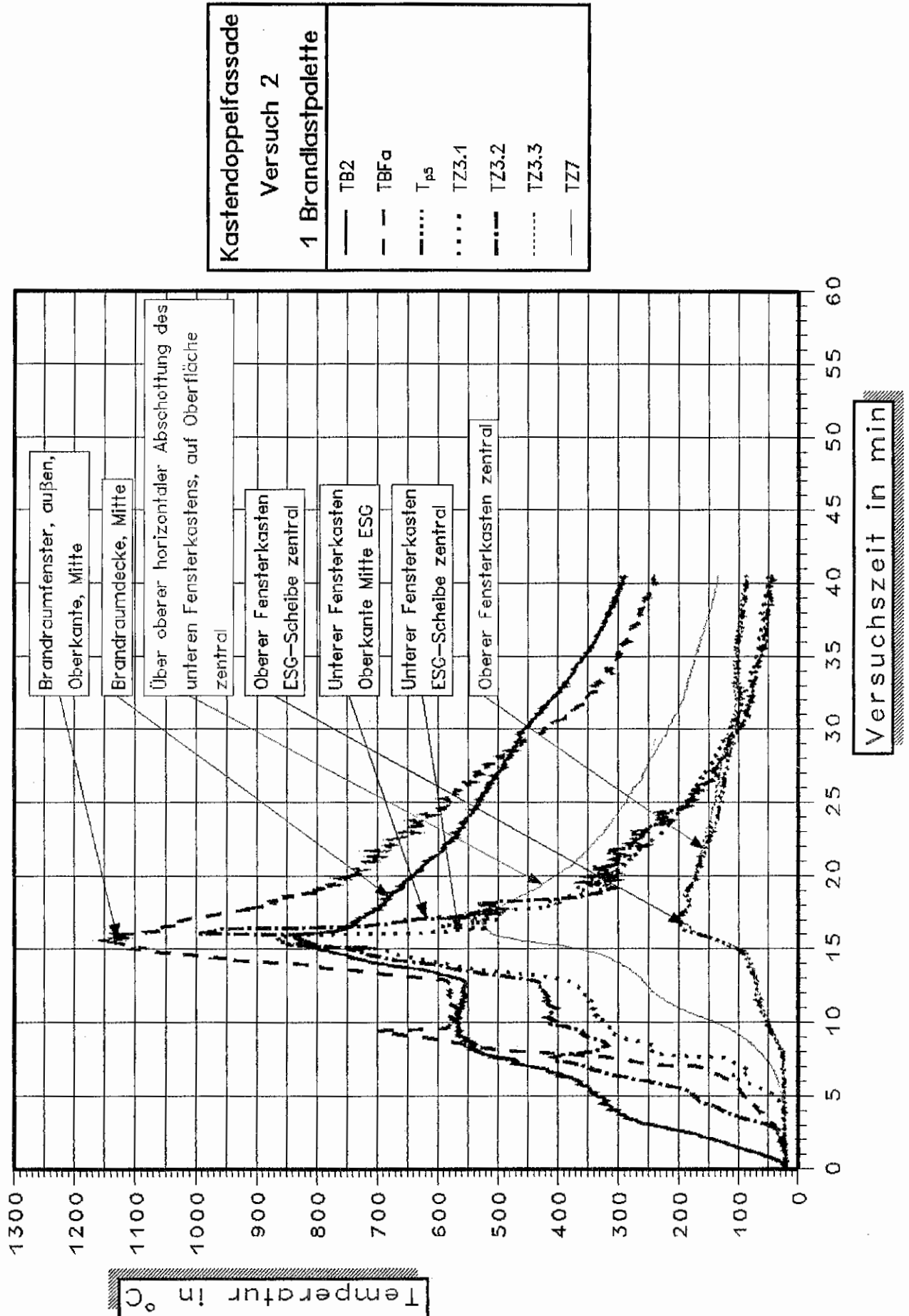


Bild 10: Zeitlicher Verlauf von Abbrandmasse, Abbrandrate und Wärmestrom.  
- Versuch 2 -



**Bild 11:** Vergleich ausgewählter zeitlicher Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, unterer und oberer Fensterkasten sowie an der Außenfassade.  
- Versuch 2 -

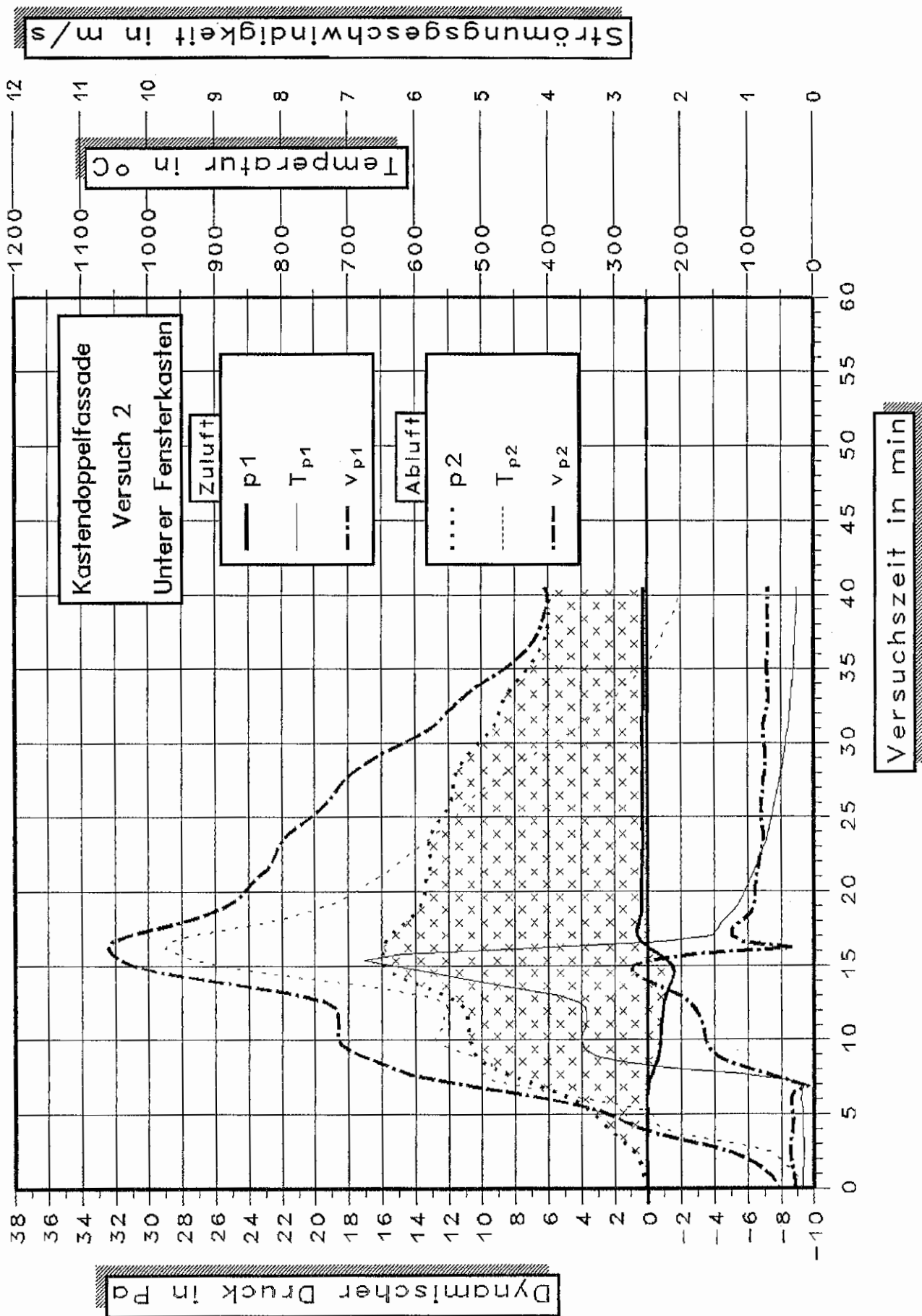
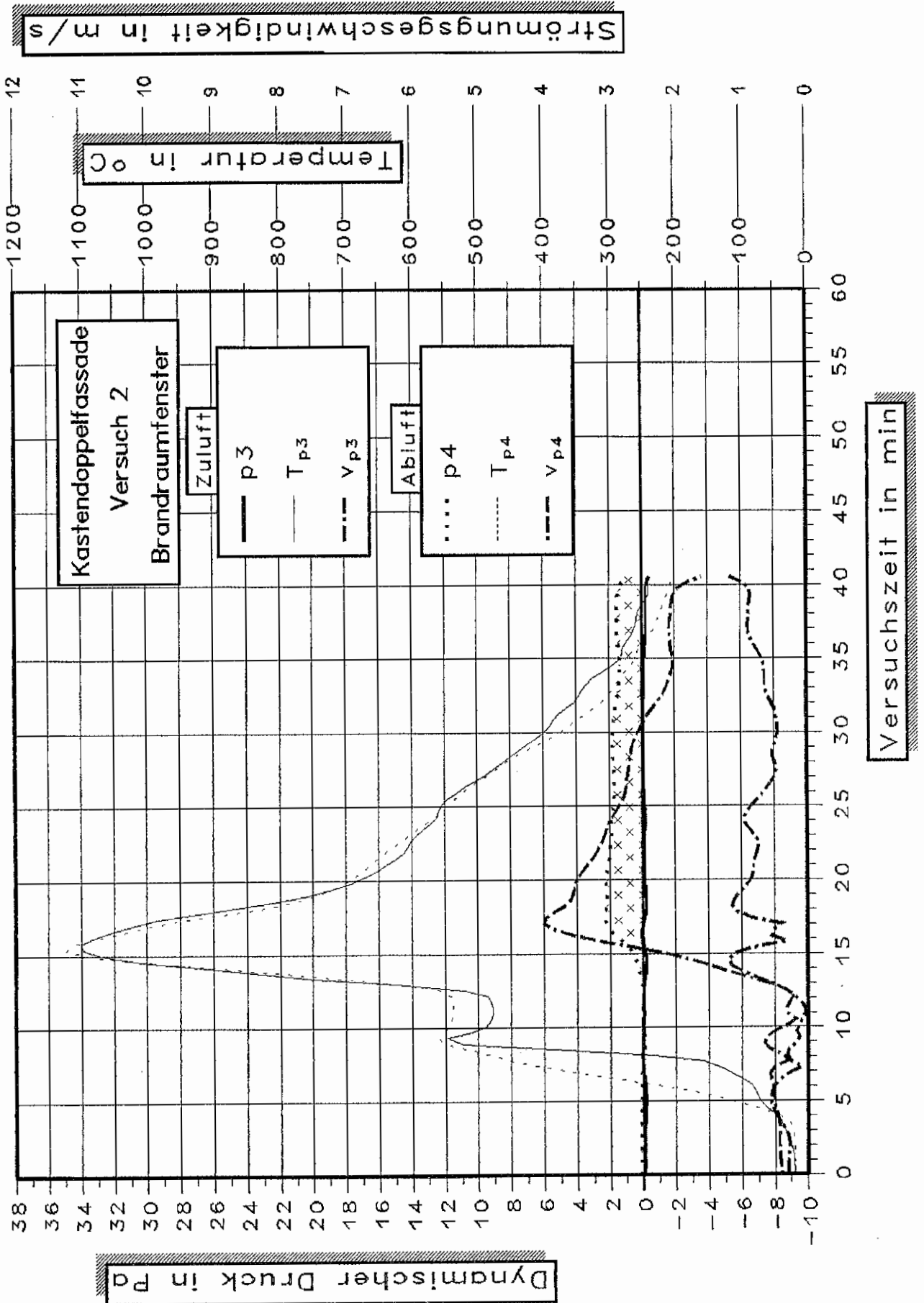


Bild 12: Zeitlicher Verlauf der dynamischen Drücke sowie der Strömungsgeschwindigkeiten an der Zu- und Abluftöffnung des unteren Fensterkastens. - Versuch 2 -



**Bild 13:** Zeitlicher Verlauf der dynamischen Drücke sowie der Strömungsgeschwindigkeiten im unteren und oberen Teil des Brandraumsfensters. - Versuch 2 -



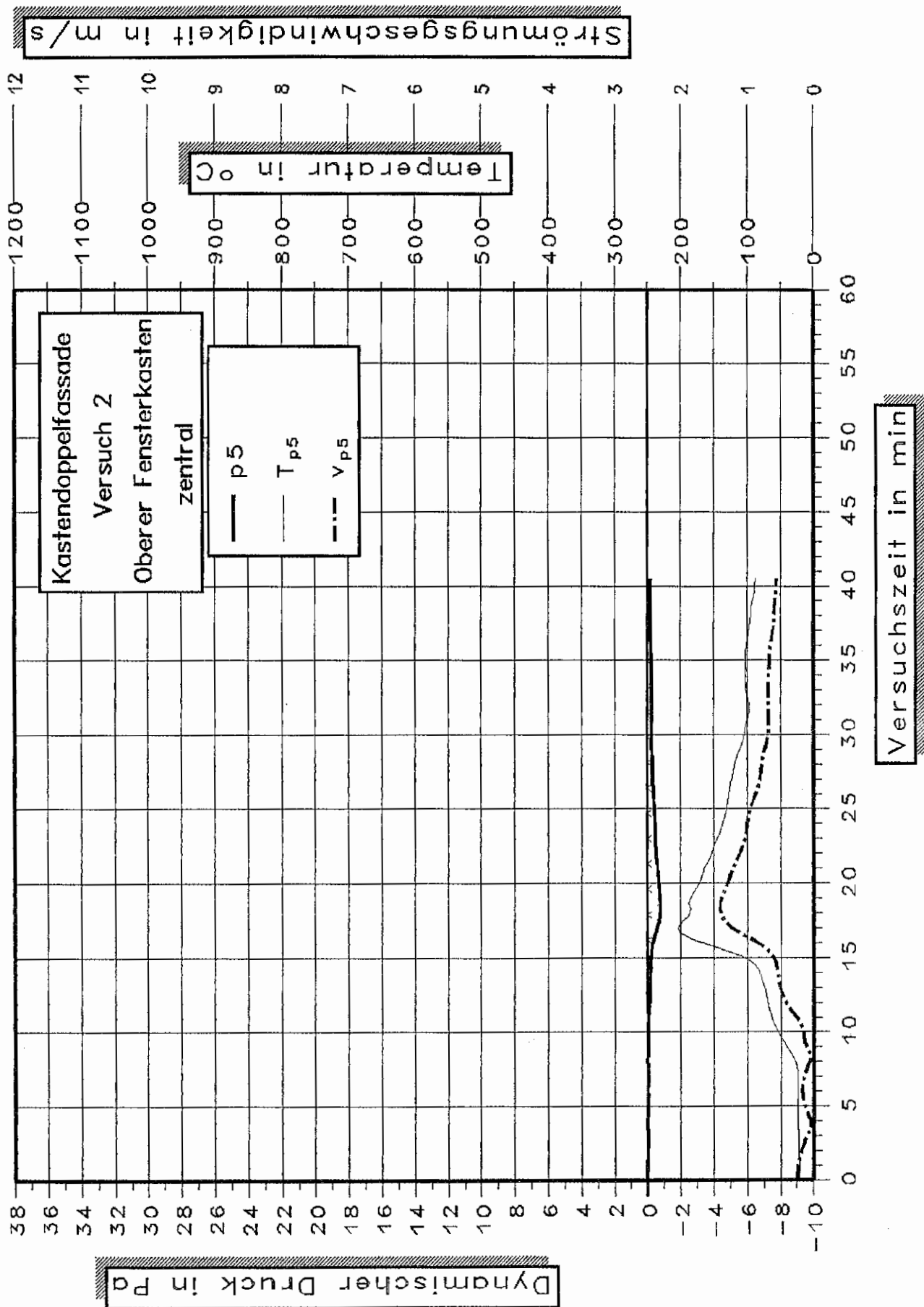


Bild 14: Zeitlicher Verlauf des dynamischen Druckes und der Strömungsgeschwindigkeit im oberen Fensterkasten. - Versuch 2 -

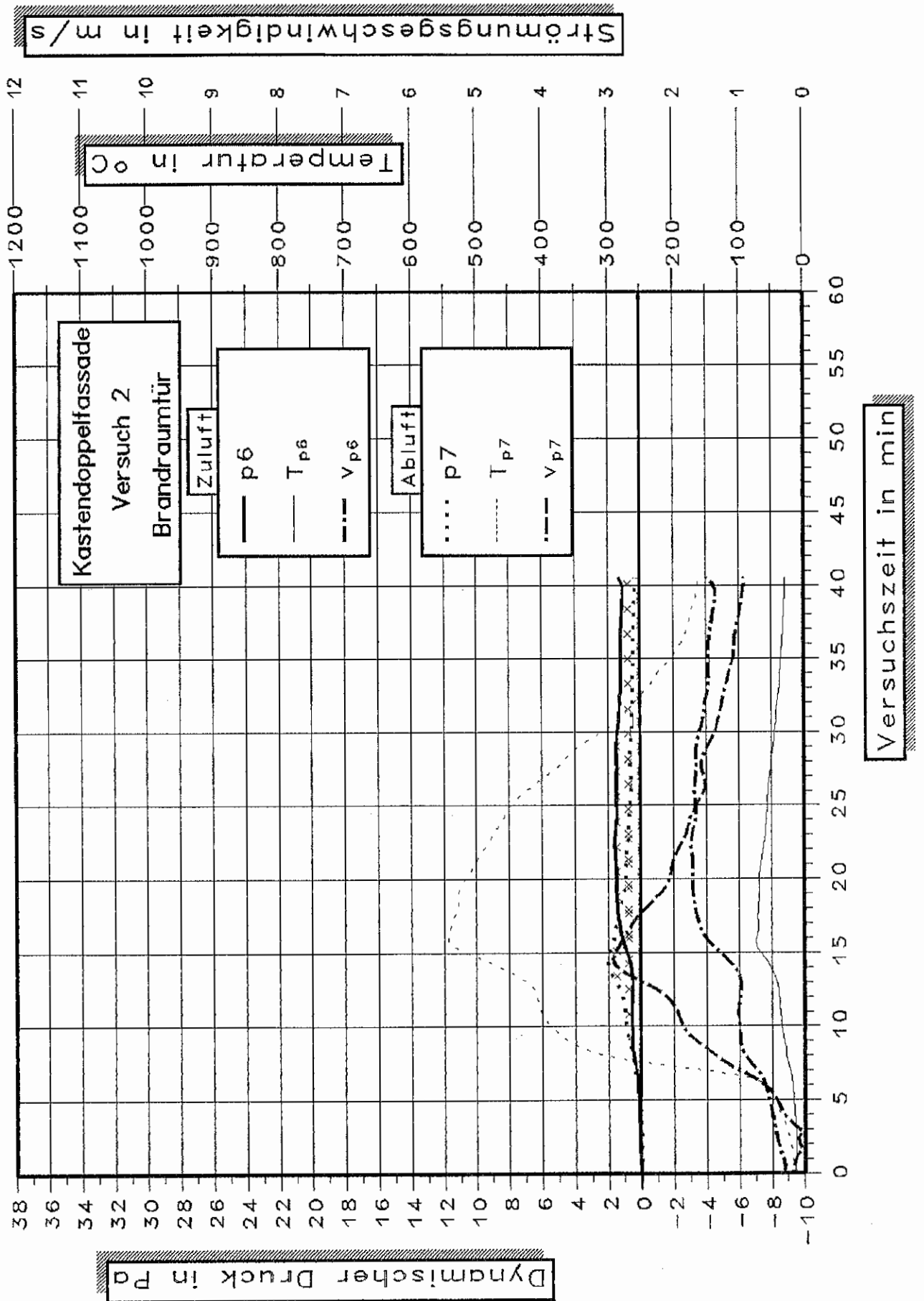
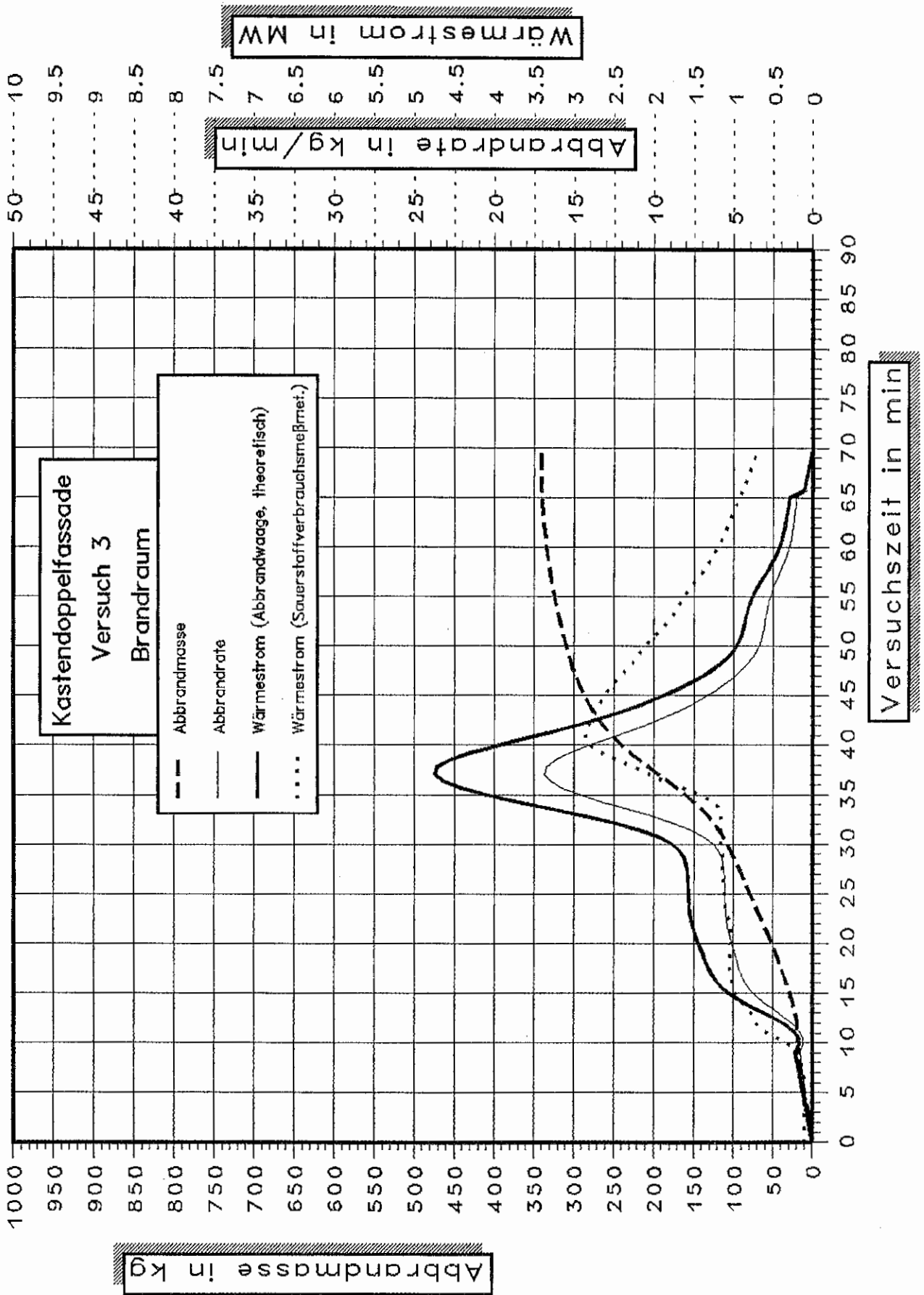


Bild 15: Zeitlicher Verlauf der dynamischen Drücke sowie der Strömungsgeschwindigkeiten im unteren und oberen Teil der Brandraumtür. - Versuch 2 -



**Bild 16:** Zeitlicher Verlauf von Abbrandmasse, Abbrandrate und Wärmestrom.  
- Versuch 3 -

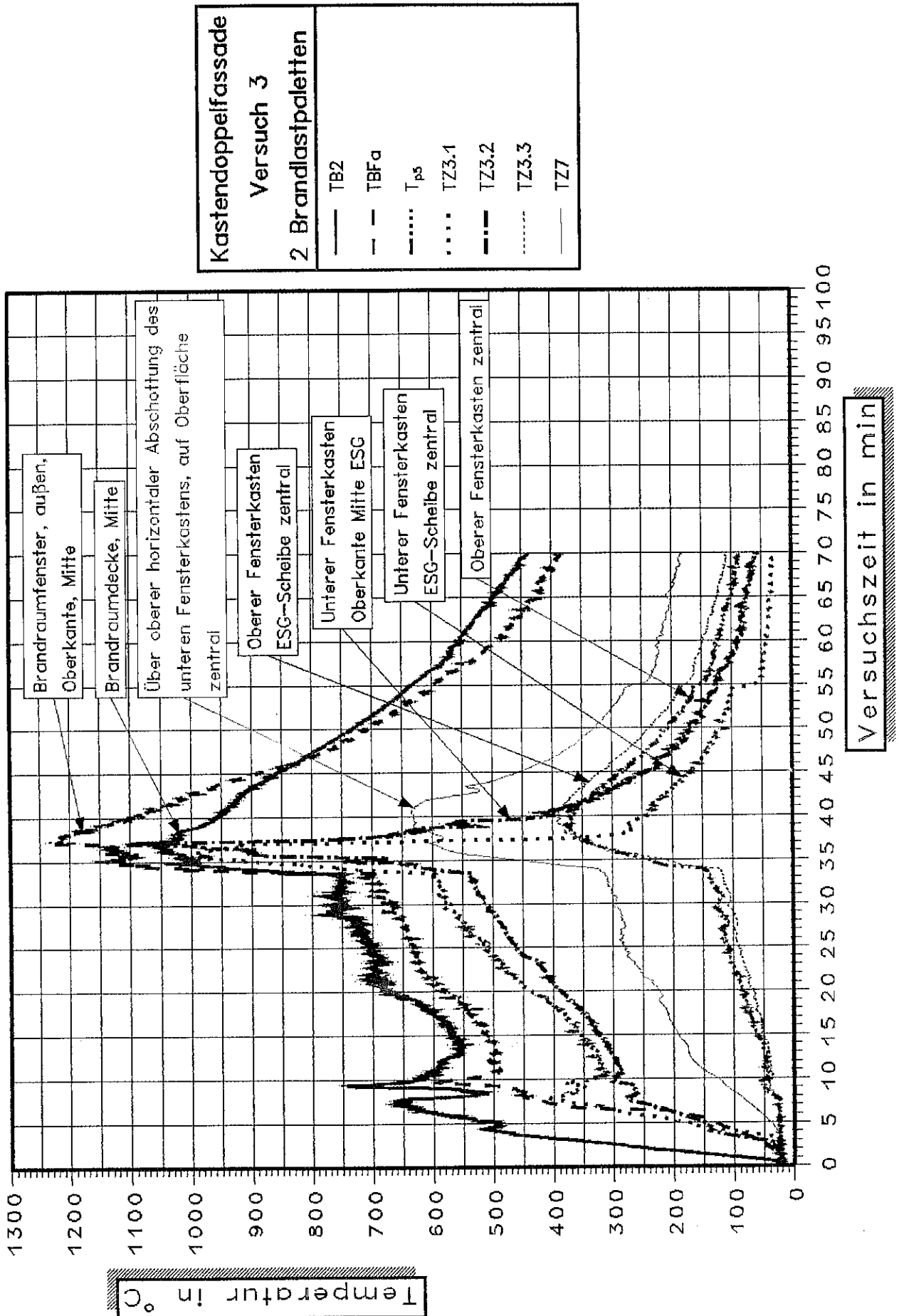
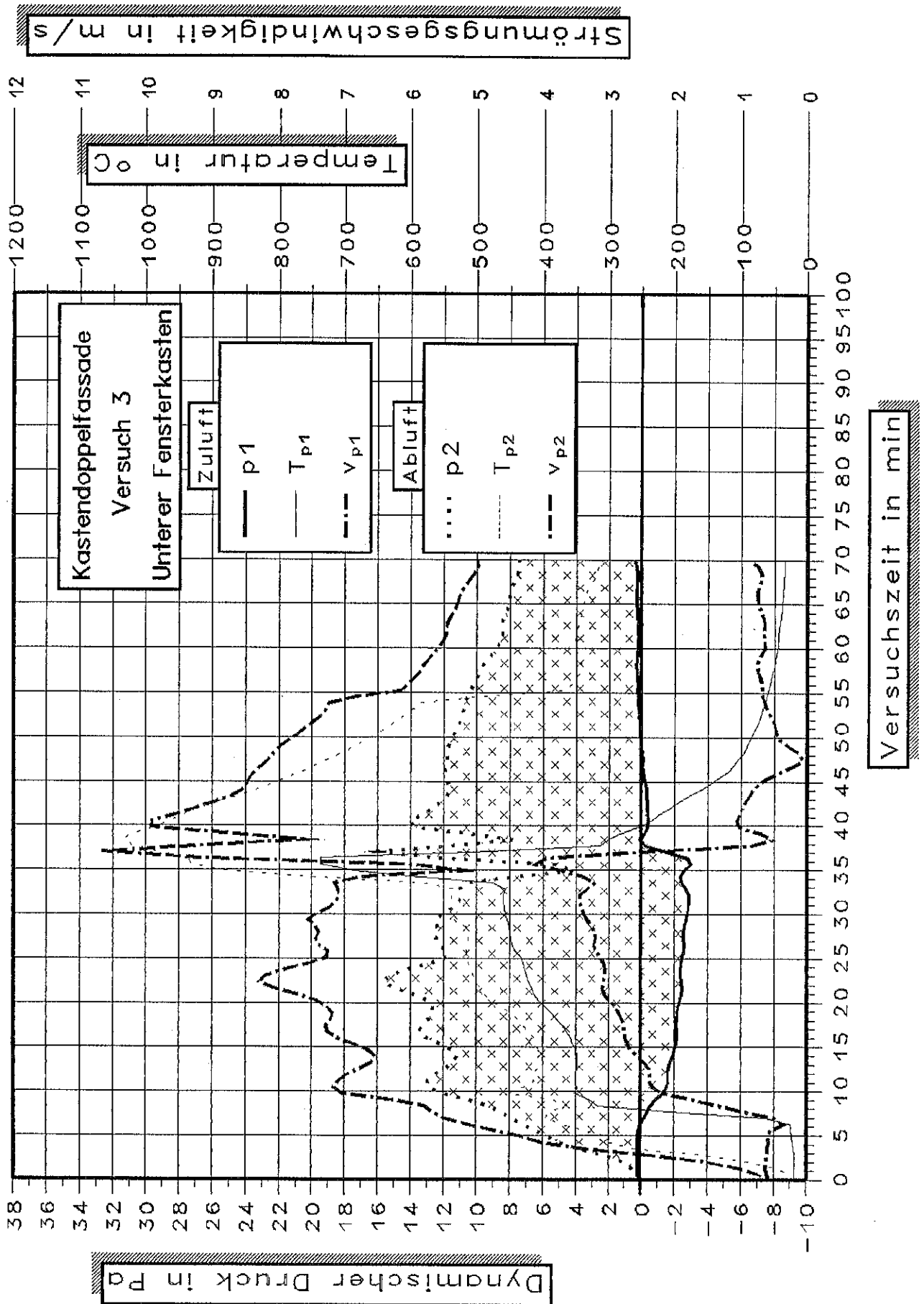


Bild 17: Vergleich ausgewählter zeitlicher Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, unterer und oberer Fensterkasten sowie an der Außenfassade.  
 - Versuch 3 -



**Bild 18:** Zeitlicher Verlauf der dynamischen Drücke sowie der Strömungsgeschwindigkeiten an der Zu- und Abluftöffnung des unteren Fensterkastens. - Versuch 3 -

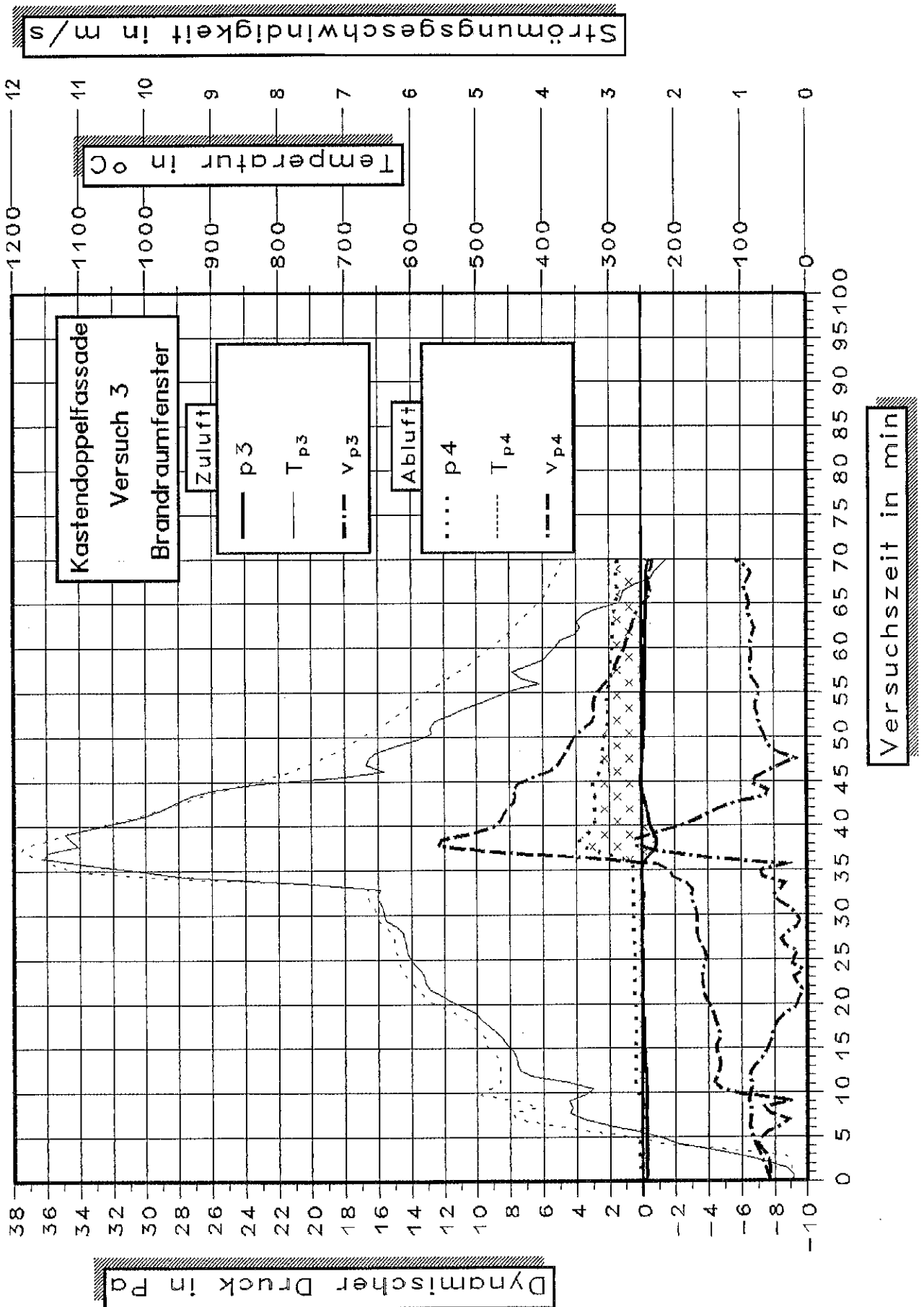
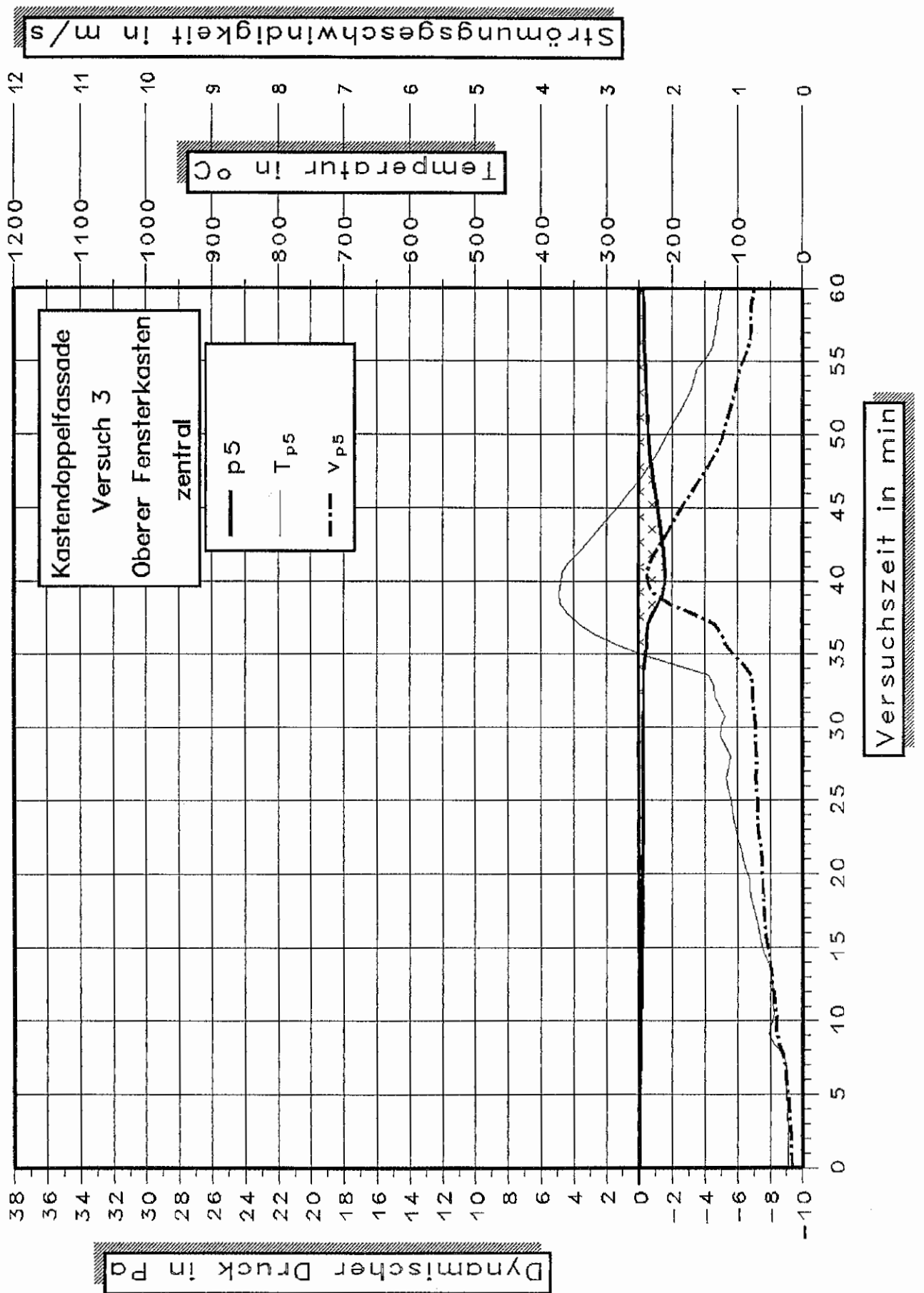
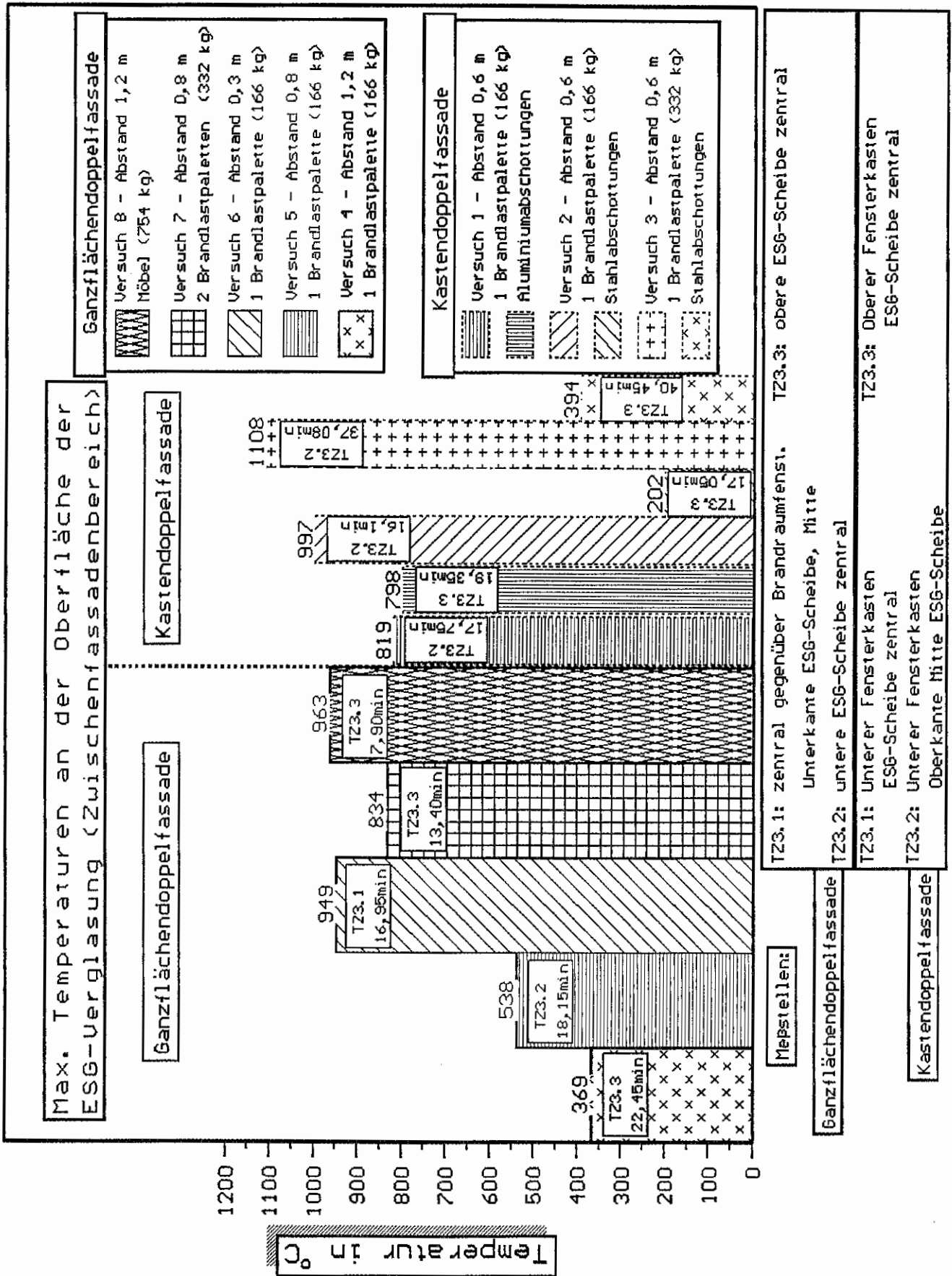


Bild 19: Zeitlicher Verlauf der dynamischen Drücke sowie der Strömungsgeschwindigkeiten im unteren und oberen Teil des Brandraumfensters. - Versuch 3 -



**Bild 20:** Zeitlicher Verlauf des dynamischen Druckes und der Strömungsgeschwindigkeit im oberen Fensterkasten. - Versuch 3 -



**Bild 21:** Vergleich der maximalen an der ESG-Verglasung auftretenden Temperaturen bei Ganzflächen- und Kastendoppelfassade.



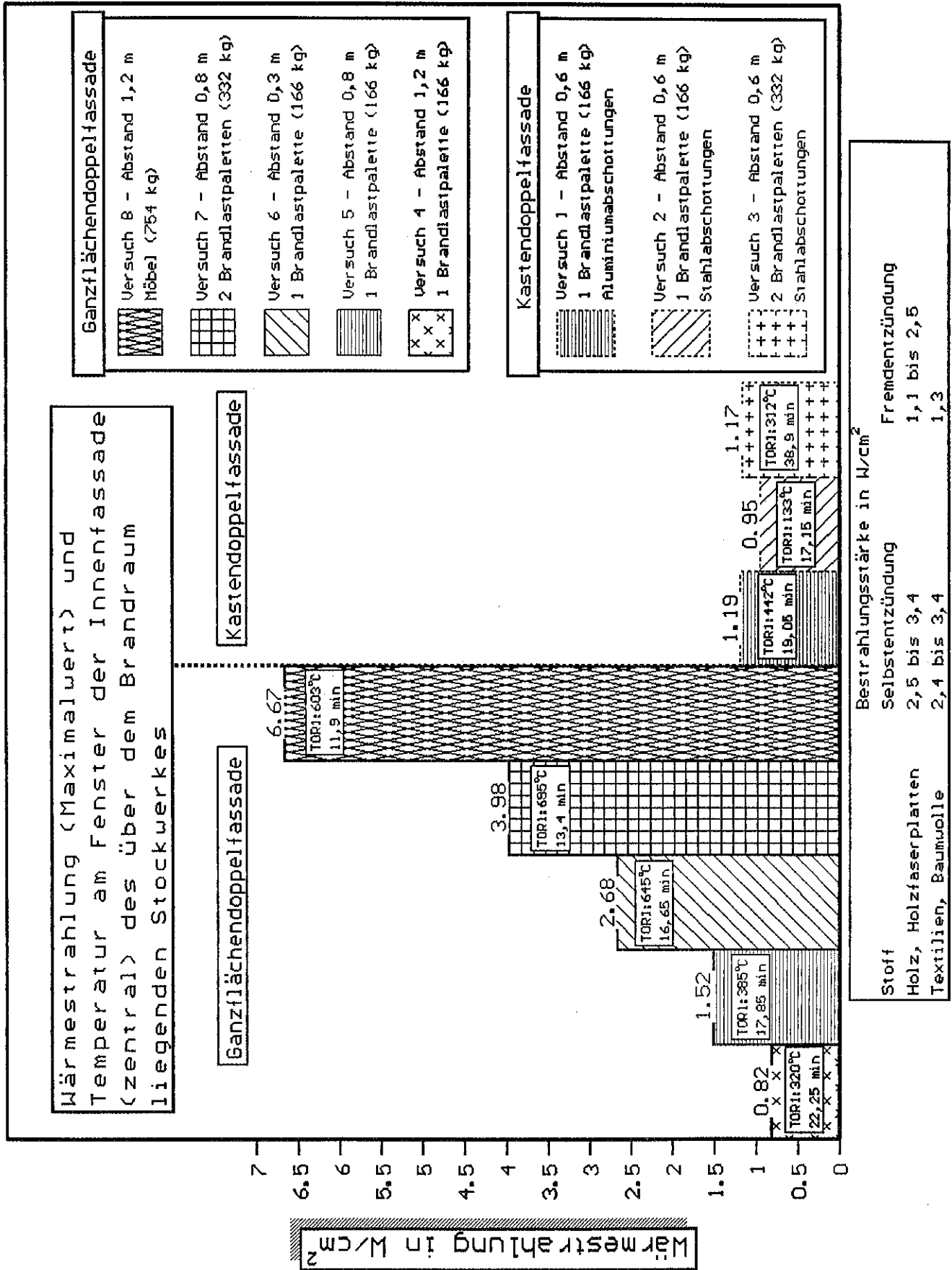


Bild 22: Vergleich der maximalen, am Fenster des über dem Brandraum liegenden Stockwerkes auftretenden Wärmestrahlung bei Ganzflächen- und Kastendoppelfassade.

11. FOTOS

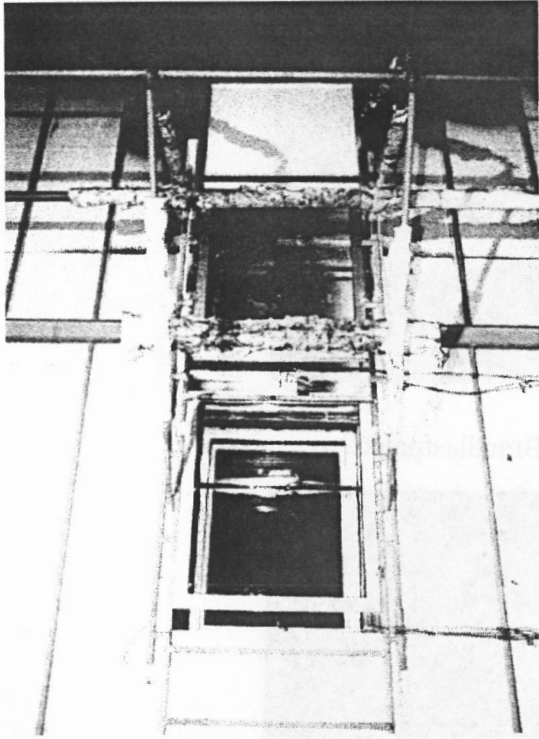


Foto 1: Außenfassade

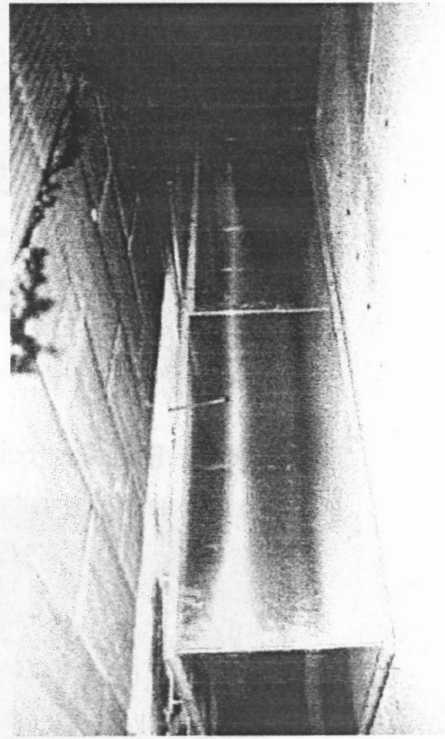


Foto 2: Zwischenfassadenbereich

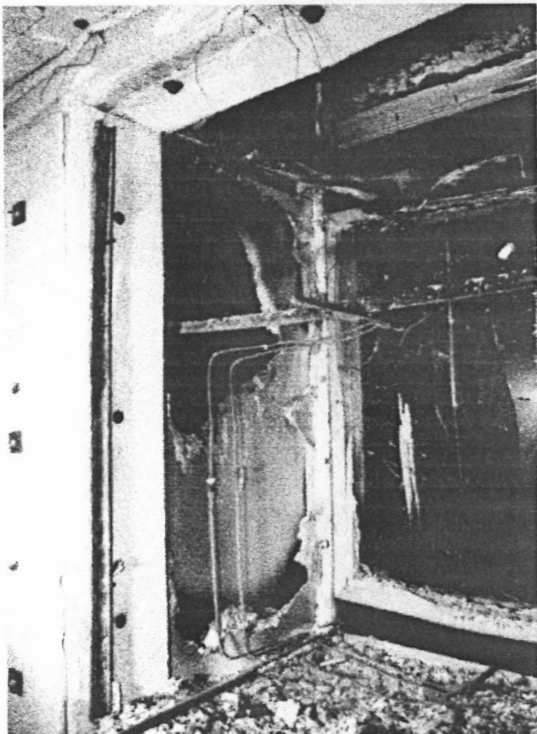


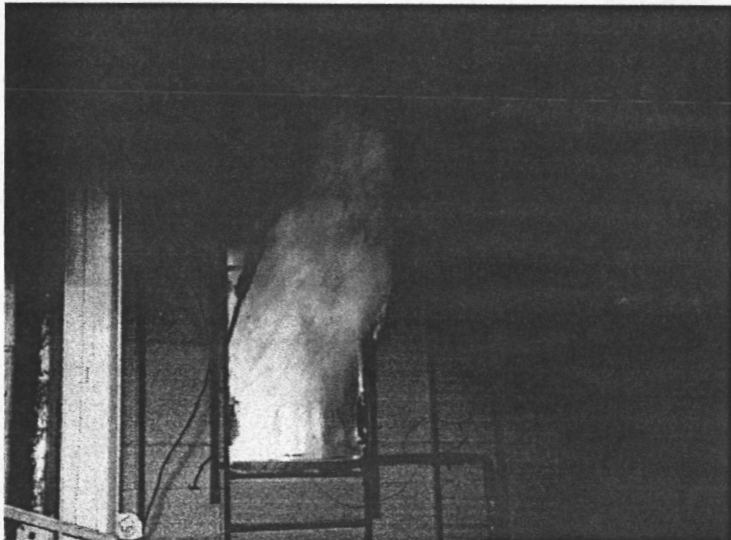
Foto 3: Unterer Fensterkasten (Innenbereich) nach Versuch 1 mit zerstörten vertikalen und horizontalen Aluminiumabschottungen



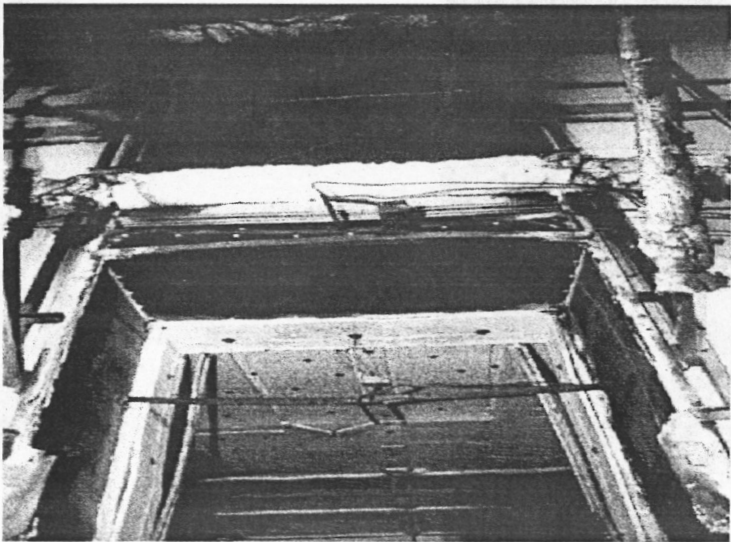
Foto 4: Unterer Fensterkasten (Außenbereich) nach Versuch 1 mit zerstörter vertikaler Aluminiumabschottung.



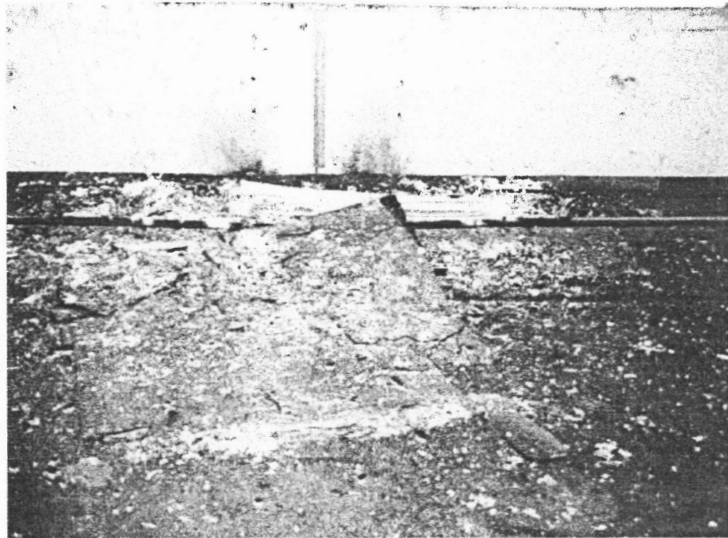
**Foto 5:** Brandlast bei Versuch 3 (2 Brandlastpaletten)



**Foto 6:** Versuch 3 nach 38 min 50 s



**Foto 7:** Unterer Fensterkasten nach Versuch 3 mit funktionsfähigen vertikalen und horizontalen Stahlabschottungen



**Foto 8:** ESG-Scheibe des unteren Fensterkastens fällt in Versuch 3 ganzflächig zu Boden und zerspringt in große Stücke.