



Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)
Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John



Verringerung der Temperaturen an Stahl- Glasfassaden im Brandfall durch thermische Entlastungsöffnungen und ortsfeste Niederdruck- Wassernebellöschanlagen

von Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

**Forschungsvorhaben im Auftrag der
Stiftung Industrieforschung**

Förderkennzeichen Nr. S 483

Projektbegleitung durch den
Arbeitsausschuß Brandschutz des Deutschen Stahlbau-Verbandes (DSTV)

Karlsruhe
April 2001

ISBN 3-00-008448-7

© 2001 Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Brandschutzproblematik bei Gebäuden mit Stahl-Glasfassaden	2
3.	Maßnahmen zur Verringerung der Temperaturen an Stahl-Glasfassaden	8
3.1	Thermische Entlastungsöffnungen	8
3.2	Ortsfeste automatische Wasserlöschanlagen	9
3.2.1	Sprinkleranlagen	9
3.2.2	Wassernebellöschanlagen	9
4.	Brand- und Löschversuche	11
4.1	Versuchsprogramm	11
4.2	Versuchsaufbau und Meßtechnik	11
4.3	Versuchsdurchführung, Meß- und Versuchsergebnisse	14
4.3.1	Brandversuch ohne thermische Entlastungsöffnung und ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Brandlast: 336 kg	14
4.3.2	Brandversuch mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m ²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Brandlast: 336 kg	15
4.3.3	Brandversuch mit thermischer Entlastungsöffnung (5 m ²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Brandlast: 336 kg	16
4.3.4	Brandversuch mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m ²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Brandlast: 750 kg	17
4.3.5	Brandversuch mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage, ohne thermische Entlastungsöffnung - Betriebsdruck: 8,4 bar, Brandlast: 100 kg	17
4.3.6	Brandversuch mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage, ohne thermische Entlastungsöffnung - Betriebsdruck: 4,1 bar, Brandlast: 100 kg	18
5.	Zusammenfassung	19
5.1	Einsatz von thermischen Entlastungsöffnungen	19
5.2	Einsatz von Niederdruck-Wassernebellöschanlagen	20
6.	Literaturverzeichnis	23
7.	Tabellen	28
8.	Bilder	34

1. Einleitung

Während der siebziger Jahre hatte sich die Idee eingebürgert, der Stahlbau sei gegenüber dem Massivbau stark im Hintertreffen, und zwar wegen seines "schlechten Feuerwiderstandes". Nach Schleich [1] ist diese Auffassung total unberechtigt. Zahlreiche Beispiele zeigen weltweit, daß es eine ausgedehnte Palette von kostengünstigen Maßnahmen und Methoden ohne weiteres erlaubt, die Feuerwiderstandsdauer von Stahlbauten zu gewährleisten. Allerdings geht die Tendenz bei Architekten in die Richtung, Bauwerke unter Verwendung von sichtbarem Stahl zu errichten, wodurch eine brandschutztechnisch wirksame Verkleidung mit nichtbrennbaren Materialien nicht vorhanden ist. Hierdurch sind spezielle Maßnahmen erforderlich, um die Aufgaben und Schutzziele des Brandschutzes zu erfüllen.

Die Aufgaben und Schutzziele des Brandschutzes sind:

- Personenschutz (vorrangig): Schutz der Bewohner, Besucher, Beschäftigten und Rettungskräfte
- Sachschutz: Schutz der Sachgüter
- Nachbarschutz: Schutz der Nachbarn und deren Besitz
- Umweltschutz: Schutz natürlicher Lebensgrundlagen
- Kulturgutschutz: Schutz der wertvollen Kulturgüter

Die Brandsicherheit ist gegeben, wenn durch bauliche Maßnahmen

- die Entstehung eines Brandes mit gewisser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann,
- die Ausbreitung von Feuer und Brandrauch weitgehend verhindert und
- die wirksame Rettung und Brandbekämpfung ermöglicht wird.

Bild 1 zeigt die vielfältigen Brandausbreitungsmöglichkeiten innerhalb und zwischen Gebäuden. Sämtliche Brandausbreitungsmöglichkeiten müssen im Brandschutzkonzept für ein Gebäude berücksichtigt werden.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Reduzierung des Gefährdungspotentials bei Gebäuden mit Stahl-Glasfassaden. Die Gefährdung von Personen und Gebäuden durch Brandeinwirkung in solchen Gebäuden soll durch geeignete konstruktive Maßnahmen bzw. anlagentechnische Maßnahmen zur Temperaturentlastung der Konstruktion vermindert

werden. Es soll weiterhin eine Grundlage für die Erstellung von Konstruktionsrichtlinien für den Bau dieses Fassadentyps geschaffen werden.

2. Brandschutzproblematik bei Gebäuden mit Stahl-Glasfassaden

Im Verlauf des 20. Jahrhunderts führten die Fortschritte in der Glastechnologie und neue Herstellungsverfahren zur Möglichkeit, Bauwerke, Fassaden und Trennwände weitestgehend aus Glas herzustellen. Hierdurch ergeben sich neue Anforderungen bezüglich des Brandschutzes in Gebäuden mit Stahl-Glasfassaden. Einige Beispiele hierfür zeigen die **Bilder 2 bis 4** [2, 3].

Bei den Glasfassaden-Konstruktionen wird u.a. zwischen den folgenden Konstruktionsprinzipien unterschieden:

- Warmfassade (nicht hinterlüftete Fassade): Hierbei werden die Gläser mit der dahinterliegenden Wärmedämmung und der raumseitigen Dampfsperre zu einem Brüstungselement (Sandwich-Element) zusammengefügt. Es wird als Ganzes in die Fassadenkonstruktion eingesetzt und z.B. mit Anpreßleisten befestigt.
Diese Elementbauart übernimmt nicht nur die Funktion des Raumabschlusses und Witterungsschutzes, sondern auch die Aufgaben des Wärme-, Schall- und Brandschutzes.
- Kaltfassade (hinterlüftete Fassade): Die Kaltfassade ist eine zweischalige Außenwandkonstruktion mit einem belüfteten Zwischenraum. Die äußere Schale dient dem Witterschutz und der architektonischen Gestaltung und besteht aus ein- oder zweischiebigen Glasfassadenplatten. Die innere Schale ist das tragende Element für die Fassadenplatten, bildet den Raumabschluss und übernimmt die thermische Isolation. Der Zwischenraum zwischen beiden Schalen muß immer belüftet werden, damit anfallende Feuchtigkeit zügig abgeführt werden kann.
- Einschalige Glasfassaden: Hierbei handelt es sich um Stahl-, Leichtmetall-, Holz- und Kunststoff-Tragkonstruktionen mit den entsprechenden Verglasungen. Einschalige Verglasungen weisen einen außenliegenden, innenliegenden oder integrierten Sonnenschutz aus.
- Ablufffassaden: Bei diesem mehrschaligen Fassadentyp besteht das "Fenster" aus einer äußeren Isolierglaseinheit und einer im Abstand von ca. 15 - 20 cm von innen angeordneten weiteren Glasscheibe. Der Sonnenschutz ist im Zwischenraum an-

geordnet. Ein Teil der Raumabluft wird durch Unterdruck in diesen Zwischenraum eingesaugt, wo er den größten Teil der im Sonnenschutz entstehenden Wärme aufnimmt und anschließend durch eine mechanische Entlüftung abgeführt wird. Die Luftführung erfolgt meistens geschoßweise, entweder steigend oder fallend. Aus der Abluft können über einen Wärmetauscher Wärmerückgewinne erzielt werden.

- Doppelfassaden: Diese sind mehrschalige Fassadentypen, bei denen vor eine konventionelle Fassade (Innenfassade) im Abstand von ca. 20 cm bis 2 m eine zweite äußere Fassade aus klima-, energie- und schallschutztechnischen Gründen vorgesetzt wird. Durch Zu- und Abluftöffnungen kann Luft in den Fassadenzwischenraum gelangen bzw. entweichen. Eine natürliche Raumlüftung wird durch zu öffnende Fenster oder Lüftungsklappen in der Innenfassade möglich. Der Sonnenschutz ist im Fassadenzwischenraum angeordnet. Es wird hierbei nach Art der Luftführung im Zwischenfassadenbereich zwischen den Hauptkonstruktionsprinzipien Ganzflächendoppelfassade, Kanaldoppelfassade und Kastendoppelfassade unterschieden (siehe **Bild 5**).

Bei diesen Fassadentypen kommen in ihren Eigenschaften sehr unterschiedliche Glasarten und Glasdicken zum Einsatz. Als Glasarten kommen sowohl Einfachglas (Floatglas), teilvorgespanntes Glas (TVG), thermisch vorgespanntes Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG), Verbundsicherheitsglas (VSG) als auch spezielle Brandschutzverglasungen zur Anwendung.

Transparente Fassadenbauteile werden nach der Wärmeschutzverordnung als Fenster bewertet, auch wenn sie raumhoch sind [4]. Bei raumhohen Fenstern können zusätzliche Anforderungen zur Sicherheit (Absturz- und Brandschutz) gefordert werden.

Nicht transparente Fassadenbauteile aus Glas gelten im Sinne der Wärmeschutzverordnung als Wandbauteile. Hier sind die Fassadenplatten aus Glas zu erwähnen.

Generell gibt es keine bauaufsichtlich zugelassenen Elemente im Bereich der Glasfassaden. Die Konstruktionen müssen mit den örtlich zuständigen Bauaufsichtsbehörden abgestimmt werden.

Zum Beispiel werden folgende Gebäude mit und in Glasbauweise errichtet: Büro- und Verwaltungsgebäude, Lagergebäude, Fabriken, Montagehallen, Parkhäuser, Bahnhöfe, Mehrzweckhallen, Arenen etc.

Die Gebäude weisen zum Teil sehr große Brandlasten auf, die bis nahe an die Decken bzw. Glasfassaden reichen und somit bei ungenügenden brandschutztechnischen Maßnahmen eine große Gefahr darstellen.

Im Brandfall müssen bei den brandschutztechnischen Maßnahmen die Materialeigenschaften der verwendeten Baustoffe berücksichtigt werden. Angaben hierzu finden sich in [4, 5, 6, 7, 8]. Im Brandfall kommt es ohne schnelle Brandbekämpfung nicht nur zum direkten Kontakt der Bauteile mit den heißen Brandgasen, sondern, wie die Untersuchungen von Kunkelmann [9, 10, 11, 12, 13] gezeigt haben, auch zum direkten Flammenkontakt. Die Flammenlängen betragen hier zum Teil mehrere Meter.

Zum Beispiel verringert sich der Ausnutzungsfaktor bei Stahl [5] ab einer kritischen Temperatur von 350°C. Bei einer Temperatur von ca. 500°C besitzt Stahl [6, 7] nur noch die Hälfte seiner Tragfähigkeit. Baustähle, die im Brandfall nicht wärmer als ca. 700°C werden, erreichen bei langsamer Abkühlung, wie es nach Brandfällen in der Regel trotz Löschwasserbeanspruchung der Fall ist, wieder nahezu ihre ursprünglichen Eigenschaften.

Werden zur Befestigung von Verglasungen Bauteile aus Aluminiumlegierungen verwendet, ist zu berücksichtigen, daß diese einen relativ niedrigen Schmelzpunkt von ca. 660°C aufweisen. Bei ca. 250°C sinkt die Tragfähigkeit bereits auf ungefähr die Hälfte ab [8].

Bei Verglasungen ergeben sich nach [4] folgende maximale Betriebstemperaturen:

- Einfachglas (Floatglas): maximal ± 40 K Temperaturunterschied in der Scheibenfläche (z.B. zwischen Scheibenmitte und Scheibenrand) bei üblichen Umgebungstemperaturen
- Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG): ca. 250°C, (kurzzeitig: 300°C), maximal 150 K Temperaturunterschied in der Scheibenfläche
- Verbund-Sicherheitsglas (VSG): maximale Dauertemperatur: ca. 60°C, (kurzzeitig: 80°C), maximal ± 40 K Temperaturunterschied in der Scheibenfläche

Brandschutzverglasungen sind hierbei gesondert zu betrachten.

In Verbindung mit den sehr unterschiedliche Befestigungstechniken bzw. Lagerungsarten von Glas [3] wie *Glashalteleisten*, *Preßleisten* aus Holz, Aluminium, Stahl, Kunststoff mit entsprechenden Dichtprofilen oder die *Verklebung der Glaselemente mit einem Adapterrahmen* (*Structural Sealant Glazing (SSG)*), *Klemmhaltern*, *Punkthaltern ohne und mit Durchdringung* (Bohrung) *der Glasscheibe*, *hängende Verglasungen* etc. ergeben sich sehr viele Einflußparameter für die Zerstörung von Verglasungen besonders im Brandfall.

Bisherige Untersuchungen über die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit Doppel-fassaden an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik [9, 10, 11, 12] haben gezeigt, daß ohne ortsfeste Löschanlage oder frühzeitigen Feuerwehreinsatz bei Ganzflächendoppelfassaden (siehe **Bild 6 und 7, Tabelle 1**) mit einer sehr schnellen Brand- und Rauchausbreitung als auch einer Zerstörung der Verglasungen von Innen- und Außenfassade zu rechnen ist. Weiterhin verbrennt die Inneneinrichtung des Raumes vollständig. Bei einer Brandlast in Form einer gewöhnlichen Wohnzimmereinrichtung ergab sich in einem Versuch ein Flashover nach 3 min (Definition des Flashover siehe Abschnit 4.3.1). Die maximale Brandraumtemperatur betrug ca. 1.100°C nach 13 min. An der Außenfassade in 1,2 m Abstand von der Innenfassade traten Temperaturen von ca. 960°C nach 8 min auf. Bei der zur Bemessung von Bauteilen verwendeten Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) [5] werden vergleichbare Temperaturen erst nach ca. 110 min (1.000°C) erreicht. Nichtverbrannte Brandgase entzündeten sich im Versuch im Zwischenfassadenbereich. Bei Kastendoppelfassaden mit vertikalen und horizontalen Aluminiumabschottungen (**Bild 8, Tabelle 1**) schmolzen die Abschottungen selbst bei einer kleinen Brandlast von 166 kg nach ca. 17,5 min durch. Bei Kastendoppelfassaden mit vertikalen und horizontalen Stahlabschottungen (**Bild 9, Tabelle 1**) wurde festgestellt, daß zwar die Abschottungen der Brandbelastung standhielten, jedoch das Einscheiben-Sicherheitsglas seine Vorspannung verlor und vollständig nach unten fiel. Hierdurch sind Passanten und Rettungskräfte beträchtlich gefährdet.

Aufgrund der an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik bisher gewonnenen Erfahrungen mit dem sehr unterschiedlichen Verhalten von Gläsern im Brandfall (siehe **Tabelle 1**) in Verbindung mit den unzähligen Einflußgrößen bei der Brand- und Rauchausbreitung als auch dem Löscheinsatz müssen für die brandschutztechnische Beurteilung dieser Gebäude geeignete Brandversuche durchgeführt werden. Dies steht im Einklang mit den Untersuchungen von Kunkelmann [13].

In den Untersuchungen mit Doppelfassaden [11] wurde weiterhin festgestellt, daß die bei einem Vollbrand eines Wohnzimmers entstehende

Kohlendioxid-Konzentration von ca. 200.000 ppm und

Kohlenmonoxid-Konzentration von ca. 50.000 ppm

durch die frühzeitige Auslösung einer Niederdruck-Wassernebellöschanlage (s. Abschnitt 3.2.2) auf eine

Kohlendioxid-Konzentration von ca. 21.000 - 35.000 ppm bzw.

Kohlenmonoxid-Konzentration von 1.500 - 4.100 ppm

reduziert wird.

Nach dem Handbuch der gefährlichen Güter von Hommel [14] ergeben sich folgende für den Menschen kritische Konzentrationen:

<i>Kohlendioxid:</i>	Kurzzeiteinwirkung von 30.000 ppm: 300%ige Erhöhung der Atmung
	120.000 -150.000 ppm: nach wenigen Minuten bewußtlos
<i>Kohlenmonoxid:</i>	800 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 45 Minuten
	1.600 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 20 Minuten
	3.200 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 5 -10 Minuten
	Bewußtlosigkeit und Tod nach 20 Minuten
	6.400 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 2 - 3 Minuten, Tod nach 10 -15 Minuten

Außerdem entstehen bei jedem Brand Ruß, aromatische Kohlenwasserstoffe und sonstige toxische Brandpyrolyseprodukte. Wie diese Brandgasbestandteile in ihrer Zusammenwirkung den menschlichen bzw. tierischen Organismus schädigen ist hierbei noch nicht geklärt.

Durch den Einsatz einer Niederdruck-Wassernebellöschanlage [11] ergab sich keine Gefährdung von Personen durch Sauerstoffmangel aufgrund des Brandes und der Löschanlage [15, 16]. Die Sauerstoffkonzentration lag nach Löschbeginn im Brandraum mit ca. 16 - 18,5 % O₂ über dem für den Stickeffekt erforderlichen Wert bei Löschgasen (z.B. bei CO₂ < 15 % O₂) sowie im Bereich bzw. über der O₂-Konzentration der Ausatemluft eines Menschen (16 - 17,5 % O₂) als auch wesentlich über dem Wert, bei dem die Sauerstoffmangelkrankheit auftritt (< 12 % O₂).

In den Untersuchungen von Kunkelmann [17] zum Forschungsprojekt "Entwicklung und

Erprobung neuartiger Löschanlagen für den mehrgeschossigen Holzbau zur Brandbekämpfung und Fluchtwegsicherung" wurde festgestellt, daß beim frühzeitigen Auslösen einer ortsfesten Niederdruck-Wassernebellöschanlage durch Brandmeldeanlagen oder schnelle Auslöseelemente der Brandschaden an den Einrichtungsgegenständen (hier: aufgebaute Brandlast, Vorhänge an Türen und Fenstern) sowie die Kontamination der Innenseite von Wänden, Decken und Dämmstoffen durch Ruß, Brandgase und Branddämpfe sehr gering ist. Normalentflammbare Bau- und Dämmstoffe werden nur bei direkter Flammeneinwirkung und durch die heißen, aufsteigenden Brandgase in geringem Maße an der Oberfläche verbrannt (überwiegend im oberen Bereich von Türen und dem Bereich darüber, Verteiler- und Steckdosenöffnungen nahe der Decke. Einfachglas (Floatglas) in Türen und Oberlichtern bzw. in Wärmeschutzverglasungen wird nicht zerstört. Flüssige Brandstoffe (hier: Bratpfanne mit brennendem Pflanzenöl in einer Küche) können im Gegensatz zu Sprinkleranlagen ohne Zusätze zum Löschwasser in kurzer Zeit (hier: unter 25 s) selbst bei offener Tür gelöscht werden. Hierdurch ergeben sich Einsatzmöglichkeiten dieser Löschanlagen z.B. auch in Lagerräumen, Labors und Küchen.

Diese Untersuchungsergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden: Personen in Räumen, in denen ein Brand entsteht, können nur dann überleben, wenn durch eine schnelle Alarmierung eine ebenso rasche Brandbekämpfung eingeleitet wird. Dies ist besonders im Hinblick auf schlafende Personen zu berücksichtigen.

Eine weitere Problematik ergibt sich z.B. bei Parkhäusern, Montage- und Lagerhallen für Fahrzeuge und Bahnhöfen: Durch die immer häufigere Verwendung von Leichtmetall-Legierungen (z.B. Aluminium, Magnesium) im Fahrzeugbau als auch bei Leichtmetall-Glasfassaden besteht die Gefahr eines Metallbrandes [18, 19]. Leichtmetallbrände erzeugen Verbrennungstemperaturen von 2000°C bis 3000°C. Bei diesen Temperaturen kommt es zu einer thermischen Dissoziation des Wassers und damit zur Wasserstoff- bzw. Knallgasbildung. Diese Brände dürfen daher nicht mit Wasser gelöscht werden. Als Löschmittel dienen feinkörniger Quarzsand und Metallbrandpulver (D-Pulver). Metallbrandpulver sind Gemische verschiedener Salze (Natriumchlorid, Kaliumchlorid, Magnesiumchlorid). Beim Einsatz von Metallbrandpulver werden bei 100°C auch Salzsäure und andere giftige Zersetzungsprodukte abgespalten. Durch die Verbrennung von PVC-Kabeln in Elektroinstallationen wird der Chlorid-Gehalt zusätzlich erhöht. Die Chlorid-Konzentrationen führen zu Korrosionsschäden an Stahltragwerken, Bauteilen, Maschinen und Einrichtungen [20, 21].

Aus dieser Sachlage ist ersichtlich, wie wichtig eine schnelle Detektierung und Brandbekämpfung ist.

Wird eine ortsfeste Wasserlöschanlage in den betreffenden Gebäuden eingesetzt, muß gewährleistet sein, daß diese so schnell ausgelöst wird, daß der Brand in der frühen Entwicklungsphase gelöscht wird, bevor es zu einem Metallbrand kommt.

3. Maßnahmen zur Verringerung der Temperaturen an Stahl-Glasfassaden

Zur Verringerung der Temperaturen an Stahl-Glasfassaden stehen verschiedene Maßnahmen zur Verfügung. Hierbei handelt es sich einerseits um bauliche Maßnahmen an der Fassade selbst, z.B. durch die Erzeugung von thermischen Entlastungsöffnungen, andererseits um anlagentechnische Maßnahmen wie dem Einbau von Löschanlagen zur Brandbekämpfung. Bei den Löschanlagen sollen im nachfolgenden nur Wasserlöschanlagen in Betracht kommen.

3.1 Thermische Entlastungsöffnungen

In der Anfangsphase eines Brandes kann die Temperatur der Rauchgase durch Ventilation erniedrigt werden. Dieses kann z.B. erreicht werden durch die Schaffung größerer Ventilationsöffnungen, wie dem gezielten Öffnen bzw. Zerstören von Scheiben. Die Temperatur wird jedoch nur verringert, solange die Zuluftmenge größer als die zur Verbrennung erforderliche theoretische Luftmenge ist. Dabei ist auch der Einfluß herkömmlicher Rauch- und Wärmeabzugsanlagen und deren Dimensionierung nach John [22] zu berücksichtigen.

Eine Hauptproblematik bei diesen Untersuchungen ist, wie diese thermischen Entlastungsöffnungen gezielt und zuverlässig während eines Brandes geschaffen werden können, ohne Personen zu gefährden. Ob eine Verglasung im Brandfall zerstört wird, hängt von der Glasart, der Größe der Verglasungsflächen und der Haltekonstruktion für die Glasscheiben ab.

3.2 Ortsfeste automatische Wasserlöschanlagen

Ortsfeste automatische Wasserlöschanlagen dienen ebenfalls dazu, die Temperaturen an Stahl-Glasfassaden zu begrenzen.

Nachfolgend soll die Wirkungsweise von Sprinkler- und Wassernebellöschanlagen als Hauptvertreter von ortsfesten Wasserlöschanlagen erläutert werden, die eine Brandausbreitung verhindern und damit auch die Entstehung von Brandrauch begrenzen. Ihr Einsatz ist jedoch auf die Brände begrenzt, die mit Wasser gelöscht werden dürfen.

3.2.1 Sprinkleranlagen

Eine Sprinkleranlage ist eine ständig betriebsbereite, selbsttätige, ortsfeste Feuerlöschanlage, deren Löschwasser über Sprinkler abgegeben wird. Sprinkler sind durch thermische Auslöseelemente verschlossene Düsen mit einem Sprühteller (Deflektor), von denen jeder unabhängig von den anderen auslösen kann. Der Löscheffekt beruht hauptsächlich auf der Kühlwirkung der größeren Wassertropfen (mittlere Tropfendurchmesser: ca. 300 µm bis 1200 µm) auf der brennenden Oberfläche des Brandstoffes.

Sprinkleranlagen arbeiten vorwiegend im Niederdruckbereich.

Ziel einer Sprinkleranlage ist es, einen Brand selbständig zu entdecken, Alarm auszulösen und das Schadenfeuer bis zum Eintreffen der Feuerwehr unter Kontrolle zu halten oder günstigstenfalls zu löschen. Sprinkleranlagen sollen Entstehungsbrände bekämpfen und auf ihren Entstehungsherd begrenzen. Weitere Ausführungen zu Sprinkleranlagen finden sich bei Kunkelmann [23, 24].

3.2.2 Wassernebellöschanlagen

Ortsfeste Wassernebellöschanlagen sind Sprühwasser-Feuerlöschanlagen, die im Dauer- oder Intervallbetrieb Wasser in fein verteilter Form versprühen. Die mittleren Tropfendurchmesser liegen zum Teil weit unter 100 µm. Ausführliche Angaben zu Anlagentypen, Löschmechanismen, bisher durchgeführten Brandversuchen und Normungstätigkeit, etc.

finden sich bei Kunkelmann [11].

Im Gegensatz zu konventionellen Sprinkleranlagen, deren Löscheffekt hauptsächlich auf der Kühlwirkung der größeren Wassertropfen auf der brennenden Oberfläche des Brandstoffes beruht, weisen Wassernebellöschanlagen folgende Löscheffekte auf :

- Kühlwirkung durch Verdampfung in der Reaktionszone und an der Grenzfläche Flammensäule/Brandgasströmung
- Ausbildung einer lokalen Inertisierung (Sauerstoffverdrängung) am Brandherd infolge Verdampfung und einer entsprechenden Teilchendichte an Wassertropfen
- Verdünnung der Reaktionszone durch Verdampfung
- Heterogene Inhibition in der Mischungszone der Flamme durch die Erzeugung eines Wandeffektes mit einem Löschmittelstrahl entsprechender Tropfendichte durch Energieentzug. Dies führt zu Kettenabbruchreaktionen und zum Verlöschen der Flamme
- Verminderung der Strahlungswärmerückkopplung durch Sedimentation der Wassertropfen in der Verbrennungszone oder durch Erreichen des Trenneffektes

Bei Wassernebellöschanlagen unterteilt man in Nieder-, Mittel- und Hochdruckanlagen. Niederdruck-Wassernebellöschanlagen weisen speziell den Vorteil auf, daß diese in das Hauswasserleitungsnetz integriert werden können, falls die Anforderungen für die Wasserversorgung der Löschanlage im Brandfall gewährleistet sind.

Die Wassernebellöschanlage weist aufgrund ihres gegenüber Sprinkleranlagen abweichenden Löschprinzips auch ohne Löschmittelzusätze Vorteile bei der Löschwirkung auf Flammenbrände, insbesondere bei flüssigen Brandstoffen und Kunststoffen, bei gleichzeitig niedrigem Löschwasserverbrauch auf.

Die Anlagen können über alle Arten von vorzugsweise schnellen Auslöseelementen wie Glasfaß, Brandmelder etc. ausgelöst werden. Hierbei ist die Auslösung von Einzelsprühköpfen als auch die Gruppenauslösung von mehreren an Sprührohren angeordneten Sprühköpfen möglich.

4. Brand- und Löschversuche

4.1 Versuchsprogramm

Zur Durchführung der Brand- und Löschversuche mit und ohne thermische Entlastungsöffnungen sowie ortsfeste Niederdruck-Wassernebellöschanlagen wurde der Brandraum in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik gemäß der Prinzipskizze des Versuchsaufbaus in **Bild 10** umgebaut. Die Untersuchungen haben das Hauptaugenmerk auf die in Abschnitt 2 erwähnten einschaligen Glasfassaden. Allerdings sind die Versuchsergebnisse, zumindest zum Teil, auch auf die anderen Fassadentypen anwendbar.

Aus den bisherigen Erfahrungen, die sowohl bei Versuchen mit Sprinkleranlagen als auch mit Niederdruck-Wassernebellöschanlagen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik gewonnen wurden [11, 13, 17, 23], wird bei den in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Brand- und Löschversuchen eine Niederdruck-Wassernebellöschanlage mit Sprühkopf der Firma Systemtechnik Herzog GmbH (39387 Oschersleben, Neubrandenburger Weg 1) eingesetzt.

Die Auswahl der Versuchsparameter und Meßgrößen hatte das Ziel, Kriterien für die Konstruktion und den Brandschutz bereitzustellen, die den Personen- und Objektschutz bei Gebäuden mit Stahl-Glasfassaden gewährleisten.

4.2 Versuchsaufbau und Meßtechnik

Der prinzipielle Versuchsaufbau ist **Bild 10**, sowie den **Bildern 11, 17, 26** und **29** zu entnehmen. **Tabelle 2** gibt Auskunft über die installierte Meßtechnik und die Position der Meßstellen.

An der Decke des Brandraumes wurden drei Stahlträger (Breite I-Träger HE-A 160 nach [25]) an den Enden an Stahlseilen an der Brandraumdecke (ca. 58 mm Abstand von der Decke) gemäß **Bild 10** aufgehängt. Die Stahlträger waren nur durch ihr Eigengewicht belastet. An diesen Stahlträgern sowie an weiteren Stellen im Brandraum und im Fassadenbereich wurden an verschiedenen Positionen Temperaturmeßstellen (Mantel-Thermo-

elemente) installiert, um eine Aussage über die Temperaturentwicklung bei den verschiedenen Versuchsparametern machen zu können.

Die Brandlast wurde auf dem als Waage ausgebildeten Boden des Brandraumes aufgebaut. Über die Messung des zeitlichen Verlaufes der Abbrandmasse wurde die Abbrandrate errechnet und hieraus mit einem entsprechend der Masseanteile der Brandlastbestandteile gemittelten Heizwert (siehe Beilicke [26]) der theoretische Wärmestrom errechnet. Der aufsteigende fühlbare Wärmestrom ist geringer als der maximale theoretische Wärmestrom. 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. Der theoretische Wärmestrom ist hierdurch ca. 20% - 30% höher als der aufsteigende fühlbare Wärmestrom.

Der Wärmestrom kann mittels der Abbrandwaage nur bis zum Löscheinsatz der Feuerwehr oder der Löschanlage ermittelt werden, da das Löschwasser die Massenbestimmung verfälscht.

Als Brandlast wurden sowohl Brandlastpaletten (Holzkrippen (Hauptkrippen und Zündkrippen) mit Linoleum und Nadelfilzteppichboden als Unterlage (**Bild 11, 29**)) analog den Untersuchungen von Kunkelmann in [9, 10, 12], als auch Möbel (**Bild 26**) analog der Untersuchung in [11] verwendet. Die Brandlastpaletten wurden zentral im Raum angeordnet, das Möbel entsprechend einer Wohnzimmereinrichtung im Raum verteilt. Die Brandlast wurde mittels Zündwannen mit 0,5 l (Versuch 2 und 4) bzw. 1 l Heptan (Versuche 1, 3, 5 und 6) im Bereich unterhalb der Holz-Zündkrippen gezündet.

Die nachfolgend aufgeführte Tabelle gibt Auskunft über die Zusammensetzung und Heizwerte der Brandlastpalette bei den Versuchen 1, 3 und 5 (mittlerer Heizwert: 16,5 MJ/kg). Bei diesen Versuchen wurde die Brandlast auf einer Fläche von 3 m * 3 m angeordnet. Bei Versuch 6 mit Möbel wurde aufgrund des Schaumstoffanteils in den Polsterungen analog den Untersuchungen in [11] ein etwas höherer Heizwert von 16,9 MJ/kg angesetzt. Bei den Versuchen mit Wassernebel mit verringerter Brandlast (Versuch 2 und 4) wurde der gleiche Heizwert von 16,5 MJ/kg wie in den Versuchen 1, 3 und 5 verwendet. Bei diesen Versuchen wurde die Brandlast auf einer Fläche von 1,5 m * 3 m aufgebaut. An dieser Stelle soll bemerkt werden, daß die Heizwerte der Brandlastkomponenten zum Teil großen Schwan-

kungen unterworfen sind. Der Heizwert bei Holz schwankt z.B. je nach Holzart und Feuchtegehalt nach Beilicke [26] zwischen 6,3 MJ/kg (grünes Holz) und 20,9 MJ/kg (maximal auftretender Wert bei Kiefer).

Stoff	Heizwert H_u MJ/kg	Masse kg	Massenanteil
Holzkippen (Kiefer, Holzfeuchte: ca. 10 %)	16	313,7	0,934
Linoleum	21	19,4	0,057
Nadelfilzteppichboden (Polypropylen)	43	2,2	0,007
n-Heptan	44,7	0,7 (1,0l)	0,002
Mittlerer Heizwert (entsprechend der Massenanteile)	16,5	336	1

Da die Brandraumtür bei sämtlichen Versuchen geschlossen war, wurde eine Ventilationsöffnung zur Versorgung des Brandes mit Luftsauerstoff benötigt. Hierzu diente eine 1 m² große Fensteröffnung in der vorderen Wand des Brandraumes.

Bei den Versuchen mit einer Niederdruck-Wassernebellöschanlage wurde ein Sprühkopf mit 5 Einzeldüsen zentral an der Brandraumdecke installiert (**Bild 29**). Der Sprühkopf wurde von einer Kreispumpe mit Löschwasser versorgt. In den Versuchen wurde neben den Temperaturen und der Abbrandmasse der zeitliche Verlauf des Volumenstromes (induktiver Durchflußmesser) und des Betriebsdruckes (piezoresistiver Druckmeßumformer) gemessen. Die Tropfengrößenverteilungen dieser Düsen werden gegenwärtig vom Hersteller Systemtechnik Herzog meßtechnisch mit einem Phasen/Doppler-Teilchenanalysator (siehe Kunkelmann [13]) untersucht. Erste Messungen haben bei einem Betriebsdruck von 4 bar einen Sauter-Durchmesser (Definition: siehe Kunkelmann [13]) von $D_{32} = \text{ca. } 30 \mu\text{m}$ ergeben. Der Sauter-Durchmesser wird überwiegend zur Beschreibung des Wärme-, Stoff- und Impulsaustausches bei physikalischen und chemischen Prozessen verwendet.

Seitlich direkt neben dem Sprühkopf wurden bei den Versuchen Indikatorsprinkler (Sprinklerkopf mit Auslöseelement ohne Wasseranschluß) sowie Brandmelder (fotoelektrische Rauchmelder) installiert, um das Auslöseverhalten beim Brand zu untersuchen. Das Auslösen des Indikatorsprinklers wurde durch den Druckabfall an einem an einer unter Druck stehenden luftgefüllten Leitung angeschlossenen Manometer ermittelt (**Bild 29**).

Weitere Angaben zu den Versuchsaufbauten und Versuchsparametern bei den jeweiligen

Versuchen sind den nachfolgenden Abschnitten zu entnehmen.

Die Meßwerte wurden mit einem Meßwerterfassungssystem registriert und anschließend ausgewertet.

Die Versuche wurden zusätzlich durch Videoaufnahmen an verschiedenen Positionen des Versuchsaufbaus (siehe **Tabelle 2**) dokumentiert und mit Hilfe von Videoprints ausgewertet.

4.3 Versuchsdurchführung, Meß- und Versuchsergebnisse

4.3.1 Brandversuch ohne thermische Entlastungsöffnung und ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Brandlast: 336 kg

Als Referenzversuch (Versuch 1) wurde zunächst ein Versuch ohne thermische Entlastungsöffnung und ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage mit einer Brandlast von 336 kg durchgeführt. **Bild 11** zeigt den Versuchsaufbau.

Beim Stahlträger 1 im Fensterbereich (siehe **Bild 10**) wurde in diesem Versuch zusätzlich eine Vorrichtung zur Ermittlung der Durchbiegung des Stahlträgers während des Brandes installiert.

Der Versuchsablauf wird in den **Bildern 12 und 13** dargestellt.

Bei diesem Versuch kam es zu einem ausgeprägten Flashover. Dieser tritt auf, wenn sich in einem Raum die Oberfläche des brennbaren Materials durch Wärmestrahlung aus den Flammen und aus der heißen Rauchgasschicht unterhalb der Decke soweit aufgeheizt hat, daß brennbare Dämpfe entstehen. Mit der im Raum vorhandenen Luft bilden diese ein zündfähiges Gemisch, das sich durch die vorhandenen Flammen oder durch andere Zündquellen entzündet. Nach dem Flashover brennt in der Regel das gesamte im Raum befindliche brennbare Material.

Im Gegensatz dazu tritt ein Backdraft auf, wenn brennbare Dämpfe, die im Brandbereich entstanden sind, aufgrund von Sauerstoffmangel und/oder starker Abkühlung (z.B. an

kalten Wänden) nicht vollständig verbrennen konnten. Durch Einmischen von Frischluft (z.B. Öffnen einer Tür oder Zerstörung eines Fensters) und/oder einer Zündquelle können diese brennbaren Dämpfe wieder entzündet werden und verbrennen dann schlagartig. Als Zündquelle kommen die im Brandraum herrschende Temperatur, Bereiche mit Flammenbildung oder glimmende Bereiche in Betracht.

Bei diesem Versuch wurde der Brand nach ca. 21 min durch die Feuerwehr abgelöscht, um die Stahlträger für die weiteren Versuche nicht zu zerstören.

Bild 14 zeigt die bleibenden Durchbiegungen der Stahlträger nach dieser relativ kleinen Brandbelastung.

In den **Bildern 15** und **16** werden ausgewählte Temperaturverläufe im Brandraum, an den Stahlträgern und an der Fensteröffnung sowie die zeitlichen Verläufe von Abbrandmasse, Abbrandrate und theoretischem Wärmestrom bis zum Löscheinsatz dargestellt. Durch die Zündung der Brandlast im Bereich unterhalb von Träger 2 zeigte dieser die höchsten Temperaturen.

Tabelle 3 veranschaulicht, ebenso wie die Temperaturdiagramme, daß die kritischen Temperaturen von Stahl und Glas (siehe auch Abschnitt 2) selbst bei dieser relativ kleinen Brandlast bei weitem überschritten werden.

4.3.2 Brandversuch mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Brandlast: 336 kg

Dieser Versuch (Versuch 3) wurde mit der gleichen Brandlast wie bei Versuch 1 (Abschnitt 4.3.1) durchgeführt. **Bild 17** zeigt den Versuchsaufbau. Bei diesem Versuch wurde in der Brandentwicklungsphase die Wand an der Vorderseite des Brandraumes bei einer Temperatur von 200°C an der Oberkante der 1 m² großen Fensteröffnung geöffnet (Temperaturmeßstelle $T_{Öf-1}$ oder $T_{Öf-2}$). Hierdurch entstand eine thermische Entlastungsöffnung von 10 m² (Breite: 4 m, Höhe: 2,5 m). Der Temperaturwert von 200°C wurde gewählt, um zum einen einen reproduzierbaren Zeitpunkt für die nachfolgenden Versuchen zu haben und zum anderen eine Temperatur zu erzielen, die für Stahlbauteile und Einscheiben-Sicherheitsglas noch relativ unkritisch ist. Eine weitere Möglichkeit wäre gewesen, die Wand beim

Auslösen von Indikatorsprinklern zu öffnen. Zahlreiche Versuche an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik haben jedoch ergeben, daß die Auslösezeitpunkte und Auslösetemperaturen von Sprinklern sehr großen Schwankungen unterworfen sind.

Die **Bilder 18 bis 21** zeigen anhand von Videoprints den Versuchsaufbau. Man erkennt besonders, daß der Brandmelder bereits nach sehr kurzer Zeit (27 s) auslöst und somit eine nur sehr geringe Gefahr durch Feuer und Brandrauch für Personen besteht. Der Indikatorsprinkler löste bei einer Temperatur von 141°C aus. Man erkennt den großen Unterschied zur Nennöffnungstemperatur von 68°C.

Die **Bilder 22 und 23** stellen ausgewählte Temperaturverläufe im Brandraum, an den Stahlträgern und an der Fensteröffnung sowie die zeitlichen Verläufe von Abbrandmasse, Abbrandrate und theoretischem Wärmestrom dar. Durch die Zündung der Brandlast im Bereich unterhalb von Träger 2 zeigte dieser Träger die höchsten Temperaturen.

Tabelle 3 verdeutlicht ebenso wie die Temperaturdiagramme, daß die thermische Entlastungsöffnung zu einer Verzögerung des Temperaturanstiegs im Stahlträger um ca. 6 min bis 10 min gegenüber dem Referenzversuch in Abschnitt 4.3.1 führte. Die kritische Stahltemperatur von 700°C wurde nicht erreicht, es wurde daher nicht vorzeitig abgelöscht. Die kritischen Temperaturen von Glas wurden bei weitem überschritten. Man kann erkennen, daß bei frühzeitigem Löscheinsatz nach Auslösung des Brandmelders oder des Indikatorsprinklers die maximalen Stahltemperaturen nur geringfügig über der Raumtemperatur liegen würden.

4.3.3 Brandversuch mit thermischer Entlastungsöffnung (5 m²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Brandlast: 336 kg

Dieser Versuch (Versuch 5) wurde analog dem Versuch in Abschnitt 4.3.2 durchgeführt. Allerdings wurde die thermische Entlastungsöffnung hier auf 5 m² (Breite: 2 m, Höhe: 2,5 m) verkleinert. Gegenüber dem Referenzversuch in Abschnitt 4.3.1 ergab sich eine nur geringfügige Verzögerung der Temperaturanstiege (**Bilder 24, 25 und Tabelle 3**). Die kritischen Temperaturen von Stahl und Glas wurden überschritten. Der Versuch wurde bei einer Temperatur von ca. 700°C in Stahlträger 2 abgelöscht.

4.3.4 Brandversuch mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Brandlast: 750 kg

Dieser Versuch (Versuch 6) wurde mit einer realen Brandlast in Form einer Wohnzimmer-einrichtung (**Bild 26**) durchgeführt. Die Brandlast wurde im Bereich unterhalb von Träger 3 (Zündkrippe mit Zündwanne im Wohnzimmerschrank) gezündet. Auch bei diesem Versuch wurde eine thermische Entlastungsöffnung von 10 m² wie bei Versuch 3 in Abschnitt 4.3.2 erzeugt.

Man sieht besonders anhand von **Tabelle 3**, daß sämtliche kritischen Temperaturen von Stahl und Glas überschritten wurden. Außerdem ergab sich bei dieser großen Brandlast ein beschleunigter Temperaturanstieg von ca. 1,5 min gegenüber dem Referenzversuch in Abschnitt 4.3.1. Dies bedeutet, daß bei dieser Brandlast die 10 m² große Öffnung nicht ausreichte, um eine thermische Entlastung zu erzielen.

Man erkennt sehr deutlich, daß die Einrichtung in einem Raum total zerstört wird, wenn der Brand nicht frühzeitig bekämpft wird.

Die **Bilder 27** und **28** sowie **Tabelle 3** zeigen ausgewählte Temperaturverläufe im Brandraum, an den Stahlträgern und an der Fensteröffnung sowie die zeitlichen Verläufe von Abbrandmasse, Abbrandrate und theoretischem Wärmestrom bis zum Löscheinsatz.

Der erste Löscheinsatz erfolgte bei einer Temperatur von ca. 700°C in Stahlträger 3 nach ca. 15 min. Der Brand wurde hierbei jedoch absichtlich nicht vollständig von der Feuerwehr abgelöscht um anschließend, nach erneuter Brandentwicklung, einen weiteren Löscheversuch mit einem neuartigen Löschgerät (Fog Nail) durchführen zu können.

4.3.5 Brandversuch mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage, ohne thermische Entlastungsöffnung - Betriebsdruck: 8,4 bar, Brandlast: 100 kg

Bild 29 stellt den Versuchsaufbau von Versuch 2 mit einer ortsfesten Niederdruck-Wassernebellöschanlage dar. Zunächst wurde die Anlage mit dem maximalen Betriebsdruck von ca. 8 bar (Volumenstrom: ca. 87 l/min) betrieben. Die Auslösung der Anlage erfolgte wiederum bei einer Temperatur von 200°C an der Oberkante der 1 m² großen Fensteröff-

nung. Die Brandlast wurde gegenüber den bisherigen Versuchen auf 100 kg verkleinert, da es sich in den bisher von Kunkelmann [11] durchgeführten Versuchen mit Wassernebel gezeigt hat, daß nur ein sehr geringer Teil der Brandlast im Bereich der Zündkrippe vom Brand betroffen ist.

Die **Bilder 30 und 31** zeigen den Versuchsablauf anhand von Videoprints und **Bild 32** den geringen Brandschaden nach dem Versuch. Die Brandrauchentwicklung im Fassadenbereich war hierbei sehr gering.

In **Bild 33 und 34** ist der sofortige Temperaturabfall nach Auslösen der Löschanlage erkennbar. Die Wärmefreisetzung ist vergleichsweise sehr gering, ebenso der Löschwasserbedarf von ca. 300 l über eine Löschzeit von ca. 3,5 min.

Nach **Tabelle 3** werden die kritischen Stahl- und Glastemperaturen (ESG) nicht erreicht. Die Tatsache, daß das 5 mm-Glasfaß-Auslöseelement des Indikatorsprinklers bei diesem Versuch nicht ausgelöst hat, konnte nicht geklärt werden. Da die Löschanlage relativ spät im Vergleich zu den Auslösezeiten bei Brandmelder bzw. schnellen Glasfaß-Auslöseelementen ausgelöst wurde, wurde die kritische Temperatur von Floatglas überschritten.

4.3.6 Brandversuch mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage, ohne thermische Entlastungsöffnung - Betriebsdruck: 4,1 bar, Brandlast: 100 kg

Dieser Versuch (Versuch 4) wurde analog zu Versuch 2 in Abschnitt 4.3.5, jedoch bei einem Betriebsdruck von ca. 4 bar (Volumenstrom: ca. 62 l/min), durchgeführt. Dies ist der minimal zulässige Betriebsdruck der eingesetzten Niederdruck-Wassernebellöschanlage und entspricht ungefähr dem Druck bei Hauswasserleitungen. Gegenüber Versuch 2 wurde ein Indikatorsprinkler mit 3 mm Glasfaß eingesetzt.

Man erkennt in den **Bildern 35 und 36** sowie in **Tabelle 3** die gleich gute Löschwirkung wie bei Versuch 2 mit höherem Betriebsdruck und Volumenstrom.

5. Zusammenfassung

5.1 Einsatz von thermischen Entlastungsöffnungen

- Der zeitliche Anstieg der Brandraumtemperatur und der hieraus resultierende zeitliche Anstieg der Temperatur in den Stahlbauteilen als auch die Maximalwerte dieser Temperaturen können durch die Erzeugung einer ausreichend großen Öffnung im Fassadenbereich sowohl verzögert als auch erniedrigt werden.
- Die zeitliche Verzögerung des Temperaturanstieges bei gleichzeitig ausreichender Begrenzung der Stahltemperaturen muß hierbei so groß sein, daß die Tragfähigkeit der Stahlkonstruktion bis zum und während des Feuerwehreinsatzes gewährleistet ist.
- Weiterhin soll das Gebäude bzw. die Stahl-Glasfassade nach dem Brandereignis möglichst geringe Schäden aufweisen.
- Bei einem Brand in einem Brandraum mit 25 m² Grundfläche und 2,7 m Höhe wird bei einer Brandlast von 336 kg durch die Erzeugung einer 10 m² großen Öffnung im Fassadenbereich in der Brandentwicklungsphase der Temperaturanstieg auf 500°C im Stahlträger um ca. 10 min gegenüber einem Versuch ohne thermische Entlastungsöffnung verzögert.
- Die maximal auftretende Stahltemperatur (ca. 523°C) liegt über der Temperatur von 500°C, bei der Stahlbauteile ungefähr noch die halbe Tragfähigkeit aufweisen.
- Eine kleinere thermische Entlastungsöffnung (hier: 5 m²) führt bei sonst gleichen Versuchsbedingungen nur zu einer Verzögerung von ca. 1 min bis zum Erreichen der 500°C - Grenze. Weiterhin wird die Temperatur von 700°C im Stahlträger überschritten, unterhalb derer Baustähle bei langsamer Abkühlung (Löschwasserbeanspruchung) ihre mechanischen Eigenschaften weitgehend wieder zurückerhalten.
- Bei einer normalen Wohnzimmereinrichtung (ca. 750 kg) ergibt eine Öffnungsfläche von 10 m² einen beschleunigten Temperaturanstieg, d.h. die Öffnungsfläche müßte zur thermischen Entlastung noch größer gewählt werden.
- Durch die Erzeugung von thermischen Entlastungsöffnungen in der Brandentwicklungsphase entsteht aufgrund des Weiterbrennens der Brandlast im Gegensatz zum frühzeitigen Auslösen einer Niederdruck-Wassernebellöschanlage, die die weitere Brandausbreitung sofort verhindert, ein beträchtlicher Brandschaden an der Inneneinrichtung des Raumes.

- Die entstehenden Temperaturen liegen auch bei der untersuchten großen Öffnung von 10 m² weit über den zulässigen Temperaturen für normale Verglasungen wie Einfachglas (Floatglas), Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) und Verbund-Sicherheitsglas (VSG)
- Passanten, Feuerwehreinsatz- und Rettungskräfte sind hierbei sowohl durch herabfallende große Verglasungsteile als auch durch Glaskrümel, evtl. aus großer Höhe, gefährdet.
- Aufgrund des unterschiedlichen Bruchverhaltens von Verglasungen infolge verschiedener Glasarten, Glasdicken, Haltekonstruktionen der Scheiben und unterschiedlicher Aufheizbedingungen bei unterschiedlichen Brandbedingungen kann die Zerstörung einer Verglasung nicht vorhergesagt bzw. numerisch simuliert werden.

5.2 Einsatz von Niederdruck-Wassernebellöschanlagen

Bei frühzeitiger Auslösung in der Brandentwicklungsphase durch schnelle Auslöseelemente oder Brandmelder im Brandraum:

- Die Brandausbreitung bleibt selbst bei offenen Türen bzw. Fenstern auf den Zündbereich im Brandraum beschränkt.
- Keine Gefährdung der Stahl-Glasfassadenkonstruktion: vernachlässigbare Durchbiegungen und Längenänderungen der Stahlträger, keine Zerstörung von Verglasungen aufgrund der niedrigen Temperaturen; kritische Stahl- und Glastemperaturen für verschiedene Verglasungen wie Einfachglas (Floatglas), Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) und Verbund-Sicherheitsglas (VSG) werden nicht erreicht.
- Keine Gefährdung von Passanten, Feuerwehreinsatz- und sonstigen Hilfskräften durch herabfallende Teile der Verglasungen wie Glasbruchstücke, Glaskrümel und Rahmenelemente evtl. aus großen Höhen.
- Kein Feuerüberschlag in darüberliegende Geschosse, z.B. über Fenster- und Türöffnungen.
- Nur geringe Verrauchung des Treppenraumes bei offener Tür, insbesondere bei schneller Auslösung der Löschanlage durch Brandmelder.
- Keine Brandausbreitung und nur geringe Rauchausbreitung im Zwischenfassadenbereich von Doppelfassaden und vorgehängten hinterlüfteten Fassaden.
- Keine Gefährdung der tragenden Wände, Decken und Treppenräume des Gebäudes.

- Der Brandschaden an den Einrichtungsgegenständen (hier: aufgebaute Brandlast) sowie die Kontamination der Innenseite von Wänden, Decken und Dämmstoffen durch Ruß, Brandgase und Branddämpfe ist sehr gering.
- Geringe Brandrauchentwicklung im Fenster- bzw. Fassadenbereich.
- Durch die Verhinderung eines Vollbrandes werden sowohl der Personen- und Sachschaden als auch der evtl. unvermeidbare Löschwasserschaden durch einen Feuerwehreinsatz auf ein Minimum reduziert.
- Normalentflammbare Bau- und Dämmstoffe werden nur bei direkter Flammeneinwirkung und durch die heißen aufsteigenden Brandgase in geringem Maße angebrannt (überwiegend im oberen Bereich von Türen und im Bereich darüber, Verteiler- und Steckdoseöffnungen nahe der Decke).
- Nur geringe Befeuchtung von Dämmstoffen in den Wänden im Bereich von Öffnungen (z.B. für Steckdosen, Lichtschalter, Verteilerdosen).
- Keine Brandausbreitung in Hohlräume (z.B. Decken und Wände).
- Keine Zerstörung von Oberlichtern und Verglasungen in Türen und Fenstern.
- Brandschutzverglasungen sind nicht erforderlich.
- Flüssige Brandstoffe (hier: Bratpfanne mit brennendem Pflanzenöl in einer Küche) können im Gegensatz zu Sprinkleranlagen ohne Zusätze zum Löschwasser in kurzer Zeit (hier: unter 25 s) selbst bei offener Tür gelöscht werden. Einsatzmöglichkeit dieser Löschanlagen z.B. auch in Lagerräumen und Labors.
- Durch die Niederdruckausführung der Löschanlage (minimaler Betriebsdruck: 4 bar) ist der kostengünstige Anschluß an eine Hauswasserleitung bei ausreichender Wasserversorgung im Brandfall denkbar. Im Gegensatz zu Mittel- und Hochdruck-Wassernebellöschanlagen ergeben sich keine besonderen Anforderungen bezüglich der Wasseraufbereitung (z.B. Verschmutzungen) und Anlagentechnik (z.B. Hochdruckpumpen, Edelstahl-Verrohrung etc.).
- Geringer Löschwasserverbrauch und Löschwasserschaden, insbesondere beim Löschen im Intervallbetrieb (kurze Pausen während des Löschvorganges).
- Vorteile bei der Gebäudestatik und bei den Baukosten durch Verzicht auf aufwendige Beplankungen mit nichtbrennbaren Baustoffen, Aufbringen von mineralischen Schichten oder dämmschichtbildenden Brandschutzsystemen zur Erzielung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer.
- Aus architektonischen Gründen kann der Stahl sein ursprüngliches Erscheinungsbild („sichtbarer Stahl“) beibehalten.

- Keine Gefährdung von Feuerwehreinsatz- und sonstigen Hilfskräften durch Backdraft und Flashover.
- Schnelle Abkühlung des Brandraumes nach Löschbeginn.
- Keine Gefährdung von Personen durch Wasserdampfbildung.
- Keine Gefährdung von Personen durch Sauerstoffmangel aufgrund des Brandes und der Löschanlage. Die Sauerstoffkonzentration liegt nach Löschbeginn im Brandraum mit ca. 16 - 18,5 % O₂ über dem für den Stickeffekt erforderlichen Wert bei Löschgasen (z.B. bei CO₂ < 15 % O₂) sowie im Bereich bzw. über der O₂-Konzentration der Ausatemungsluft eines Menschen (16 - 17,5 % O₂) als auch wesentlich über dem Wert, bei dem die Sauerstoffmangelkrankheit auftritt (< 12 % O₂).
- Die Gefahr durch die Brandgasbestandteile Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Ruß, aromatische Kohlenwasserstoffe und sonstige Pyrolyseprodukte auf den Menschen ist jedoch gesondert zu berücksichtigen. Wie diese Brandgasbestandteile in ihrer Zusammenwirkung den menschlichen bzw. tierischen Organismus schädigen ist hierbei noch nicht geklärt.
- Die bei einem Vollbrand eines Wohnzimmers entstehende Kohlendioxid-Konzentration von ca. 200.000 ppm und Kohlenmonoxid-Konzentration von ca. 50.000 ppm wird durch die frühzeitige Auslösung der Wassernebellöschanlage auf eine Kohlendioxid-Konzentration von ca. 21.000 - 35.000 ppm bzw. Kohlenmonoxid-Konzentration von 1.500 - 4.100 ppm reduziert.

Nach dem Handbuch der gefährlichen Güter von Hommel [14] ergeben sich folgende für den Menschen kritischen Konzentrationen:

Kohlendioxid: Kurzzeiteinwirkung von 30.000 ppm: 300%ige Erhöhung der Atmung
 120.000 - 150.000 ppm: nach wenigen Minuten bewußtlos

Kohlenmonoxid: 800 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 45 Minuten
 1.600 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 20 Minuten
 3.200 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 5 - 10 Minuten
 Bewußtlosigkeit und Tod nach 20 Minuten
 6.400 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 2 - 3 Minuten, Tod nach
 10 - 15 Minuten

Diese Untersuchungsergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden: Personen in Räumen, in denen ein Brand entsteht, können nur dann überleben, wenn durch eine schnelle Alarmierung eine ebenso rasche Brandbekämpfung eingeleitet wird. Dies ist besonders im Hinblick auf schlafende Personen zu berücksichtigen.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Schleich J.B.: Der unsichtbare Brandschutz.
Das Bauzentrum 4/97, S.40 bis 50

- [2] Compagno A.: Intelligente Glasfassaden.
Birkhäuser Publishers, 4. Auflage,
Basel, Boston, Berlin, 1999

- [3] Schittich C., Glasbau Atlas.
Staib G., Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 1998
Balkow D.,
Schuler M.,
Sobek M.:

- [4] VEGLA: Technisches Handbuch "Glas am Bau"
Vereinigte Glaswerke GmbH, Aachen 1999

- [5] Hass R., Stahlbau Brandschutz Handbuch.
Meyer-Ottens C., Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissen-
schafter GmbH, Berlin 1994
Richter E.:

- [6] Rohr B., Der Feuerwehrmann auf der Schulbank.
Hölscher B.: Band 7, Baukunde, 2. Auflage, Verlag Jamelle, Bochum

- [7] Schwartz E. v.: Handbuch der Feuer- und Explosionsgefahr.
6. Auflage, Feuerschutzverlag Ph. L. Jung, München 1964

- [8] DIN: Bauen in Europa - Brandschutzbemessung
Eurocode 1 bis 6 und Eurocode 9.
1. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich
1999

- [9] 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:
- Literaturoauswertung
- Einflußgrößen auf die Brand- und Rauchausbreitung
- Brandversuche
Forschungsbericht Nr. 100 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1996)
- [10] 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 Einscheiben-Sicherheitsglas im Brandfall
Forschungsbericht Nr. 105 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1997)
- [11] Kunkelmann J.: Auswirkung des Einsatzes ortsfester Wassernebellöschanlagen auf die Brand und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden.
Teil 3:
- Literaturoauswertung (Wassernebellöschanlagen - Entwicklung, Löschprinzipien, Einsatzgebiete, Anwendungsgrenzen, Anlagentechnik, Normung)
-Brand- und Löschversuche in einem Gebäudeausschnitt mit

einer Ganzflächendoppelfassade

Forschungsbericht Nr. 108 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1998)

- [12] Kunkelmann J.: 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

Forschungsbericht Nr. 114 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1999)

- [13] 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 Lägern und Sprinkleranlagen sowie zur Überprüfung von numerischen Simulationen.

- Darstellung der Problematik bei der meßtechnischen Erfassung von physikalisch / chemischen Größen bei Brand- und Löschversuchen insbesondere im Hinblick auf die Verwendung bei numerischen Simulationen.

Forschungsbericht Nr. 95 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1995)

- [14] Hommel G.: Handbuch der gefährlichen Güter.
9. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York,
1999
- [15] Mommsen H.: Der Gesundheits-Brockhaus.
4. Auflage, Mannheim 1990
- [16] Bogenberger S.,
et al.: Lexikon Medizin
3. Auflage, Verlag Urban & Schwarzenberg, München
- [17] Kunkelmann J.: Entwicklung und Erprobung neuartiger Löschanlagen für den
mehrgeschossigen Holzbau zur Brandbekämpfung und Flucht-
wegsicherung.
Forschungsprojekt im Auftrag des Bundesministeriums für
Bildung und Forschung (BMBF), Förderkennzeichen: 0339852
(Forschungsbericht wird gegenwärtig erstellt)
- [18] Funk R.: Explosionsgefahr bei Metallbrand.
Blaulicht, 5-2000, S. 4 - 6
- [19] Staufenbiel R.: Metallbrand - Unerwartete Komplikationen.
Unabhängige Brandschutzzeitschrift, UB 3/98, S. 20 - 21
- [20] Grupp H.: Grundlagen der Gebäudesanierung.
Allianz Report 6/99, S. 360 - 364
- [21] Hasenbichler H.: Chloridschäden an Stahlbetontragwerken.
Brandschutz 2/2000, S. 36 - 37
- [22] John R.: Rauch- und Wärmeabzug bei Bränden in großen Räumen.
VFDB-Zeitschrift, 1/88

- [23] Kunkelmann J.: Sprinkleranlagen - Auslösung, Löschwirksamkeit, Anwendungsgrenzen.
Fachtagung "Wasser als modernes Löschmittel", Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 1999
- [24] Kunkelmann J.: Einsatz von Wassernebel-Löschanlagen zur Verhinderung der Ausbreitung von Bränden innerhalb von Treppenträumen mit Holztreppe und/oder Holzverkleidungen in die darüberliegenden Wohnungen insbesondere bei Altbauten.
Teil 1:
 - Brand- und Rauchausbreitung sowie brandschutztechnische Maßnahmen bei Altbaugebäuden und Gebäuden aus dem Bereich des Denkmalschutzes
 - Baurechtliche Anforderungen
 - Wirkungsweise von Sprinkler- und Wassernebellöschanlagen
 - Experimentelle Untersuchungen (Versuchsaufbau: 4-geschossiger Treppenraum, Niederdruck-Wassernebellöschanlage)
Forschungsbericht Nr. 120 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2000)
- [25] Schneider-Bürger M.: Stahlbau-Profile.
16. Auflage, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf 1985
- [26] Beilicke G.: Zusammenstellung von Heizwerten für die Brandlastberechnung. Brandschutz Explosionsschutz - Aus Forschung und Praxis, Band 15, 1. Auflage, Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin 1987

Tabelle 1: Versagen der Verglasungen von Innen- und Außenfassade bei Ganzflächen- und Kastendoppelfassaden mit unterschiedlichen Abständen zwischen Innen- und Außenfassade sowie bei unterschiedlichen Brandlasten

Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)									
	Temperatur	Ganzflächen- doppelfassade Versuch 4 1,2 m; 166 kg	Ganzflächen- doppelfassade Versuch 5 0,8 m; 166 kg	Ganzflächen- doppelfassade Versuch 6 0,3 m; 166 kg	Ganzflächen- doppelfassade Versuch 7 0,8 m; 332 kg	Ganzflächen- doppelfassade Versuch 8 1,2 m; 754 kg	Kastendoppel- fassade Versuch 1 Alu-Abschott 0,6 m; 166 kg	Kastendoppel- fassade Versuch 2 Stahl-Abschott 0,6 m; 166 kg	Kastendoppel- fassade Versuch 3 Stahl-Abschott 0,6 m; 332 kg
Wärmeschutzglasfenster Innenfassade (PVC, 4-16-4, k=1,5 W/m²K) 1. Ribbildung 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 ¹	- ²	10 min 28 s 640°C ¹	7 min 51 s 529°C ¹	9 min 17 s 511°C ¹
	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 ¹	7 min 51 s 401°C ¹	9 min 17 s 424°C ¹
	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	- ³	- ³	- ³
	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	-	- ³	- ³	- ³
ESG-Verglasung Außenfassade (8 mm ESG in Aluminium- profilsystem mit Glashalteleisten) Zerspringen der unteren ESG-Scheibe	TZ3.1	kein Zerspringen	kein Zerspringen	16 min 38 s 770°C	16 min 38 s 667°C ⁴	7 min 50 s 612°C	kein Zerspringen ⁵	15 min 59 s ⁶ 833°C	36 min 56 s ⁷ 927°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 (8 mm ESG in Aluminium- profilsystem mit Glashalteleisten) 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 ⁸	kein Zerspringen ⁹
	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	"	"

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

2 Ohne Wärmeschutzglasfenster

3 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.

4 Kein Zerspringen, Beginn der plastischen Deformation der Scheibe im oberen Rahmenbereich – Scheibe hat Vorspannung verloren

5 Leichte plastische Deformation der ESG-Scheibe – Scheibe hat Vorspannung verloren

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

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

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

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

Tabelle 2: Meßstellenliste (siehe Bild 10)

Pos.	Meßstellen- bezeichnung	Position der Meßstellen
[1]	ΔM	Abbrandwaage - Brandraumboden
[2]	V_{Br}	Löschwasservolumenstrom am Sprühkopf im Brandraum
[3]	$p_{W,B}$	Überdruck am Wassernebelsprühkopf im Brandraum
[4]	p_{Spr}	Manometer für Indikatorsprinkler
Temperaturen im Brandraum		
[5]	T_{B1}	Brandraum, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
[6]	T_{B2}	Brandraum, zentral im Raum am Indikatorsprinkler
[7]	T_{B4}	Brandraum, 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: vorne links
[8]	T_{B5}	Brandraum, 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: hinten links
[9]	T_{B6}	Brandraum, 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: hinten rechts
[10]	T_{B7}	Brandraum, 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: vorne rechts

zu Tabelle 2		
Temperaturen im Bereich der thermischen Entlastungsöffnung		
[11]	$T_{\text{Öf-1}}$	Oberkante Öffnung links 5 cm unter der Kante, 1/3 Öffnungsbreite von links Temperaturmeßstelle ortsfest an der Fensteröffnung, auch beim Verfahren der Wand
[12]	$T_{\text{Öf-2}}$	Oberkante Öffnung rechts Temperaturmeßstelle ortsfest an der Fensteröffnung, auch beim Verfahren der Wand 5 cm unter der Kante, 1/3 Öffnungsbreite von rechts
[13]	$T_{\text{Öf-3}}$	1/3 der 1 m-Öffnung von links 5 cm unter Stahlträger 1, ortsfest im Brandraum sonst gleiche Position wie $T_{\text{Öf-1}}$
[14]	$T_{\text{Öf-4}}$	1/3 der 1 m-Öffnung von rechts 5 cm unter Stahlträger 1, ortsfest im Brandraum sonst gleiche Position wie $T_{\text{Öf-2}}$
[15]	$T_{\text{Öf-5}}$	1/3 der 2 m- bzw. 4 m-Öffnung von links 5 cm unter Stahlträger 1, ortsfest im Brandraum
[16]	$T_{\text{Öf-6}}$	1/3 der 2 m- bzw. 4 m-Öffnung von rechts 5 cm unter Stahlträger 1, ortsfest im Brandraum
[17]	$T_{\text{Öf-7}}$	1/3 der 4 m-Öffnung von links 5 cm unter Stahlträger 1, ortsfest im Brandraum
[18]	$T_{\text{Öf-8}}$	1/3 der 4 m-Öffnung von rechts 5 cm unter Stahlträger 1, ortsfest im Brandraum

zu Tabelle 2		
Temperaturen an Stahlträger 1		
[19]	$T_{Tr1,1}$	Mitte linke Trägerhälfte
[20]	$T_{Tr1,2}$	Mitte linke Trägerhälfte
[21]	$T_{Tr1,3}$	Trägermitte
[22]	$T_{Tr1,4}$	Trägermitte
[23]	$T_{Tr1,5}$	Trägermitte
[24]	$T_{Tr1,6}$	Trägermitte
[25]	$T_{Tr1,7}$	Trägermitte
[26]	$T_{Tr1,8}$	Mitte rechte Trägerhälfte
[27]	$T_{Tr1,9}$	Mitte rechte Trägerhälfte
Temperaturen an Stahlträger 2		
[28]	$T_{Tr2,1}$	Mitte linke Trägerhälfte
[29]	$T_{Tr2,2}$	Mitte linke Trägerhälfte
[30]	$T_{Tr2,3}$	Trägermitte
[31]	$T_{Tr2,4}$	Trägermitte
[32]	$T_{Tr2,5}$	Trägermitte
[33]	$T_{Tr2,6}$	Trägermitte
[34]	$T_{Tr2,7}$	Trägermitte
[35]	$T_{Tr2,8}$	Mitte rechte Trägerhälfte

zu Tabelle 2		
Temperaturen an Stahlträger 3		
[36]	$T_{Tr3,1}$	Mitte linke Trägerhälfte
[37]	$T_{Tr3,2}$	Mitte linke Trägerhälfte
[38]	$T_{Tr3,3}$	Trägermitte
[39]	$T_{Tr3,4}$	Trägermitte
[40]	$T_{Tr3,5}$	Trägermitte
[41]	$T_{Tr3,6}$	Trägermitte
[42]	$T_{Tr3,7}$	Trägermitte
[43]	$T_{Tr3,8}$	Mitte rechte Trägerhälfte
[44]	$T_{Tr3,9}$	Mitte rechte Trägerhälfte
Position der Videokameras		
[45]	Vid1	Beobachtungsfenster Brandraum
[46]	Vid2	Fensteröffnung (Front)
[47]	Vid3	Thermische Entlastungsöffnung (seitlich)
[48]	Vid4	Manometer für Indikatorsprinkler
[49]	Vid5	Handkamera

Tabelle 3: Brand- und Löschversuche (Versuchsparameter, kritische Stahltemperatures, Auslösung von Brandmeldern und Indikatorsprinklern)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)									
Brandraum: Länge: 5 m Breite : 5m Höhe: 2,7 m Fensteröffnung: 1 m ² Tür: geschlossen	Kritische Stahltemperatur: 350°C Ausnutzungsfaktor= 1	Kritische Stahltemperatur: 500°C ungefähr halbe Trag- fähigkeit	Kritische Stahltempe- ratur: 700°C ca. reversible mechan. Eigen- schaften bei langsamer Ab- kühlung (z.B. beim Lösch- vorgang)	Maximale Stahlträger- temperatur	Maximale Brandraum- temperatur	Brand- melder fotoelektr. Rauchmelder	Indikator- sprinkler Glasfuß: 5mm, 68°C RTI= ca.100 (ms) ^{1/2} oder Glasfuß: 3 mm, 68°C RTI= ca.50 (ms) ^{1/2}		
ohne thermische Entlastungsöffnung - ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage									
Versuch 1 Brandlast: ca. 336 kg (2 Brandlast- paletten)	12 min 6 s Bezug: ¹⁾ 0 min	13 min 36 s Bezug: ¹⁾ 0 min	15 min 48 s Bezug: ¹⁾ 0 min	936°C ²⁾ 21 min 3 s Träger 2	1075°C ²⁾ 21 min 3 s	--	--		
mit thermischer Entlastungsöffnung (Öffnen der Wand: Bei Erreichen von 200°C an der Oberkante der 1m ² großen Fensteröffnung)									
Versuch 3 therm. Entlastungsöffnung: 10 m ² Öffnung: 3 min 21 s Brandlast: ca. 336 kg (2 Brandlast- paletten)	18 min 9 s + 6 min 3 s	23 min 48 s + 10 min 12 s	wird nicht er- reicht	523°C ²⁾ 26 min 15 s Träger 2	615°C ²⁾ 22 min 42 s	27 s max. Stahl- temp.: 23°C	3 mm: 1 min 37 s (ca. 141°C) max. Stahltemp.: 27°C		
Versuch 5 therm. Entlastungsöffnung: 5 m ² Öffnung: 3 min 22 s Brandlast: ca. 336 kg (2 Brandlast- paletten)	12 min 43 s + 37 s	14 min 45 s + 1 min 9 s	+ 1 min 57 s	706°C ²⁾ 17 min 54 s Träger 2	882°C ²⁾ 17 min 42 s	19 s max. Stahl- temp.: 19°C	3 mm: 1 min 43 s (ca. 143°C) max. Stahltemp.: 24°C		
Versuch 6 therm. Entlastungsöffnung: 10 m ² Öffnung: 9 min 21 s Brandlast: ca. 750 kg (Möbel)	10 min 39 s - 1 min 27 s	12 min 12 s - 1 min 24 s	- 1 min 30 s	737°C ²⁾ 15 min 15 s Träger 3 ³⁾	904°C ²⁾ 14 min 57 s	23 s max. Stahl- temp.: 23°C	3 mm: 1 min 35 s (ca. 117°C) max. Stahltemp.: 30°C		
mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage (Löschbeginn: Bei Erreichen von 200°C an der Oberkante der 1m ² großen Fensteröffnung)									
Versuch 2 Wassernebel: 8,4 bar, 87 l/min Löschbeginn: 6 min 30 s Brandlast: ca. 100 kg (reduzierte Brandlastpalette)	wird nicht erreicht	wird nicht erreicht	wird nicht erreicht	119°C 7 min 12 s Träger 2	285°C 6 min 21 s	--	5 mm: keine Auslösung max. Stahltemp.: --		
Versuch 4 Wassernebel: 4,1 bar, 63 l/min Löschbeginn: 6 min Brandlast: ca. 100 kg (reduzierte Brandlastpalette)	wird nicht erreicht	wird nicht erreicht	wird nicht erreicht	122°C 7 min 21 s Träger 2	270°C 5 min 57 s	34 s max. Stahl- temp.: 23°C	3 mm: 2 min 41 s (ca. 135°C) max. Stahltemp.: 39°C		

¹⁾ Positive Zeitwerte: verzögerter Temperaturanstieg; negative Zeitwerte: beschleunigter Temperaturanstieg bezogen auf Versuch ohne therm. Entlastungsöffnung u. ohne Wassernebel

²⁾ Ablöschen mit Strahlrohr

³⁾ Abweichend von den übrigen Versuchen: Zündung im Bereich unterhalb von Stahlträger 3 statt Stahlträger 2

Möglichkeiten der Brandübertragung

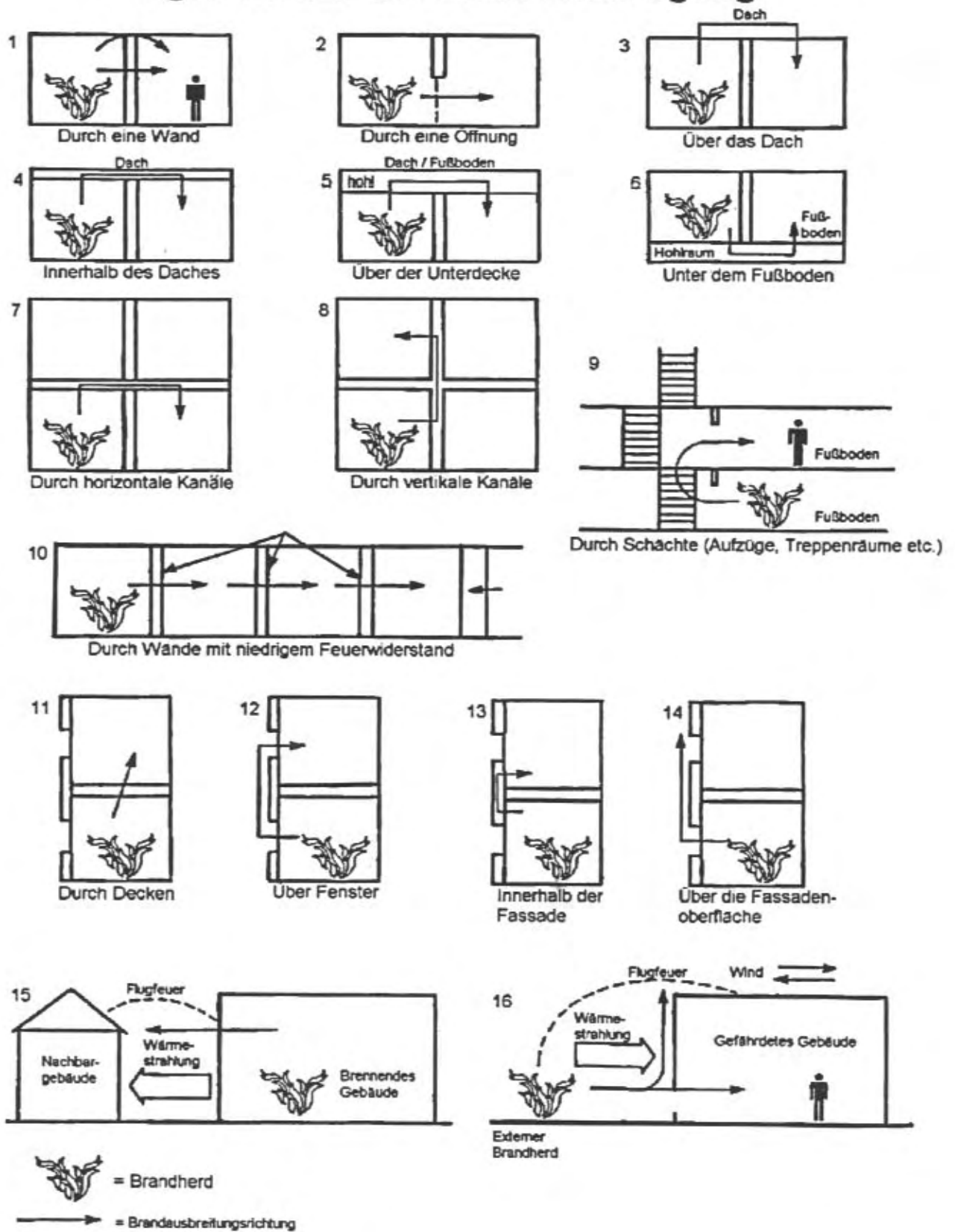
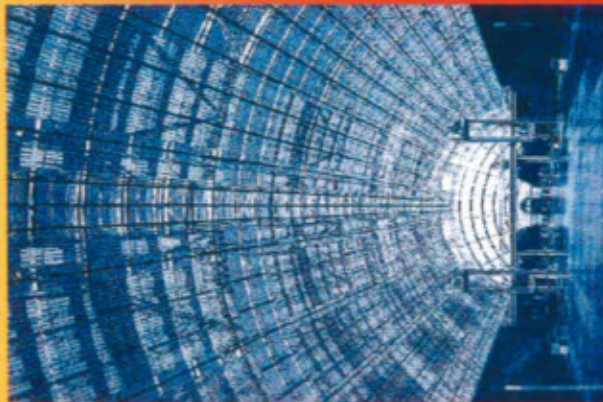
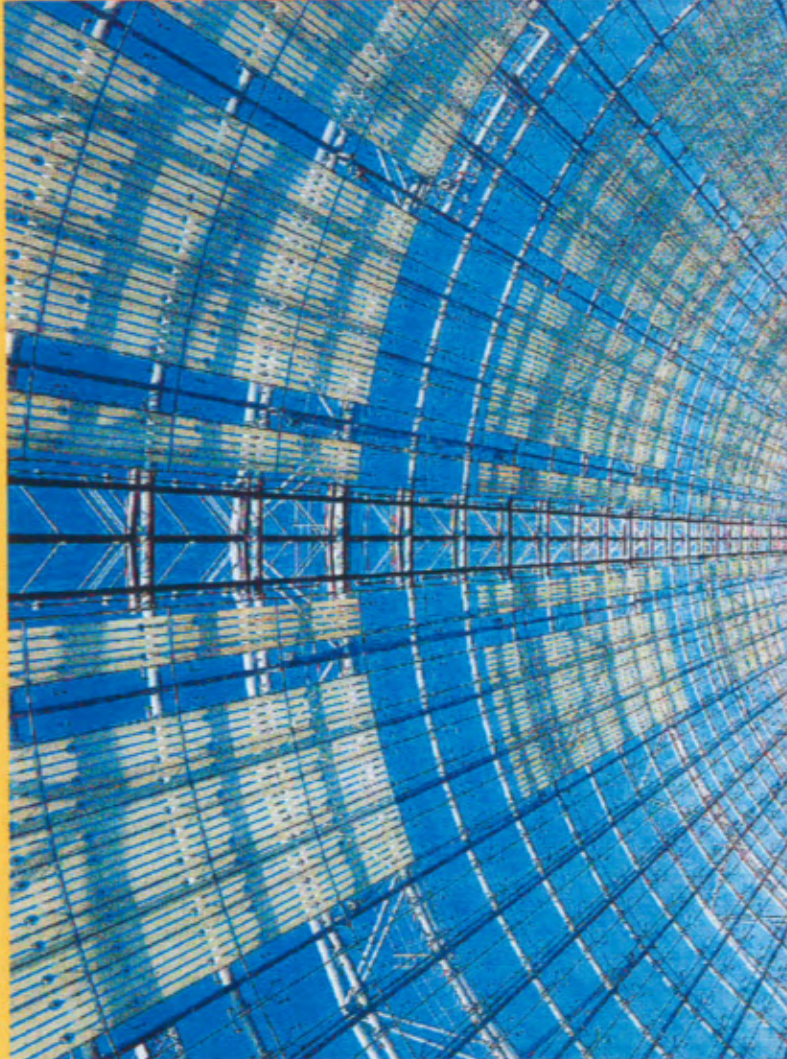


Bild 1: Möglichkeiten der Brandübertragung innerhalb und zwischen Gebäuden.



Neue Messe in Leipzig

**Stahl/Glas-Konstruktion: Verglasung: VSG aus 2 * 8 mm
ESG und PVB-Folie (1,52 mm)**

Fotos: Hans Georg Esch, Köln
Klaus Frahm/Contur, Köln

Bild 2: Neue Messe in Leipzig

Victoria-Versicherung in Köln

Ganzflächendoppelfassade:

Innenfassade: Rahmenelemente aus Aluminium
Zwischenfassadenbereich: (Breite: 0,7 m) mit
Gitterroststegen für Reinigungs- und Wartungs-
arbeiten

Außenfassade: Verglasung: VSG: 6 mm und 8 mm,
2,6° nach außen geneigt

Fotos: Josef Gartner & Co., Gundelfingen

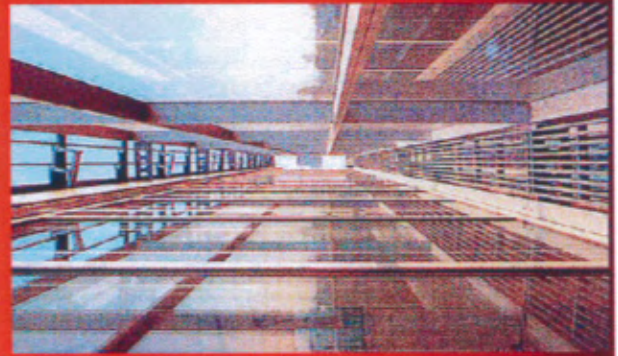
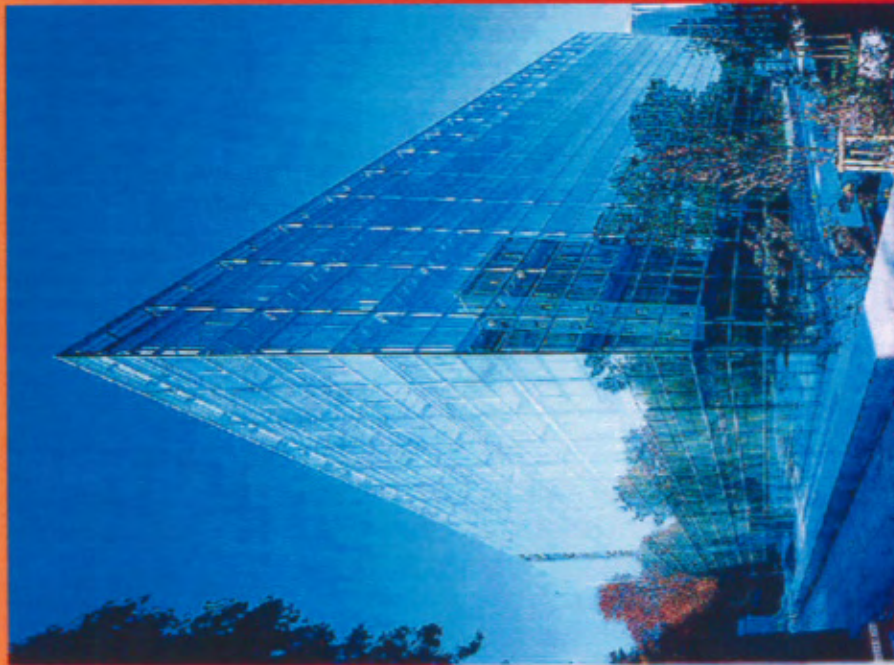


Bild 3: Victoria-Versicherung in Köln

Druckerei Western Morning News in Plymouth, England

**Gebäude mit konkaver Glasfassade:
Verglasung: ESG: 12 mm**

Fotos: Jo Reid and John Peck, London

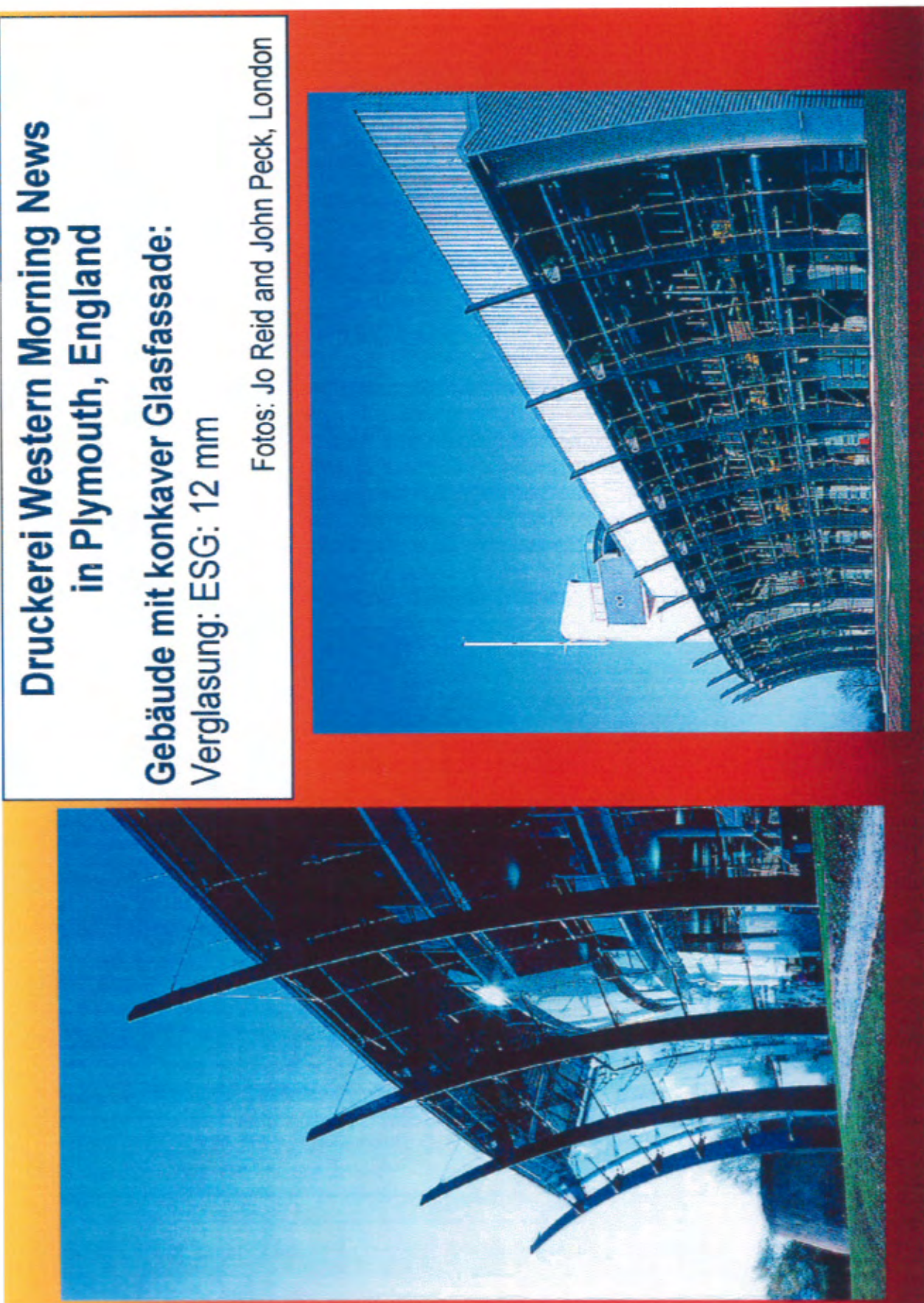


Bild 4: Druckerei Western Morning News in Plymouth, England



Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



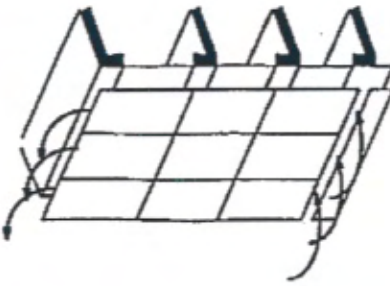
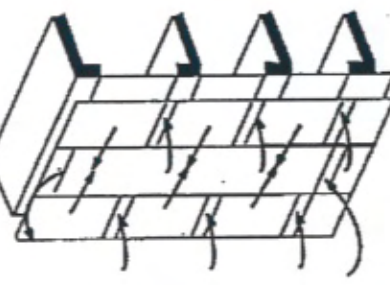
Ganzflächendoppelfassade	Kanaldoppelfassade	Kastendoppelfassade
		
Luftführung im Zwischenfasadenbereich erfolgt über das gesamte Gebäude. Der Zwischenfasadenbereich weist abgesehen von den Randbereichen des Gebäudes keine vertikalen und horizontalen Abschlottungen auf.	Kastenfenster wechseln sich mit vertikalen Abluftkanälen ab. Die Kastenfenster haben Zuluftöffnungen nach außen und Abluftöffnungen seitwärts zu den Abluftkanälen.	Geschoßweise durchlüftete Fassade mit horizontalen Abschlottungen je Geschoss und vertikalen Abschlottungen je Fenster.

Bild 5: Bauformen von Doppelfassaden (Grundprinzipien)



Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brand- und Rauchausbreitung bei der Ganzflächendoppelfassade



Bild 6: Brandversuch mit einer Ganzflächendoppelfassade - Abstand zwischen Innen- und Außenfassade: 1,2 m, Brandlast: Wohnzimmereinrichtung mit 754 kg Möbel

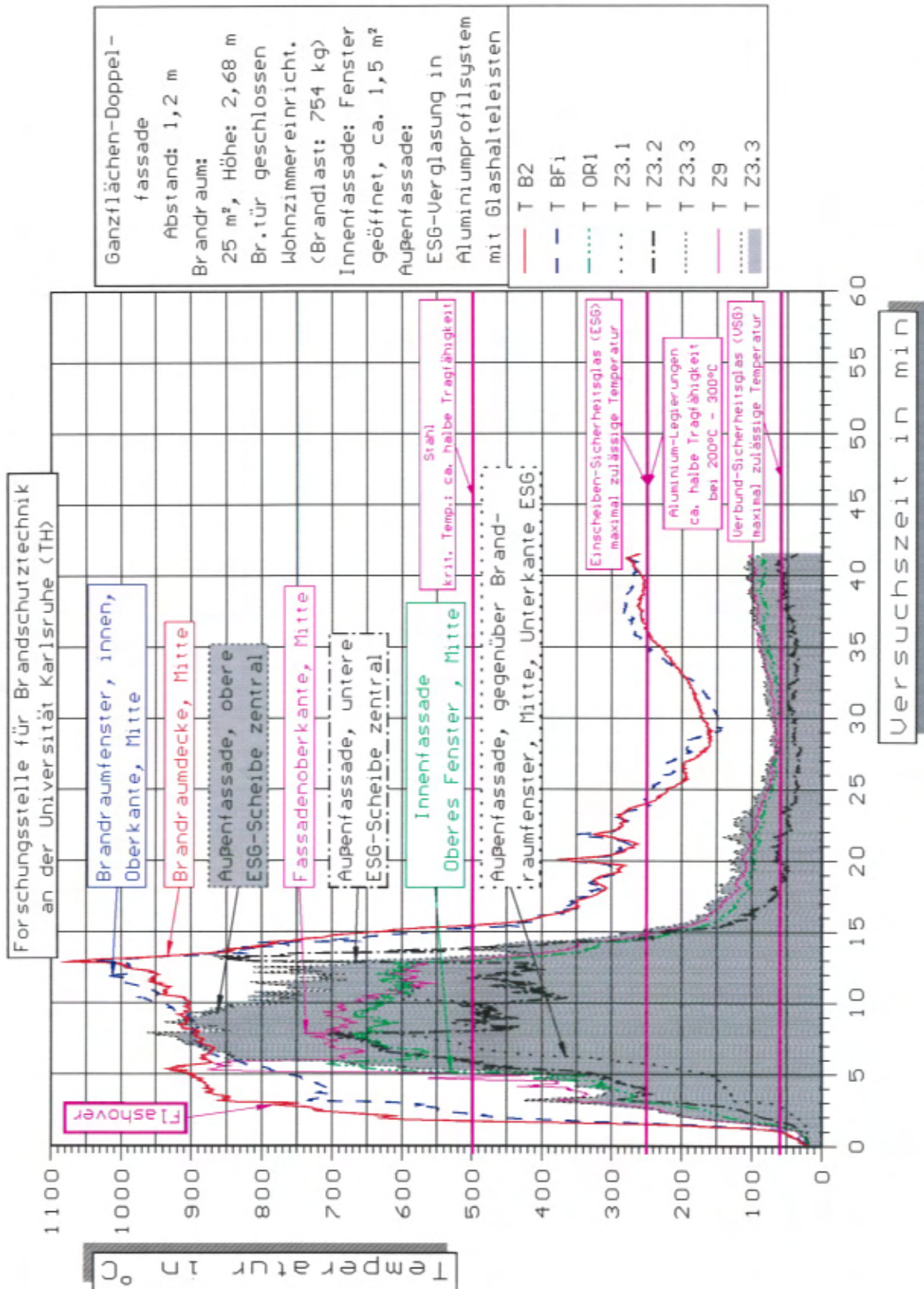


Bild 7: Brandversuch mit einem Versuchsgebäude mit einer Ganzflächendoppelfassade
- ausgewählte Temperaturverläufe



Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brand- und Rauchausbreitung bei der Kastendoppelfassade

Vertikale und horizontale Aluminiumabschottungen

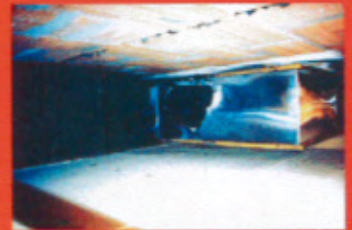


Bild 8: Brandversuch mit einer Kastendoppelfassade (vertikale und horizontale Aluminiumabschottungen) - Abstand zwischen Innen- und Außenfassade: 0,6 m, Brandlast: 1 Brandlastpalette mit 166 kg.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)
Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brand- und Rauchausbreitung bei der Kastendoppelfassade

Vertikale und horizontale Stahlabschottungen



Bild 9: Brandversuche mit einer Kastendoppelfassade (vertikale und horizontale Stahlabschottungen) - Abstand zwischen Innen- und Außenfassade: 0,6 m, Brandlast: 1 und 2 Brandlastpaletten mit 166 kg bzw. 332 kg.

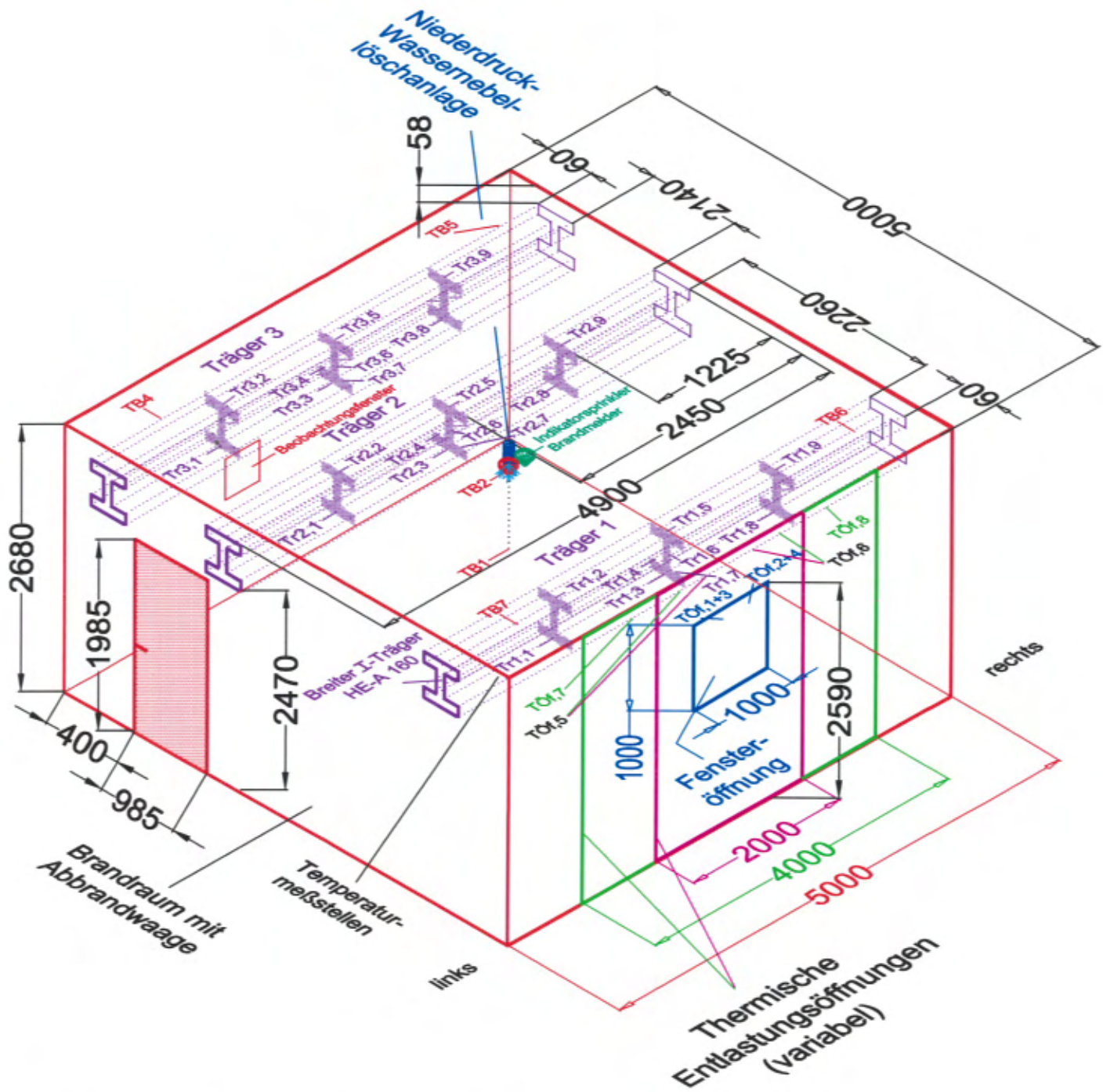


Bild 10: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus



Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuch 1: Versuchsaufbau



Brandraum mit Stahlträger 1, 2 und Fensteröffnung



Brandraum mit Stahlträger 3 und Brandraumtür



Brandlast: ca. 336 kg (Holzkrippen: ca. 314 kg, Linoleum: ca. 19 kg, Nadelfilzteppichboden: ca. 2 kg, Heptan: 1 l)



Temperaturmeßstelle am Stahlträger



Messung der Durchbiegung von Stahlträger 1



Bild 11: Versuch 1 - ohne thermische Entlastungsöffnung und ohne Niederdruck-Wassernbellöschanlage - Versuchsaufbau



Versuch 1: Versuchsablauf



1 min 8 s (nach Zündung)
im Brandraum



10 min 42 s (nach Zündung)
im Brandraum



10 min 42 s (nach Zündung)
an der Fensteröffnung



12 min 42 s (nach Zündung)
im Brandraum



12 min 58 s (nach Zündung)
im Brandraum
Flashover



12 min 58 s (nach Zündung)
an der Fensteröffnung
Flashover

Bild 12: Versuch 1 - ohne thermische Entlastungsöffnung und ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Versuchsablauf



Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuch 1: Versuchsablauf



13 min 58 s (nach Zündung)
an der Fensteröffnung



21 min 1 s (nach Zündung)
an der Fensteröffnung
Löschbeginn der Feuerwehr
mit Fog Nail



21 min 32 s (nach Zündung)
an der Fensteröffnung
Löschzeit mit Fog Nail: 31 s



21 min 50 s (nach Zündung) an der
Fensteröffnung - Öffnen der Brand-
raumtür und Nachlöscharbeiten der
Feuerwehr mit Strahlrohr

Bild 13.: Versuch 1 - ohne thermische Entlastungsöffnung und ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Versuchsablauf



Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuch 1: Bleibende Durchbiegungen der Stahlträger



Stahlträger 1
(Fensterbereich)
Durchbiegung: ca. 10 mm



Stahlträger 2
(ca. Mitte Brandraum)
Durchbiegung: ca. 50 mm



Stahlträger 3
(Hinterer Bereich)
Durchbiegung: ca. 4 mm

Bild 14: Versuch 1 - ohne thermische Entlastungsöffnung und ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Bleibende Durchbiegungen der Stahlträger

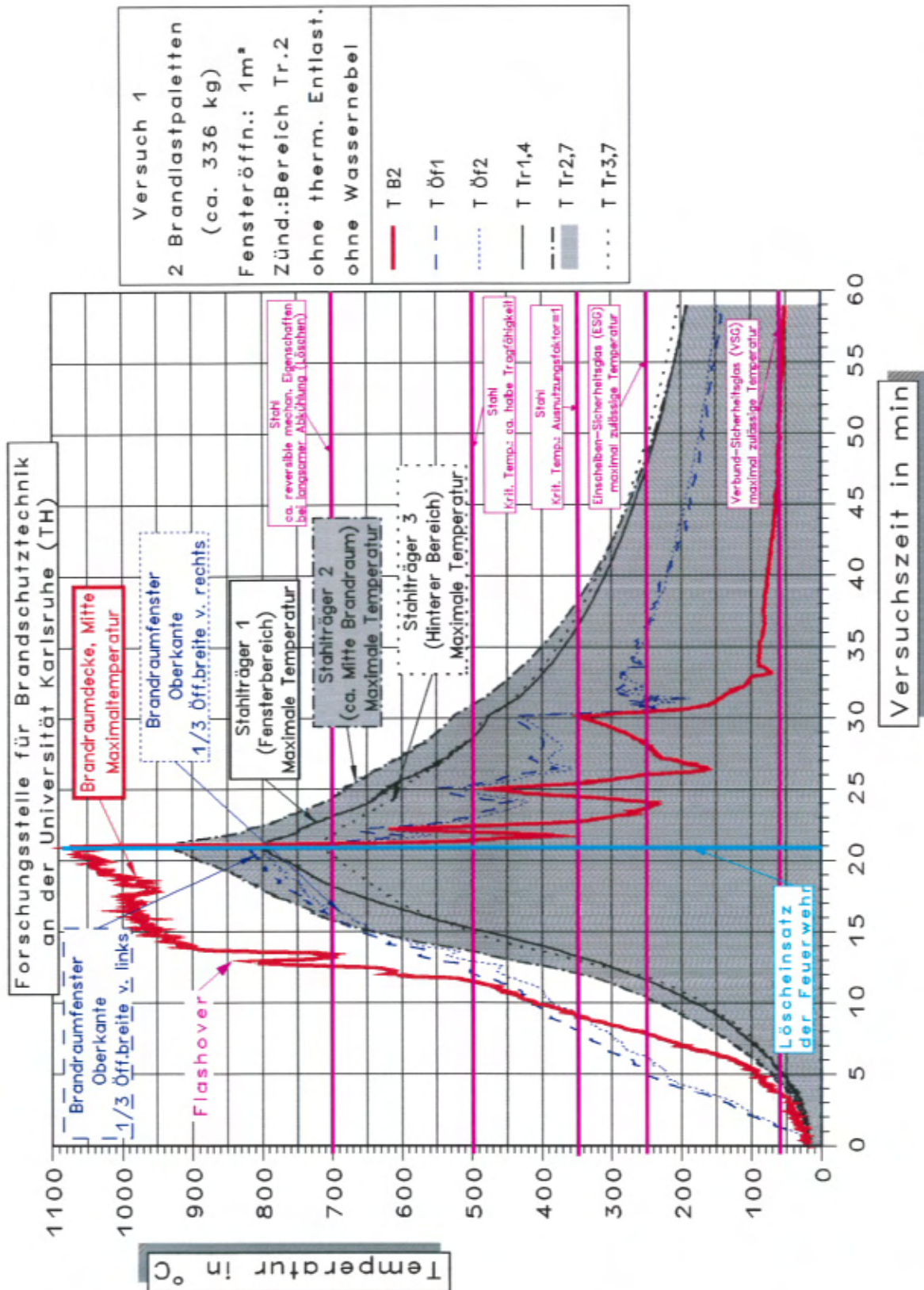


Bild 15: Brandversuch ohne thermische Entlastungsöffnung und ohne ortsfeste Niederdruck-Wassernebellöschanlage - ausgewählte Temperaturverläufe

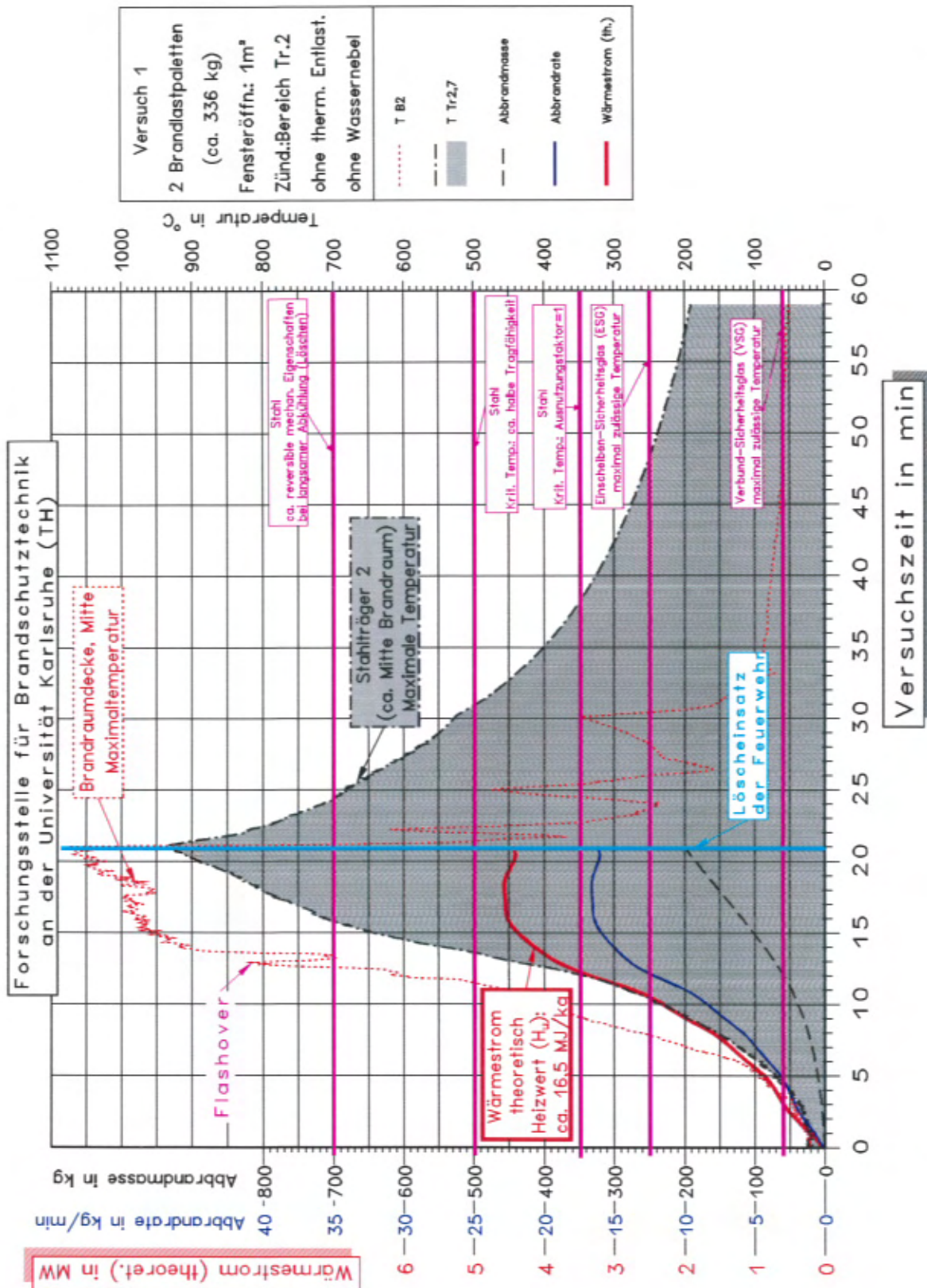


Bild 16: Brandversuch ohne thermische Entlastungsöffnung und ohne ortsfeste Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Abbrandmasse, Abbrandrate, theoretische Wärmefreisetzung sowie ausgewählte Temperaturverläufe



Forschungsinstitut für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuch 3: Versuchsaufbau



Brandraum mit Stahlträger 1, 2, Fensteröffnung und thermischer Entlastungsöffnung (10 m²)



Brandraum mit Stahlträger 3 und Brandraumtür



Brandlast: ca. 336 kg
(Holzkrippen: ca. 314 kg, Lino-
leum: ca. 19 kg, Nadelholzteppich-
boden: ca. 2 kg, Heptan: 1 l)



Temperaturmeßstelle
am Stahlträger

Bild 17: **Versuch 3** - mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m²), ohne Niederdruck-Wassernbellöschanlage - Versuchsaufbau



Forschungsinstitut für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Versuch 3: Versuchsablauf



0 s (Zündung)
im Brandraum



27 s Brandmelder
im Brandraum



1 min 37 s Indikatorsprinkler
im Brandraum



0 s (Zündung)
Fassadenbereich



27 s Brandmelder
Fassadenbereich



1 min 37 s Indikatorsprinkler
Fassadenbereich

Bild 18: Versuch 3 - mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Versuchsablauf

Versuch 3: Versuchsablauf



3 min 21 s Öffnen der Wand
im Brandraum



3 min 23 s Öffnen der Wand
im Brandraum



3 min 27 s Öffnen der Wand
im Brandraum



3 min 21 s Öffnen der Wand
Fassadenbereich



3 min 23 s Öffnen der Wand
Fassadenbereich

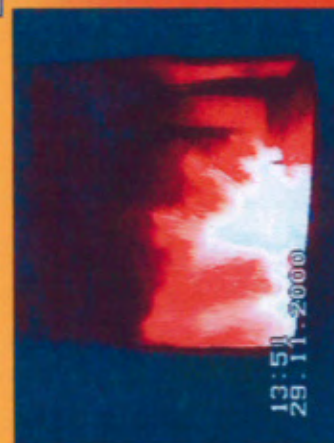


3 min 27 s Öffnen der Wand
Fassadenbereich

Bild 19: Versuch 3 - mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Versuchsablauf



Versuch 3: Versuchsablauf



12 min 24 s
im Brandraum



18 min 9 s 350°C in Träger 2
im Brandraum



23 min 48 s 500°C in Träger 2
im Brandraum



12 min 24 s
Fassadenbereich



18 min 9 s 350°C in Träger 2
Fassadenbereich



23 min 48 s 500°C in Träger 2
Fassadenbereich

Bild 20: **Versuch 3** - mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m²), ohne Niederdruck- Wassernebellöschanlage - Versuchsablauf



Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Versuch 3: Versuchsablauf



14:05
29.11.2000

26 min 15 s 523°C in Träger 2
im Brandraum



14:05
29.11.2000

26 min 15 s 523°C in Träger 2
Fassadenbereich

Bild 21: **Versuch 3** - mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m²), ohne Niederdruck- Wassernebellöschanlage - Versuchsablauf

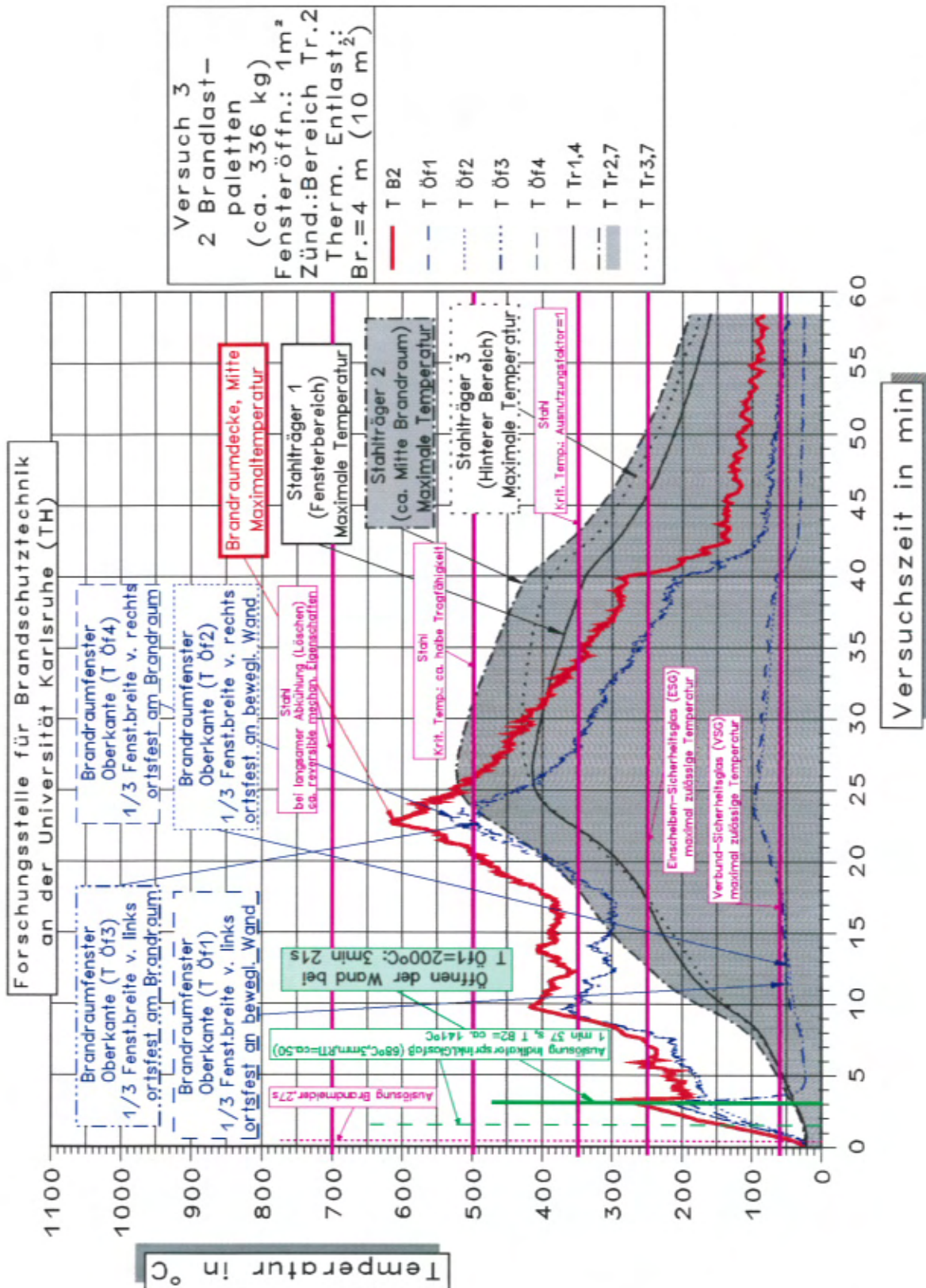


Bild 22: Brandversuch mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage, Brandlast: 336 kg - ausgewählte Temperaturverläufe.

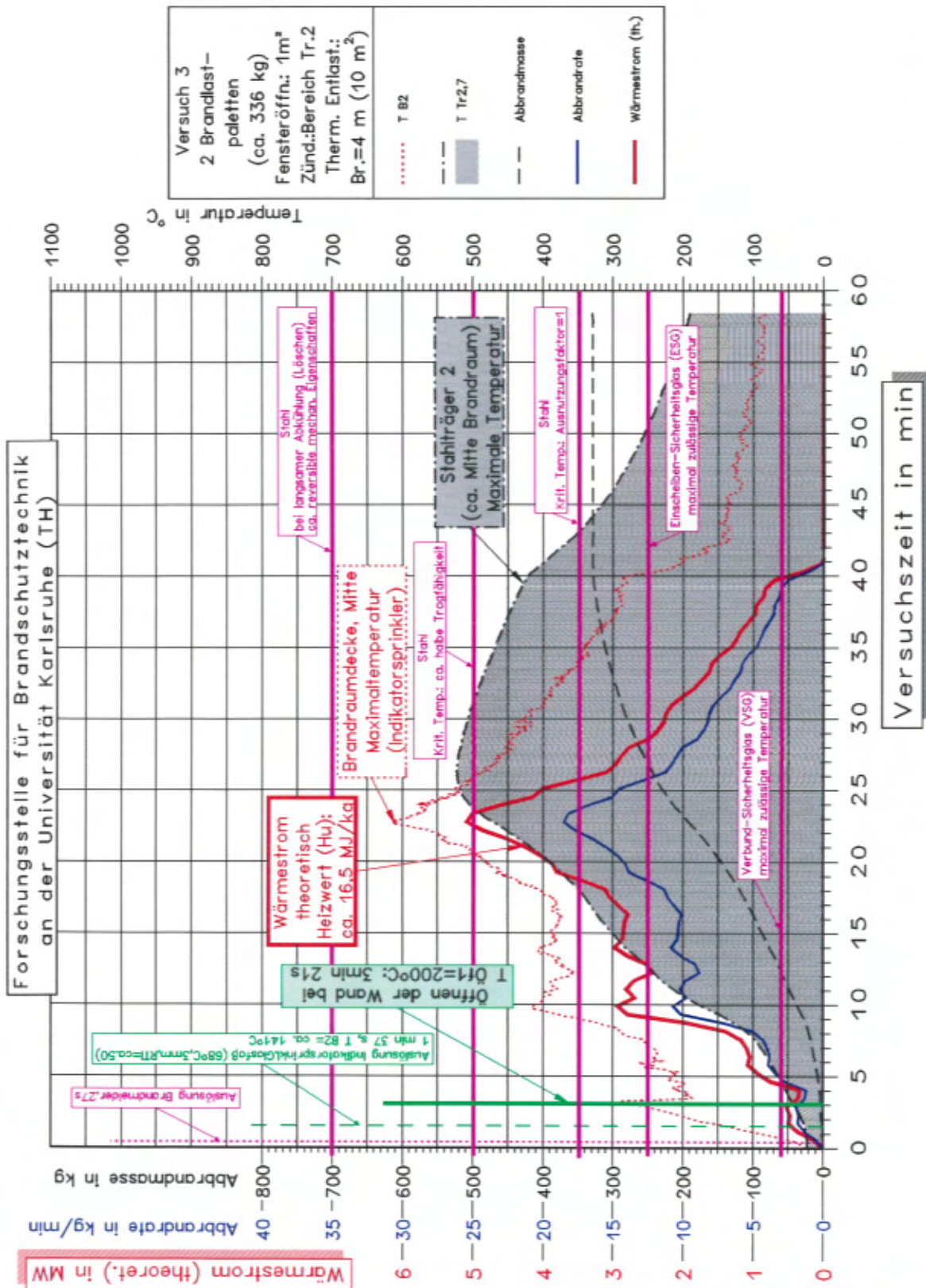


Bild 23: Brandversuch mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage, Brandlast: 336 kg - Abbrandmasse, Abbrandrate, theoretische Wärmefreisetzung sowie ausgewählte Temperaturverläufe.

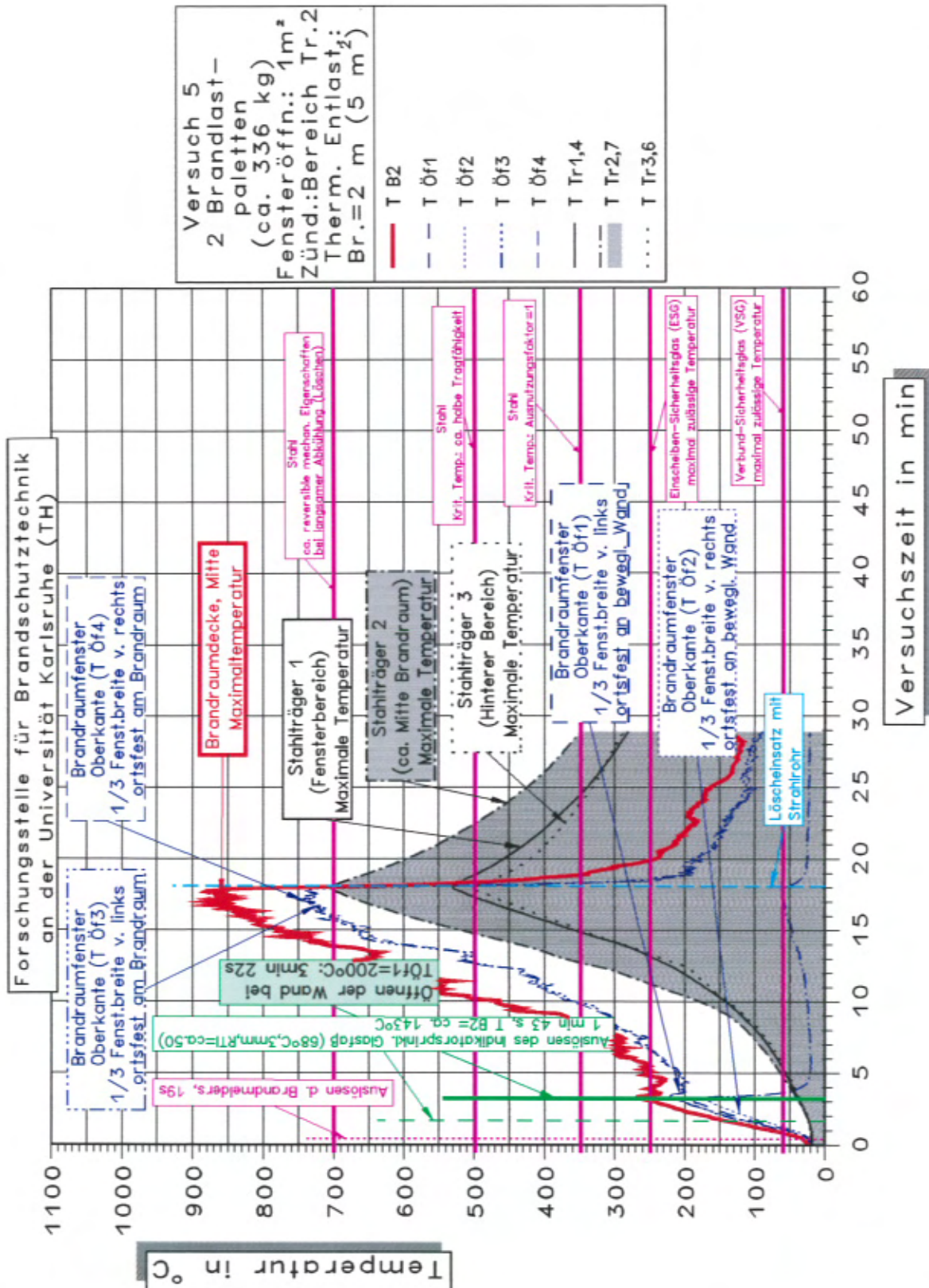


Bild 24: Brandversuch mit thermischer Entlastungsöffnung (5 m²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage, Brandlast: 336 kg - ausgewählte Temperaturverläufe

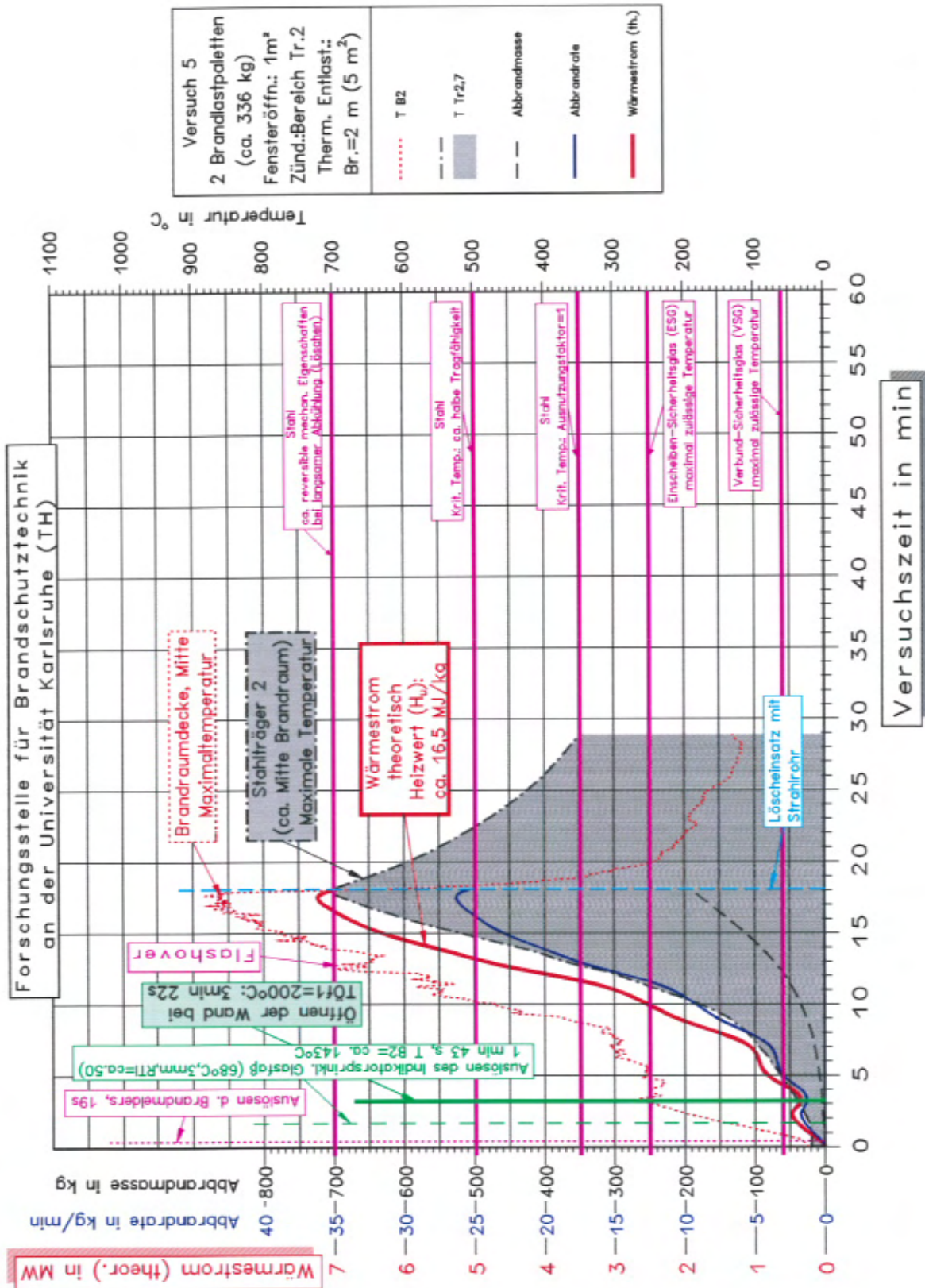


Bild 25: Brandversuch mit thermischer Entlastungsöffnung (5 m²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage, Brandlast: 336 kg - Abbrandmasse, Abbrandrate, theoretische Wärmefreisetzung, sowie ausgewählte Temperaturverläufe.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik **an der Universität Karlsruhe (TH)**

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

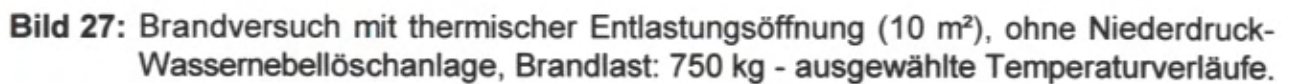
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuch 6: Wohnzimmereinrichtung vor und nach dem Versuch **(Feuerwehreinsatz)**



Bild 26: Versuch 6 - mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage - Wohnzimmereinrichtung im Brandraum vor und nach dem Versuch (Feuerwehreinsatz)



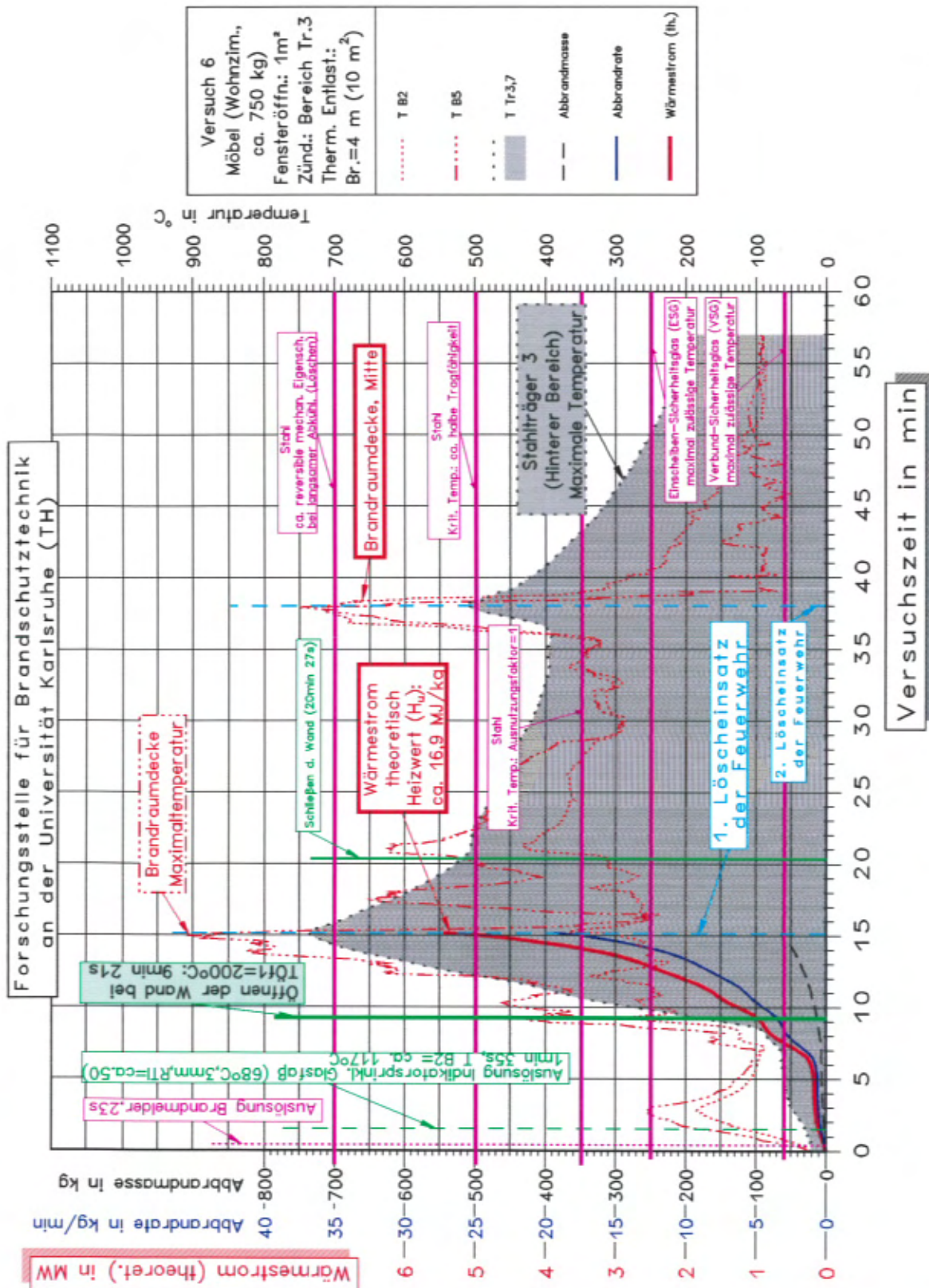


Bild 28: Brandversuch mit thermischer Entlastungsöffnung (10 m²), ohne Niederdruck-Wassernebellöschanlage, Brandlast: 750 kg - Abbrandmasse, Abbrandrate, theoretische Wärmefreisetzung sowie ausgewählte Temperaturverläufe.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuch 2: Versuchsaufbau



Brandraum mit Stahlträger 1, 2, Fensteröffnung und Niederdruck-Wassernebelprühkopf
Brandlast: ca. 100 kg (reduzierte Brandlast-palette: Holzkruppen: ca. 88 kg, Linoleum: ca. 10,5 kg, Nadelstichteppichboden: ca. 1,1 kg, Heptan: 0,5 l)



Brandraum mit Stahlträger 3 und Brandraumtür



Niederdruck-Wassernebel-sprühkopf und Indikator-sprinkler mit Auslöse-Manometer



Temperaturmeßstelle am Stahlträger

Bild 29: Versuch 2 - mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage, ohne thermische Entlastungsöffnung - Versuchsaufbau



Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Bild 30: **Versuch 2** - mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage, ohne thermische Entlastungsöffnung - Versuchsablauf



Forschungsinstitut für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuch 2: Versuchsablauf



7 min 27 s (nach Zündung)
im **Brandraum**
Löschzeit: 1 min



8 min (nach Zündung)
an der **Fensteröffnung**
- Löschzeit: 1 min 33 s



7 min 27 s (nach Zündung)
an der **Fensteröffnung**
- Löschzeit: 1 min



9 min (nach Zündung)
an der **Fensteröffnung**
- Löschzeit: 2 min 33 s



9 min 53 s (nach Zündung)
an der **Fensteröffnung**
- Löschzeit: 3 min 26 s
Wassernebellöschanlage: aus

Bild 31: **Versuch 2** - mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage, ohne thermische Entlastungsöffnung - Versuchsablauf



Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuch 2: Brandschäden und Gefährdungen



- ☞ Zündkripenhölzer an der Oberfläche leicht angebrannt
- ☞ Keine Entzündung benachbarter Holzkrippen
- ☞ Geringe Brandrauchentwicklung im Fenster- bzw. Fassadenbereich
- ☞ Keine Gefährdung der Stahlträger bzw. Stahlkonstruktion
- ☞ Kein Feuerüberschlag in darüberliegende Geschosse

Bild 32: **Versuch 2** - mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage, ohne thermische Entlastungsöffnung - Brandschäden und Gefährdungen

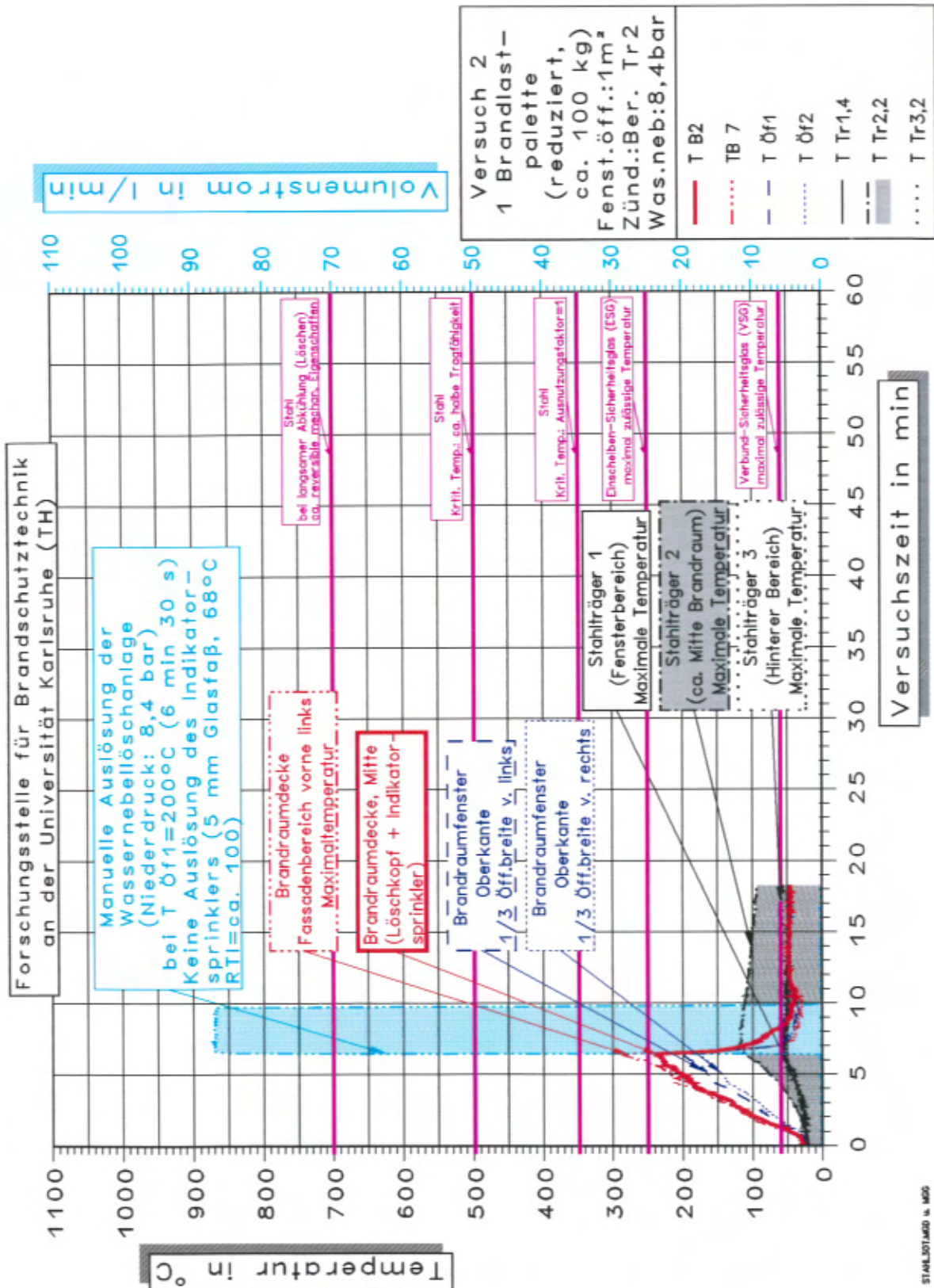


Bild 33: Brand- und Löschversuch mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage (Betriebsdruck: 8,4 bar), ohne thermische Entlastungsöffnung, Brandlast: 100 kg - ausgewählte Temperaturverläufe und Löschwasservolumenstrom.

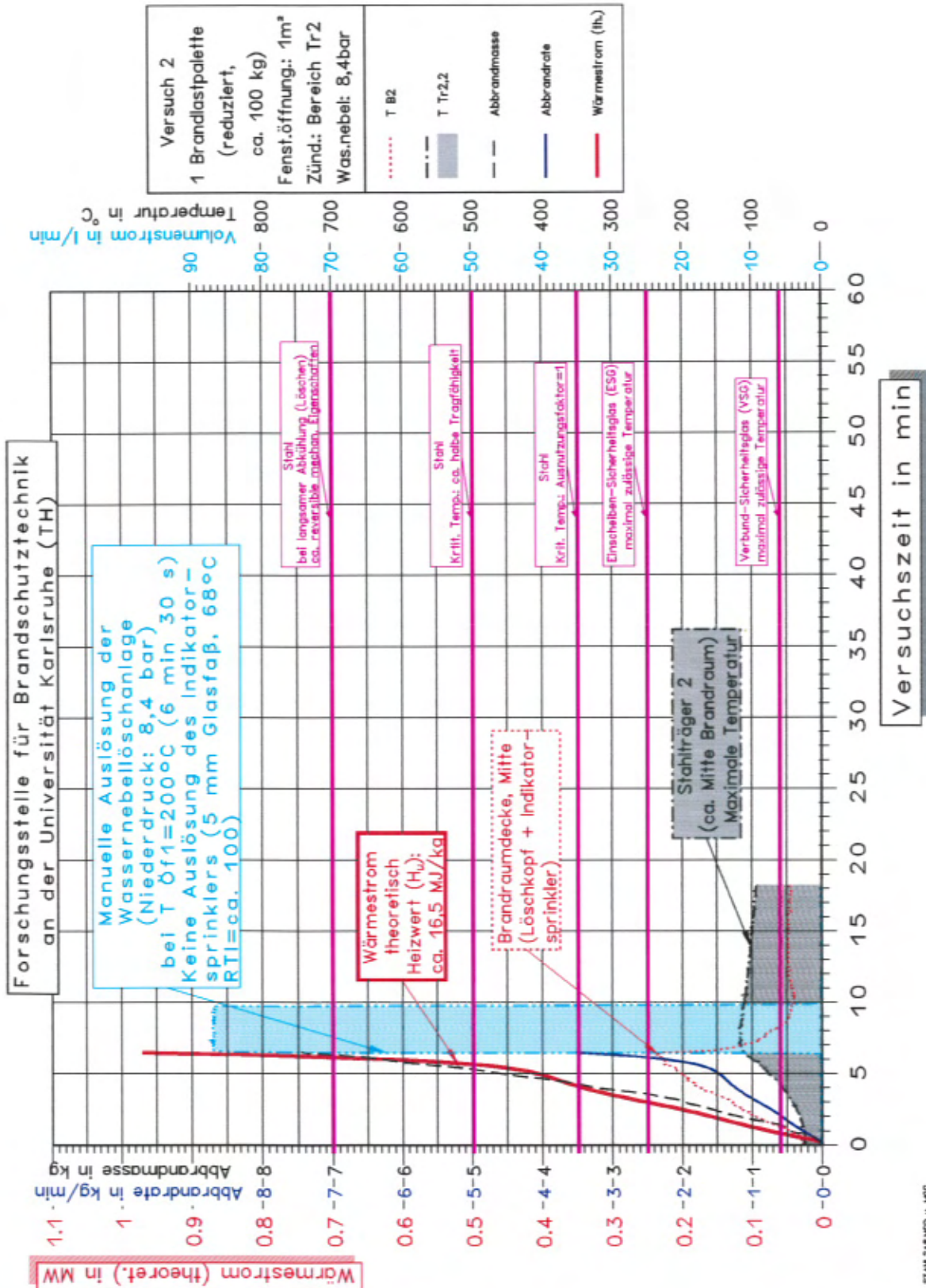


Bild 34: Brand- und Löschversuch mit Niederdruck-Wassernebelölschanlage (Betriebsdruck: 8,4 bar), ohne thermische Entlastungsöffnung, Brandlast: 100 kg - Abbrandmasse, Abbrandrate, theoretische Wärmefreisetzung, ausgewählte Temperaturverläufe und Löschwasservolumenstrom.

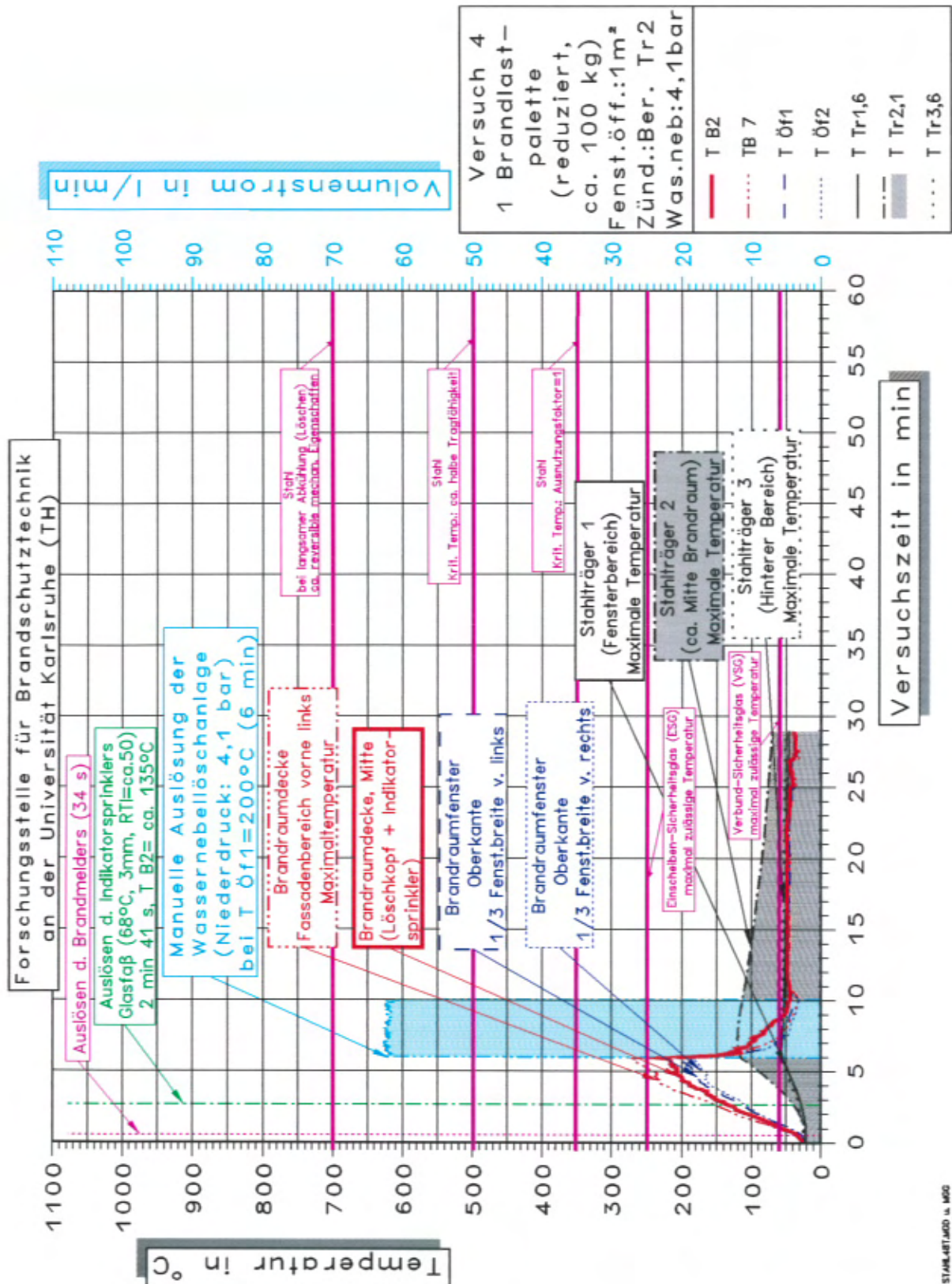


Bild 35: Brand- und Löschversuch mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage (Betriebsdruck: 4,1 bar), ohne thermische Entlastungsöffnung, Brandlast: 100 kg - ausgewählte Temperaturverläufe und Löschwasservolumenstrom.

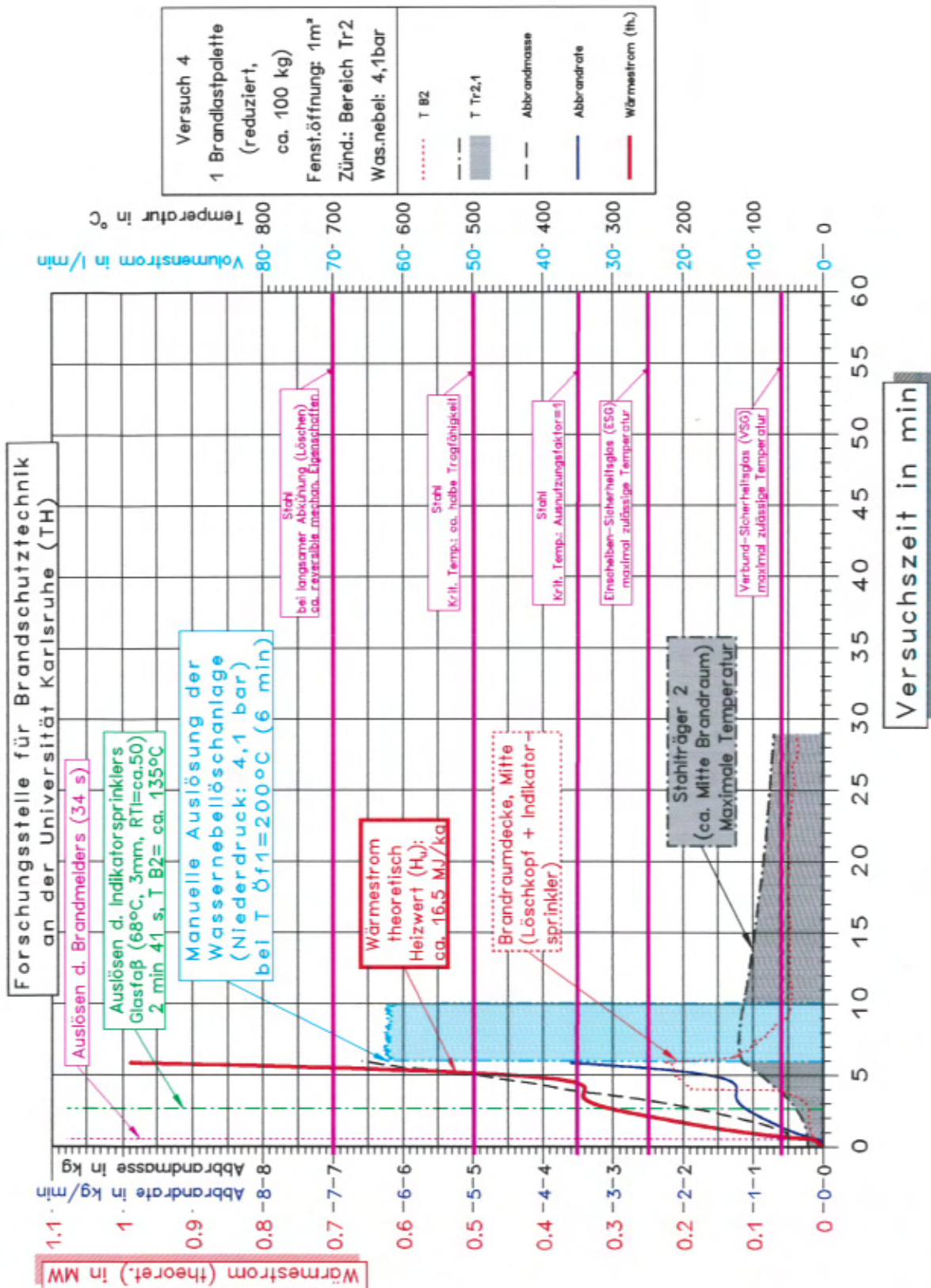


Bild 36: Brand- und Löschversuch mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage (Betriebsdruck: 4,1 bar), ohne thermische Entlastungsöffnung, Brandlast: 100 kg - Abbrandmasse, Abbrandrate, theoretische Wärmefreisetzung, ausgewählte Temperaturverläufe und Löschwasservolumenstrom.