

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Flashover/Backdraft - Ursachen, Auswirkungen,
mögliche Gegenmaßnahmen

130

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER LÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN,
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 130

Flashover / Backdraft
Ursachen, Auswirkungen, mögliche Gegenmaßnahmen

von

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe
(TH)

Karlsruhe

Februar 2003

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| BERICHTSKENNBLETT | 1 |
| 1. EINLEITUNG | 2 |
| 2. AUSWERTUNG DER IN- UND AUSLÄNDISCHEN UNTERSUCHUNGEN | 5 |
| 2.1 Backdraft..... | 5 |
| 2.2 Rollover und Flashover..... | 21 |
| 2.3 Untersuchung des Phänomens Flashover bei Realbrandversuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik..... | 26 |
| 2.4 Druckbehälterzerknall und BLEVE..... | 38 |
| 2.5 Weitere Brandphänomene..... | 50 |
| 2.6 Nennung weiterer spezieller Risiken..... | 51 |
| 3. ZUSAMMENFASSUNG | 52 |
| 4. LITERATURVERZEICHNIS | 62 |
| 5. TABELLEN | 66 |
| 6. BILDER | 73 |

BERICHTSKENNBLATT

| | | | |
|---|---|--|------------------------------|
| Nummer des Berichtes: 130 | Titel des Berichtes: Flashover / Backdraft Ursachen, Auswirkungen, mögliche Gegenmaßnahmen | ISSN: 0170-0060 | |
| Autor: Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann | | Durchführende Institution: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Hertzstraße 16, D-76187 Karlsruhe | |
| Nummer des Auftrages: 185 (3/2002) | | Auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung | |
| Abschlußdatum: Februar 2003 | | | |
| Seitenzahl: 109 Hiervon 30 in Farbe *) | Bilder: 36 | Tabellen: 4 | Literaturverweise: 58 |
| Kurzfassung: | | | |
| <p>Bei einem Brand in einem Raum ist ohne schnelle Alarmierung, ohne frühzeitige Löschmaßnahmen bzw. schnellen Feuerwehreinsatz mit erheblichen Personen- und Sachschäden durch die schnelle Brand- aber vor allem Rauchausbreitung zu rechnen. Besonders schlafende Personen sind durch die entstehenden toxischen Brandgase sowie Sauerstoffmangel beträchtlich gefährdet. Die unmittelbarste Gefahr für Menschen und Tiere bei einem Brand stellt hierbei zunächst der Brandrauch infolge Intoxikation, Reizwirkung und Sichtbehinderung innerhalb von Rettungswegen sowohl für die Personen, die im Brandfall das Gebäude verlassen müssen als auch für die Rettungsmannschaften eine große Gefahr dar.</p> <p>Die Einsatzleitung der Feuerwehr hat bei einem Brandereignis in kurzer Zeit zu entscheiden, welche taktischen Maßnahmen in welcher zeitlichen Abfolge diese bei der Brandbekämpfung zu treffen sind.</p> <p>Die größte Gefahr besteht für die Feuerwehreinsatzkräfte selbst hauptsächlich durch die Brandphänomene Flashover, Backdraft, Rollover, Druckbehälterzerknall und BLEVE. Besonders die ersten beiden Begriffe werden in der Praxis meist unter dem Oberbegriff Flashover zusammengefaßt, wobei es sich hierbei um völlig verschiedene Dinge mit unterschiedlichen Ursachen, Auswirkungen und den erforderlichen Gegenmaßnahmen handelt.</p> <p>Die vorliegende Arbeit versucht, anhand der Bewertung in- und ausländischer Literatur und der Auswertung von an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Realbrandversuchen die unterschiedlichen Brandphänomene darzustellen und mögliche Gegenmaßnahmen aufzuzeigen.</p> | | | |
| Schlagwörter: Flashover, Backdraft, Rollover, BLEVE, Druckbehälterzerknall, Fettexplosion, Brandgase, Feuerwehreinsatz | | | |

*) Farbseiten auf CD-ROM gegen Kostenerstattung (5,00€) erhältlich.

1. EINLEITUNG

Bei einem Brand in einem Raum ist ohne schnelle Alarmierung, ohne frühzeitige Löschmaßnahmen bzw. schnellen Feuerwehreinsatz mit erheblichen Personen- und Sachschäden durch die schnelle Brand- aber vor allem Rauchausbreitung zu rechnen. Besonders schlafende Personen sind durch die entstehenden toxischen Brandgase sowie Sauerstoffmangel beträchtlich gefährdet.

Personen werden im Brandraum in den meisten Fällen zunächst in erster Linie durch die aus der Inneneinrichtung der Räume resultierende Brandlast und erst im weiteren Brandverlauf durch die Brandlast, welche die Gebäudekonstruktion beinhaltet, gefährdet.

Toxische Brandgase entstehen hierbei bereits bei einem Schmelbrand in der frühen Brandentwicklungsphase.

Der durch einen Brand entstehende Rauch breitet sich im ganzen Gebäude aus, wenn keine besonderen Schutzmaßnahmen getroffen werden. Dieser Brandrauch stellt zunächst die größte Gefahr für Personen dar. Anteilig werden die meisten Todesfälle bei Gebäudebränden durch die Einwirkung des Brandrauches hervorgerufen. Hierbei sollte die Gefahr durch Verbrennungen nicht unterschätzt werden. Zunehmende Fortschritte in der medizinischen Behandlung von Verbrennungen führen jedoch zu einer weiteren Verschiebung zu Ungunsten der Raucheinwirkung und deren Folgen.

Brandrauch wirkt in mehrfacher Weise auf den Menschen ein. Neben der direkten Gesundheitsgefahr durch toxische Gase, z. B. Kohlenmonoxid oder die Atemwege reizende Säureanteile und Wärmeeinwirkung ergeben sich durch die Sichtbehinderung so große psychologische und physiologische Auswirkungen, daß Rettungswege nicht mehr benutzt werden bzw. benutzt werden können.

In **Tabelle 1** ist eine Auswahl von für den Menschen kritischen Brandgas- und Sauerstoffkonzentrationen wiedergegeben (siehe **Mommsen [1990]**, **Bogenberger, Hommel [1999]**).

Wie Untersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (siehe **Kunkelmann**

[1998]) gezeigt haben, können tödliche Sauerstoff- und Brandgaskonzentrationen bei Bränden z.B. in Wohnräumen bereits unter 3 Minuten auftreten.

Durch körperliche Anstrengungen mit damit verbundener erhöhter Atemfrequenz und Streß wird hierbei das Risiko von gesundheitlichen Schäden durch z.B. Kohlenmonoxid noch deutlich erhöht (siehe **Cagliostro [1980]**).

Die Gefahren durch die Brandgasbestandteile Ruß, aromatische Kohlenwasserstoffe und sonstige Pyrolyseprodukte für den Menschen sind zusätzlich zu berücksichtigen. Wie diese Brandgasbestandteile sowie die Sauerstoff-, Kohlendioxid und Kohlenmonoxidkonzentration in ihrer Zusammenwirkung den menschlichen bzw. tierischen Organismus schädigen, ist bis jetzt unzureichend geklärt.

Basmer und Zwick [2002] haben anhand der qualitativen und quantitativen Brandgasanalyse von Schwel- und Flammenbränden im Modell- und Realmaßstab an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik das Gefährdungspotential durch anorganische Brandgasbestandteile (z.B. Kohlenmonoxid, Chlorwasserstoff, Cyanwasserstoff, Ammoniak, Schwefeldioxid, Nitrose Gase, Kohlenoxidsulfid) und organische Brandgasbestandteile (z.B. Formaldehyd, Acrolein, Phosgen, Benzol, Phenol) aufgezeigt. Als Brandlasten wurden PVC, Wolle, PC-Platinen und Holz sowie eine Wohnzimmereinrichtung untersucht.

Es ist festzustellen, daß gewisse toxische Gase im Brandrauch bei kurzen Einwirkungszeiten nicht grundsätzlich nachhaltige Gesundheitsschäden verursachen. Durch eingeschränkte Sichtverhältnisse wird jedoch die Zeit für das Verlassen der mit den toxischen Gasen angefüllten Räume vergrößert bzw. die Zeit bis zum Auffinden von an der Flucht gehinderten Personen durch Retter verlängert, wodurch die Einwirkungsdauer so groß werden kann, daß dadurch Gesundheitsschäden auftreten. Die Sichtbehinderung stellt auch eine Gefahr für die Personen dar, die mit Atemschutzgeräten ausgerüstet sind. Es handelt sich hierbei z.B. um Feuerwehreinsatzkräfte, die zur Rettung von Personen, wie z.B. Kranken und Verletzten, sowie zur Brandbekämpfung in das Gebäude eindringen müssen. Weitere Informationen zur Beurteilung der Sichtverhältnisse finden sich in den Untersuchungen von **John [1983, 1988, 2000]** und **Kunkelmann [2001/2, 2002]**.

Die Sicht innerhalb von Rettungswegen stellt daher sowohl für die Personen, die im Brandfall

das Gebäude verlassen müssen als auch für die Rettungsmannschaften eine große Gefahr dar.

Besonderes Augenmerk ist daher bei einem Brand nicht nur der Rettung von Menschen aus dem Gebäude, sondern auch der Gefährdung der in das Gebäude eindringenden Rettungskräfte zu schenken.

Die Einsatzleitung der Feuerwehr hat in kurzer Zeit zu entscheiden, welche taktischen Maßnahmen in welcher zeitlichen Abfolge bei der Brandbekämpfung zu treffen sind.

Hierbei ist zunächst zu beurteilen:

- welche Personen und Tiere halten sich im Gebäude auf (z.B. Gehbehinderte, Kinder etc.) und sind diese gefährdet
- sind Rettungswege und deren Ausgänge in ihrer Funktion gefährdet
- was brennt (z.B. besondere Gefährdung durch Druckbehälter, Chemikalien und Lösungsmittel, Leichtmetalle und deren Legierungen)
- in welchem Stadium befindet sich der Brand, wie groß ist die Brandrauchentwicklung
=> wo besteht die größte Gefahr und muß zuerst bekämpft werden
- welche Sachwerte sind besonders zu schützen
- wohin kann sich der Brand ausbreiten und was könnte dadurch gefährdet werden, z.B. Nachbargebäude

Als Folge der Abschätzung und Bewertung der Gefährdungssituation ist bezogen auf die Brandbekämpfung zu entscheiden, ob ein Innen- oder Außenangriff gestartet werden soll.

Besondere Gefährdungen bei der Brandbekämpfung ergeben sich durch Ereignisse, die durch die Begriffe Flashover, Backdraft und BLEVE gekennzeichnet sind. Besonders die ersten beiden Begriffe werden in der Praxis meist unter dem Oberbegriff Flashover zusammengefaßt, wobei es sich hierbei um völlig verschiedene Dinge mit völlig unterschiedlichen Ursachen, Auswirkungen und den erforderliche Gegenmaßnahmen handelt.

Nachfolgend wird auf diese Problematik näher eingegangen.

2. AUSWERTUNG DER IN- UND AUSLÄNDISCHEN UNTERSUCHUNGEN

2.1 Backdraft

Wieder et al. [1992] stellen in ihrem Lehrbuch für Feuerwehreinsatzkräfte den Backdraft in Form einer Bildskizze dar (siehe **Bild 2.1**).

Nach **Chitty [1996]** entsteht ein Backdraft, wenn Luft in einen ungenügend belüfteten Raum einströmt und sich mit den unverbrannten Pyrolyseprodukten eines Schwelbrandes vermischt. Jede Zündquelle, wie z.B. ein noch glühendes Stück Holz kann zur Entzündung mit einer damit gekoppelten Verpuffung führen. Durch die bei der Verbrennung entstehende Wärme treten brennbare Gase durch die Öffnung aus, durch die ursprünglich die Luft einströmte und strömen dabei in angrenzende Bereiche. Der Autor berichtet weiter darüber, daß über das Phänomen Flashover zahlreiche Untersuchungen vorliegen, die Untersuchungen über Backdraft sind dagegen spärlich.

Für einen Feuerwehrmann ist es für den notwendigen Eigenschutz wichtig zu erkennen, welche Kennzeichen zu einem Backdraft führen können:

- Raum mit wenigen Öffnungen in Verbindung mit einem Brand, der bereits für einige Zeit anhält
- Ölige Ablagerungen an Fenstern
- Pulsierender Rauch aus Öffnungen, wie z.B. Leckagen von Türen und Fenstern
- Blaue Flammen in der Heißgasschicht

Zusätzlich kann die Farbe des Rauches auf einen unterventilierten Brand hinweisen, jedoch ist dies aufgrund von für eine Beurteilung nicht definierter Lichtverhältnisse und mit Unkenntnis der Zusammensetzung der Brandlast evtl. schwer zu bestimmen. Ein weiterer Indikator kann die Bewegung von Rauch sein, wenn eine Tür geöffnet wird. Eine schnelle Einströmung im unteren Bereich und schnelle Ausströmung im oberen Bereich kann auf den Mischungsprozess hinweisen, der dem Backdraft vorausgeht, falls zu diesem Zeitpunkt eine Zündquelle vorhanden ist. Dies muß jedoch auch im Zusammenhang mit jeder anderen Belüftung des Raumes gesehen werden.

„Brausende“ Geräusche, über die manchmal berichtet wird, sind ebenfalls ein Hinweis auf einen Backdraft. In diesem Stadium hat allerdings der Feuerwehrmann noch wenig Einfluß, darauf den Backdraft zu verhindern.

Es ist notwendig, daß die Feuerwehreinsatzkräfte eingehend über die mögliche Brandentwicklung bei guter und schlechter Belüftung des Raumes geschult werden, so daß sie Vorbedingungen für einen Flashover und Backdraft erkennen können. Die Entscheidung für den effektiven und sicheren Einsatz von Belüftungsmaßnahmen sowie für indirekten oder direkten Löschwassereinsatz wird hierdurch vorbereitet.

Drysdale [1996] gibt folgende Erläuterung des Begriffes "Backdraft". Der Brand entwickelt sich hierbei zunächst „normal“ bis zu einem Stadium, das für die Fortsetzung der Verbrennung mehr Luftsauerstoff erfordert als z.B. durch Nachströmung zur Verfügung steht. Der Luftsauerstoff reicht hierbei nicht aus, die Bedingungen für einen Flashover zu schaffen. Die geringer werdende Wärmefreisetzung führt zu einer Abkühlung im Raum. Nachströmen von Luft führt zu einem Pulsieren des Brandes zwischen diesen beiden Zuständen bis unter Umständen sogar der Brandstoff aufgezehrt ist. Bei sehr geringer Ventilation kann jedoch das Feuer selbst erlöschen. Diese Art des Brandablaufs ist äußerst gefährlich, da sich aufgrund der unvollständigen Verbrennung unverbrannte und auch teilweise verbrannte Brennstoffdämpfe im Raum ansammeln können. Durch plötzlichen Luftzutritt z.B. beim Zerstören eines Fensters oder durch Öffnen einer Tür können diese Dämpfe schlagartig gezündet werden. Durch die damit verbundene Expansion werden große Mengen unverbrannter Brennstoffdämpfe verteilt und führen zu einer sehr schnellen Flammenausbreitung z.B. in Form eines Feuerballs. Durch die große Wärmestrahlung, die hierbei entsteht können in kurzer Zeit andere Brandstoffe entzündet werden. Der Backdraft kann daher auch als einer der Mechanismen angesehen werden, die im weiteren Brandverlauf zunächst zu einem Flashover und dann zu einem Vollbrand führen.

Der Beitrag von **Südmersen [2000]** (siehe Zusammenstellung in **Tabelle 2**) gibt Auskunft über die Ursachen für die Entstehung eines Backdraft (Rauchexplosion) und die unterschiedlichen Erscheinungsformen, wie z.B. die verlagerte Rauchexplosion.

Bukowski [1995] berichtet über einen Feuerwehreinsatz, bei dem im März 1994 drei Feuerwehrmänner beim Löschen eines Brandes in einem dreigeschossigen Wohngebäude star-

ben. Beim Eintreffen der Feuerwehreinsatzkräfte war nur aus dem Schornstein austretender Rauch zu erkennen, jedoch sonst keine Feuererscheinungen. Zu Beginn des Einsatzes waren Löschtrupps im Treppenhaus vor den Wohnungstüren im ersten und zweiten Geschöß postiert, das Treppenhaus wurde über das Dachfenster vom Maschinisten belüftet. Bei Öffnung der Erdgeschoßtür entstand ein Backdraft, der den Löschtrupp im ersten Geschöß tötete. Das Öffnen der Tür bewirkte hierbei zunächst einen kurzfristigen Luftzug in die Wohnung. Daraufhin strömten warme aber nicht heiße Brandgase aus der Wohnung gefolgt von einer großen Stichflamme aus dem oberen Bereich der Tür und die Treppe hinauf. Der Löschtrupp im Erdgeschoß konnte sich durch Abwenden von den Flammen retten. Die weiteren Flammen nach erfolgten Backdraft füllten den gesamten Treppenraum aus, drangen aus dem Dachfenster und überschritten beträchtlich die Gebäudehöhe. Die Flammenerscheinung dauerte ca. 6,5 Minuten an. Das Brandgeschehen wurde hierbei von einem Amateurfilmer aufgezeichnet. Die Schäden in der Brandwohnung waren auf das Wohnzimmer, die Küche und den Flur begrenzt. Geschlossene Türen verhinderten die Brandausbreitung in das Schlafzimmer, das Bad, die Toilette und das Büro. Die anderen Wohnungen waren von der Brandausbreitung nicht betroffen. Die tragende Konstruktion des Gebäudes wurde ebenfalls nicht beschädigt. Das Drahtglas des Dachfensters schmolz allerdings und erstarrte später ähnlich der Form von Eiszapfen. Die Holztreppe wurden zum größten Teil zerstört. Als Brandursache wurde ein Kunststoffmüllbeutel auf einem Gasherd in der Küche ermittelt. Dieser setzte anschließend umher stehende Spirituosen in Brand bevor das Feuer auf den Holzfußboden und weitere brennbare Materialien im Raum übergriff. Der Besitzer der Wohnung bestätigte, daß sämtliche Türen und Fenster geschlossen waren. Aufgrund dieser Tatsache stand nur die zur Verbrennung notwendige Luft aus den nicht durch Türen verschlossenen Räumen zur Verfügung. Das Feuer brannte ca. 1 Stunde unter Luftmangel weiter. Hierdurch entstanden große Mengen noch nicht verbrannter Zersetzungsgase sowie große Mengen an Kohlendioxid und Kohlenmonoxid, bevor es durch Öffnen der Tür zu dem vorbeschriebenen Backdraft kam.

Mit Hilfe des Simulationsprogramms CFAST wurde der Vorfall rekonstruiert, um die Entstehungsbedingungen für eine derartig intensive, luftzugbedingte Flammenerscheinung herauszufinden. Die Wohnung wurde hierbei entsprechend den realen Abmessungen als 6,1 m * 14 m * 2,5 m großer Raum angenommen. Der Treppenraum wurde als Raum mit den Abmessungen 1,2 m * 3 m * 9,1 m modelliert, der über eine geschlossene Tür an die Wohnung angeschlossen ist. Für den Treppenraum wurde eine Dachbelüftungsöffnung von 0,84 m²

angenommen. Zu Beginn der Simulation wurde eine Wärmefreisetzungsrates von 25 kW entsprechend der Wärmefreisetzungsrates eines Kunststoffmüllbeutels als Anfangswert gesetzt. Anschließend wurde ein mittlerer t^2 -Anstieg gemäß der NFPA 72 (National Fire Code) angenommen. Diese Brandentwicklungsdynamik stellt sich nach Angaben des Autors als charakteristisch für die meisten Wohnungsbrände dar. Die maximale Wärmefreisetzung von 1 MW, die aufgrund des Berechnungsansatzes nach einer Zeitdauer von ca. 5 min zu erwarten wäre, wurde allerdings aufgrund des entstehenden Sauerstoffmangels nicht erreicht. Nach 5 Minuten ergaben sich 500 kW. Danach fiel die Wärmefreisetzungsrates rasch ab, nachdem der Sauerstoffgehalt unter 10 Vol. % gefallen war. Die Temperatur im Raum fiel hierbei von zunächst im Mittel 300°C auf 100°C. Die Kohlenmonoxid-Konzentration stieg auf einen Wert von ca. 3.000 ppm an und unverbrannte brennbare Zersetzungsgase sammelten sich im Raum. Nach 2.250 s (37,5 min) wurde die Öffnung der Tür simuliert. Warme Luft mit einer Temperatur von 100 °C strömte aus dem oberen Bereich der Türöffnung, gefolgt von einem Einströmen von Umgebungsluft im unteren Bereich der Tür. Hierdurch entstand spontan eine große Flamme im Türbereich da lokal eine Zündquelle angenommen wurde. Innerhalb von einigen Sekunden erhöhte sich der Spitzenwert der Wärmefreisetzung auf nahezu 5 MW und Temperaturen im Treppenraum von mehr als 1.200 °C. Diese hohe Temperatur führte zum Schmelzen des Glases im Dachfenster. Die angesammelten nichtverbrannten Zersetzungsgase reichten aus für die Flammenbildung von 7 Minuten im Bereich der Tür.

Dektar [1983] berichtet über ein Brandereignis mit 24 tödlich verletzten Personen als Folge eines Backdraft. Als Bewohner das schwelende Feuer eines durch Brandstiftung gelegten Brandes in einem alten 4-geschossigen Gebäude entdeckten und fliehen wollten, wurden sie von den Flammen des Backdraft überrollt, der infolge plötzlichen Sauerstoffzutritts wegen einer geöffneten Tür den Flur füllte und erlitten dabei zum Tode führende Verbrennungen. Bei einem Verbleib in ihren Zimmern wäre ihnen den späteren Untersuchungen zufolge nichts passiert. Der Brandverlauf, Rettungs- und Löscheinsatz der Feuerwehr werden beschrieben. Nach Auskunft des Leiters der Feuerwehr war nicht so sehr die Größe des Brandes für die vielen Toten und Verletzten verantwortlich, sondern die plötzliche Explosion. Sauerstoff strömte hierbei durch die geöffnete Tür in den Flur, unterstützte die Brandausbreitung und bildete eine Flamme ähnlich wie bei eine Schweißbrenner. Die Betroffenen versuchten noch über die rückwärtige Treppe zu fliehen, wurden dabei jedoch Opfer der Flammen.

Ehret, Kister und Feut [1992] berichten über einen Wohnungsbrand im 12. OG eines 19-geschossigen Wohnhochhauses mit 418 Einzimmerappartements. Bei der Anfahrt konnte der Zugführer an der Rückseite des Gebäudes weder Rauch noch Feuerschein sehen. Im 12. OG bemerkten die Einsatzkräfte eine leichte Verrauchung im Treppen/Aufzugsvorraum. Ein durch eine Rauchschtztür zunächst geschlossener Stichflur war stark verraucht. Nach der Lageerkundung wurde die Tür der von dem Brand betroffenen Wohnung mit einer Axt eingeschlagen. Sekundenbruchteile später kam es zu einer Rauchdurchzündung mit Stichflammenbildung und zum Einsturz der Fensterfront des Wohnraumes. Der zu dieser Zeit herrschende Sturm mit Böen bis Stärke 8 drückte die Stichflammen in den Flur und verwirbelte sie. Die in Deckung liegenden Feuerwehrleute wurden von den Stichflammen erfaßt. Versuche, mit Flammschutzanzügen in den Flur einzudringen brachten ebenso wenig Erfolg wie ein Versuch, mit C-Rohren eine Sprühwasserschutzwand aufzubauen. Durch den Sturm bahnte sich der immer stärker werdende Rauch auch Wege in die durch Rauchschtztüren geschlossene obere Etagen. Die Feuerwehrleute zogen sich aufgrund der durch das Löschwasser durchnäßten Dienstkleidung und der starken Wärmeeinwirkung der Stichflammen schwere Verbrühungen zu. Vier noch nicht evakuierte Hausbewohner konnten erst gerettet werden, nach dem eine Querlüftung in der Brandetage zur Rauchabführung geschaffen worden war.

Fischer [1997] berichtet über die Bekämpfung des Dachstuhlbrandes im ca. 16 m hohen, 3-geschossigen Nordflügel des Kurhauses Bad Elster (Thüringen). Der Brand entwickelte sich aus einem Schwelbrand nach seiner Entstehung während Restaurierungsarbeiten (Abbrennen alter Farbreste an den Ziertraufen des Daches mittels Heißluftgebläsen) sehr rasch. Die schlagartige Durchzündung des Dachstuhles des Nordflügels wurde offensichtlich durch Luftzufuhr durch den angrenzenden Lichthof sowie über eine geöffnete Dachluke ausgelöst. Durch den massiven Einsatz von Wendestrahrohrren sowohl von einer Drehleiter als auch von einem TLF aus konnte die Brandausbreitung auf den Gebäude-Mittelbau verhindert werden. Im Gebäude befindliche Acetylen- und Sauerstoffflaschen für Schweißarbeiten stellten eine große Gefahr dar. Diese wurden zunächst gekühlt und dann ins Freie gebracht.

Nach **Fleischmann [1996]** ist ein Backdraft eine Explosion als Folge des Einströmens von Luftsauerstoff in einen mit unverbrannten brennbaren Brandprodukten angefüllten Raum. In einem geschlossenen Raum ergibt sich aufgrund kleiner Leckageöffnungen eine nur geringe Belüftung. Aufgrund des Sauerstoffmangels kann die Verbrennung nicht aufrechterhalten

werden und es bildet sich eine dunkle Rauchsicht. Irgendwo im Raum verbleibt eine kleine Flamme oder Glut. Plötzlich ergibt sich durch Zerstörung einer Glasscheibe oder Öffnen einer Tür eine neue Belüftungsquelle. Die heiße brennstoffreiche Atmosphäre im Raum strömt durch den oberen Teil der Öffnung. Gleichzeitig fließt kalte, frische Luft durch den unteren Teil der Öffnung. Diese kalte, von der Dichtedifferenz hervorgerufene sauerstoffreiche Strömung wird als Schwerkraftströmung ("gravity current") bezeichnet. Zwischen beiden Strömungen bildet sich aufgrund Instabilitäten in der Scherzone eine Mischungszone aus. Diese wird von der Schwerkraftströmung quer durch den Raum getragen. Ein Teil dieser Mischungszone befindet sich innerhalb der Zündgrenzen und entzündet sich beim Kontakt mit vorhandenen Flammen oder glühenden Bereichen. Nach der Entzündung breitet sich die neue Flamme rückwärts durch die Mischungszone aus. Diese vorrückende Flamme brennt entlang der Grenzschicht zwischen eintretender Schwerkraftströmung und aus dem Raum ausströmenden Gasen. Die Flamme ist so instabil, daß sich eine schnell ausbreitende turbulente Flamme entsteht. Die resultierende turbulente Deflagration im Raum treibt angesammelte überschüssige Pyrolyseprodukte aus der Belüftungsöffnung und erzeugt mit den brennbaren Stoffen außerhalb des Raumes einen Feuerball.

Bei den experimentellen Untersuchungen wurden 2 Varianten festgestellt. Bei identischen Bedingungen an der Raumöffnung ergaben sich unterschiedliche Zeiten bis zum Backdraft. Diese Verzögerungszeiten resultieren in unterschiedlichen Flammenstrukturen bei der Deflagration und ergeben unterschiedlich heftige Backdrafts.

Bei der ersten Variante ist die Verzögerungszeit ausreichend lang, damit die Schwerkraftströmung zurück zur Öffnung gelangt. Die untere Schicht, die durch diese Schwerkraftströmung erzeugt wird, besteht aus brennstoffreichen Gasen aus dem Raum und sauerstoffreicher Luft, die in die Wohnung einströmt. Wenn es während dieser Zeitperiode zur Zündung der mehr gleichmäßig durchmischten und sich innerhalb der Zündgrenzen befindlichen unteren Schicht kommt, ist die Flammenstruktur halbkugelförmig und die Deflagration zu Beginn sehr heftig.

Die 2. Variante erfordert eine lange Verzögerungszeit. In dieser Zeit hat die Schwerkraftströmung den Raum wieder verlassen und die untere Schicht besteht hauptsächlich aus Luft. Die brennbaren Gase aus dem Raum werden über der Unterschicht eingeschlossen wobei die untere Schicht hauptsächlich aus Luft besteht. Die sich ausbreitende Flamme ist ausrei-

chend instabil um eine schnell fortpflanzende turbulente, aber weniger heftige Deflagration zu erzeugen.

Von **Fleischmann und McGrattan [1999]** wurden zur Problematik des Backdraft eine zweidimensionale Simulation sowie eine Reihe von Salzwasser- und Backdraft-Experimenten durchgeführt, um das Durchmischen der Schwerkraftströmung zu untersuchen welche einem Backdraft vorausgeht.

Wenn es zu einem Brand in einem Raum kommt, wobei die einzige Belüftung nur aufgrund von Leckageöffnungen stattfindet, wird die Brandausbreitung durch den verfügbaren Sauerstoff begrenzt und es werden große Mengen unverbrannten Brennstoffes erzeugt. Wenn diese Leckagerate klein genug ist geht der Flammenbrand in einen Schwelbrand über. Die Raumtemperaturen sind hierbei im Vergleich zum Flashover zwar niedrig aber bedeutend höher als die Umgebungstemperatur. Die höhere Temperatur bedingt eine geringere durchschnittliche Dichte im Raum als die Dichte der Umgebung. Wenn der Raum geöffnet wird, strömt eine dichtebestimmte Strömung (Schwerkraftströmung) in den Raum. Die dichte und damit schwerere Umgebungsluft strömt durch die Öffnung und vermischt sich mit den heißen Gasen des Raumes, wenn sich die Schwerkraftströmung über den Boden bewegt. Wenn die Brennstoffkonzentration groß genug ist und die Schwerkraftströmung mit einer Zündquelle in Kontakt kommt, entsteht ein Backdraft im Raum.

In der Arbeit wird ein 2-dimensionales Rechenmodell verwendet, um die Schwerkraftströmung beim Eintritt in den Raum zu simulieren. Die Rechenergebnisse werden mit experimentellen Untersuchungen verglichen. In der 1. Versuchsserie wurde ein Salzwasser-/ Frischwasser-Modell herangezogen, um die Strömung im Raum sichtbar zu machen. Hierbei wurde ein Behälter aus Acrylglas mit Wasser (Dichte: 1.000 kg/m^3 , pH: 6,8; Abmessungen: $0,15 \text{ m}$ breit * $0,3 \text{ m}$ lang * $0,15 \text{ m}$ hoch) und 2 verschieden großen Öffnungen ($0,15 \text{ m} * 0,15 \text{ m}$; $0,15 \text{ m} * 0,05 \text{ m}$) die mit einem vertikalen Schieber bis zum Versuchsbeginn verschlossen waren in einen größeren Behälter mit Salzlösung ($0,3 \text{ m}$ breit * $0,6 \text{ m}$ lang * $0,45 \text{ m}$ tief, Dichte der Salzlösung: 1.003 bis 1.101 kg/m^3) getaucht. Eine kleine Menge Phenolphthalein wurde dem Behälter mit Frischwasser zugegeben. Beim Kontakt der Phenolphthalein/ Wasserlösung mit der Lösung am Boden (Salzlösung) steigt der pH-Wert auf 11,7 und ergibt eine rote Färbung. Beim Versuch wurde der Schieber des Behälters geöffnet und die Strömung beobachtet.

In der 2. Versuchsserie wurde in einem Raum mit gegenüber realen Raumgrößen verkleinerten Abmessungen (1,2 m Breite * 1,2 m Tiefe * 2,4 m Länge) Backdraft-Versuche durchgeführt. Als Brandquelle in der Anfangsphase wurde ein Gasbrenner mit einer Leistung zwischen 70 und 200 kW verwendet. Als Meßwerte wurden die Temperaturen, Drücke und Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt. Bei jedem Versuch wurde der Gasbrenner im geschlossenen Raum gezündet. Das Feuer brannte so lange, bis der Sauerstoff für eine Verbrennung nicht mehr ausreichte. Danach sammelte sich unverbranntes Gas im Raum. Nach einer vorher festgelegten Zeit wurde dann die Gaszufuhr abgestellt und eine Klappe des Raumes geöffnet, damit sich die Schwerkraftströmung in den Raum ausbilden konnte. Der Backdraft wurde durch einen elektrischen Lichtbogen in einer Höhe von 0,45 m über dem Boden über dem Brenner initiiert. Hierbei wurden die Meßergebnisse vor der Zündung mit den Ergebnissen aus den Salzwasser-/Frischwasserversuchen und den numerischen Berechnungen verglichen. Die visuellen Beobachtungen aus den Salzwasserexperimenten stimmten gut mit der numerischen Simulation überein. Die Geschwindigkeitsmessungen bei der Öffnung des Backdraft-Versuchsraumes vor der Zündung stimmten mit der numerischen Simulation überein.

Fleischmann, Pagni und Williamson [1993] berichten über ähnliche Untersuchungen wie **Fleischmann und McGrattan [1999]**. In dem hier beschriebenen Versuchsraum (Höhe: 1,2 m, Breite: 1,2 m, Länge: 2,4m, Fensteröffnung: Höhe: 0,4 m; Breite: 1,2 m) wurden 23 Backdraft-Versuche mit Erdgas und Propan durchgeführt. Der Gasbrenner stand hierbei an der hinteren Wand des Raumes gegenüber der Öffnung. Sowohl der Brenner als auch der Backdraft wurden durch jeweils einen Hochspannungsfunken 50 mm oberhalb des Brenners gezündet. Variiert wurde hierbei die Wärmefreisetzung zwischen 80 und 150 kW, die Vorbrennzeiten zwischen 90 s und 420 s, die Anzahl der Ventilationsöffnungen (im Bodenbereich und an der Decke), die Öffnungszeit zwischen 95 s und 360 s. In der Veröffentlichung findet sich eine Tabelle mit den Versuchsergebnissen. In den Versuchen mit Propan ergab sich kein Backdraft. Ebenfalls ergab sich bei 2 Belüftungsöffnungen kein Backdraft. In den Versuchen breitete sich die Schwerkraftströmung in 2,1 bis 5,2 s von der Öffnung zur Zündquelle aus, d.h. es dauerte mindestens 2 s bis zur Zündung. Die Flamme breitete sich anschließend während der Deflagration in 1,2 s bis 2,6 s von der Zündquelle bis zum Austritt aus der Öffnung aus. Die Autoren weisen auf die Notwendigkeit weiterführender Untersuchungen hin, die zu einer weiteren Aufklärung der Phänomene beitragen. Sie halten es für erforderlich, bei zukünftigen Versuchen die Meßtechnik zu erweitern, u. a. durch Druckmeß-

aufnehmer und Messungen der Gaskonzentrationen (obere Gasschicht: Kohlenwasserstoffe, O₂, CO₂, CO), bidirektionale Strömungsmeßsonden (an den Öffnungen).

Nach **Gojkovic [2000]** hat sich während der letzten Jahrzehnte die Brandschutzforschung auf ausreichend ventilierte Brände konzentriert. Forschung, die sich mit unterventilierten Bränden beschäftigt entwickelte sich langsamer, hauptsächlich wegen der komplizierten physikalischen und chemischen Prozesse. Der unterventilierte Brand ist jedoch ein in der Praxis sehr oft angetroffener Brand und wird vom Autor sogar als der häufigste Typ bezeichnet, wenn die Feuerwehr den Einsatzort erreicht. Wenn die Verbrennung unter Mangel an Sauerstoff abläuft, werden mindestens 4 Varianten der Brandausbreitung als möglich genannt:

1. Der Brand geht aus.
2. Selbstentzündung (Rückzündung) der Brandgase bei Kontakt mit Sauerstoff
3. Backdraft
4. Brandgasexplosion

Das Ergebnis der bisher durchgeführten Untersuchungen konzentriert sich hauptsächlich auf den Vermischungsprozeß zwischen Frischluft und brennbarem Gas, der sogenannten Schwerkraftströmung („gravity current“). Weiterhin wurden einige Backdraft-Versuche im Klein- und Großmaßstab durchgeführt. In Schweden wird nur über wenige Fälle von Backdraft und Brandrauchexplosionen jährlich berichtet. Allerdings ist anzunehmen, daß Backdrafts öfter vorkommen. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen ist es schwierig, zwischen Flashover und von einem sich langsam ausbreitenden Backdraft zu unterscheiden, zum anderen gibt es eine Grauzone in der nicht klar zwischen den verschiedenen Ereignissen unterschieden werden kann. Weiterhin unterscheidet die Statistik nicht zwischen Backdraft und anderen Typen von Explosionen. Zweck der von **Gojkovic [2000]** durchgeführten Backdraft-Versuche war es, ein reproduzierbares Szenario zu schaffen, das geeignet ist, wenn ein Backdraft-Container zu Demonstrationszwecken z.B. für Feuerwehreinsatzkräfte verwendet werden soll. Ähnliche Versuche wurden bereits von der Universität von Canterbury in Neuseeland durchgeführt, allerdings mit im Vergleich geringerem Umfang und Meßtechnik. In den hier beschriebenen Untersuchungen wurden insgesamt 13 Versuche durchgeführt. Die Versuche wurden in einem zu einem Backdraft-Container modifizierten Schiffscontainer mit den Abmessungen Länge: 5,5 m * Breite: 2,2 m * Höhe: 2,2 m ausgeführt. Der Container

wurde hierzu gegen Austritt von unverbrannten Gasen abgedichtet und gegen Wärme isoliert. Vollständige Gasdichtheit wurde jedoch nicht erreicht. Einige Leckagestellen existieren im Bereich um die Druckentlastungsklappe. Die Druckentlastungsklappe hatte die Funktion, einen unerwünschten Druckaufbau während des Versuches zu vermeiden. Zur besseren Beobachtung wurde ein Beobachtungsfenster, welches hohen Temperatur- und Druckschwankungen widersteht, eingebaut. Auf der gegenüberliegenden kurzen Seite wurde in der mittleren Höhe eine 0,8 m hohe verschließbare Öffnung über der gesamten Breite des Containers als Lufteintrittsöffnung angebaut. Mit einem Zugdraht konnte diese aus sicherer Entfernung geöffnet werden. Die Lage und Form der Öffnung wurde gewählt, da sie eine näherungsweise 2-dimensionale Strömung als eine Tür- oder Fensteröffnung erzeugt. Dies erleichtert die Modellierung mit einem CFD-Modell. An der Rückseite wurde mittig im Container ein Gasbrenner für Erdgas als Brandquelle mit den Abmessungen 0,3 m * 0,3 m aufgestellt. Zur Zündung des Brenners wurde ein Hochspannungsfunken verwendet. Zur Zündung der Gas-/Luftmischung zur Auslösung des Backdrafts wurde ein ca. 1 m langer elektrisch beheizter vertikaler Metalldraht verwendet. Die Meßtechnik umfaßte Temperaturmessungen mit Thermoelementen, Messungen des statischen Druckes mit Piezoresistiven Druckmeßumformern, bidirektionale Strömungsmeßsonden zur Messung des dynamischen Druckes. Die verbrauchte Gasmenge wurde ebenfalls ermittelt. Weiterhin wurde mit einem Gasmeßgerät der zeitliche Verlauf der Methangas-, CO₂- und O₂-Konzentration im Container bestimmt.

Für die Experimente wurde Erdgas verwendet, da es vergleichbare Eigenschaften zu den Brandpyrolyseprodukten (Dichte kleiner als Luft, Zündfähigkeit innerhalb bestimmter Grenzen) aufweist. Der Hauptgrund für die Verwendung von Gas ist, daß sich die Konzentrationsverteilung im Raum besser steuern läßt als diejenige gasförmiger Zersetzungsprodukte bei einem festen Brandstoff.

Bei den Versuchen wurde folgender Versuchsablauf gewählt:

1. Schließen der Druckentlastungsklappe und der Belüftungsöffnung.
2. Zündung des Brenners (ca. 2 m hohe Flamme, Wärmefreisetzung ca. 600 kW), kleine Belüftungsöffnung verschlossen.
3. Nach Stabilisierung der Flamme Öffnen der kleinen Belüftungsöffnung um den Überdruck aufgrund der Zündung des Brenners abzubauen.
4. Die Flamme erlischt aufgrund des Sauerstoffmangels nach ca. 1 min.
5. Erdgas strömt weiter aus => Simulation des Pyrolyseprozesses.

6. Bei der gewünschten Gaskonzentration wurde die Gaszufuhr abgestellt.
7. Öffnung der Belüftungsöffnung und Einschalten des Heizdrahtes.
8. Die Luft vermischt sich mit dem Erdgas.
9. Der zündfähige Bereich erreicht den Heizdraht und wird hierdurch gezündet.
10. Die Temperatur im Container steigt sehr schnell und führt zu einer Expansion der Gase.
11. Bisher noch unverbrannte Gase strömen aus dem Container.
12. Die Flamme breitet sich durch den Container aus und die unverbrannten Gase entzünden sich außerhalb unter Bildung eines Feuerballs.

Ein Beispiel für einen Versuchsablauf zeigt **Bild 2.3**.

Der Backdraft wurde in den Versuchen ca. 10 min nach Zündung des Brenners eingeleitet.

Bei den Versuchen wurde festgestellt, daß große Probleme bei der meßtechnischen Erfassung der Gaskonzentrationen auftraten. Weiterhin hatten sowohl Wind als auch Öffnungsverhältnisse und Gastemperaturen einen großen Einfluß auf den Versuchsablauf.

Druckmessungen könnten nur in wenigen Fällen erfolgreich durchgeführt werden. Bei einem Versuch wurde ein maximaler Überdruck von ca. 225 Pa ermittelt.

Man erkennt hierber an der Größe des entstandenen maximalen Überdruckes, daß es sich beim Backdraft nicht um eine Explosion im eigentlichen Sinne, sondern nach **Bussenius [1989, 1996]** um eine Verpuffung handelt. Bei einer Verpuffung beträgt der Druck weniger als 0,01 MPa (0,1 bar). Wie die Ausführungen von **Neumann [2003]** zeigen, ergeben sich bereits bei diesen kleinen Drücken schwere Schäden an Bauwerksstrukturen.

In weiteren Experimenten ist beabsichtigt, statt Erdgas feste Brandstoffe wie Holz- oder Kunststoffprodukte zu verwenden, um nach Auffassung der Autoren einen größeren Bezug zu realen Backdrafts herzustellen.

Gottuk et al. [1999] beschreiben die Ergebnisse von Versuchen im Originalmaßstab, mit welchen die Entwicklung und Abschwächung von Backdrafts an Bord eines Versuchsschiffes der US Navy untersucht worden war.

Bild 2.2 verdeutlicht das Entstehungsprinzip eines Backdrafts.

Der Schlüsselparameter für die Entwicklung eines Backdrafts ist nach Gottuk et al. der Brennstoffmasseanteil. Der kritische Brennstoffmasseanteil im Brennstoff/Luftgemisch im Raum, der für die Entwicklung eines Backdrafts bei versprühtem Dieselöl als Brennstoff erforderlich ist, beträgt 0,16 unter ungünstigsten Bedingungen. Es hat sich gezeigt, daß die Ausbreitung bei dieser Art von Verpuffung relativ langsam vonstatten geht. Die Druckwelle breitete sich hierbei innerhalb von 2 s aus. Es wurden Maximaldrücke von 85 bis 234 Pa bzw. von 250 bis 1.243 Pa ermittelt.

Auch diese Drücke zeigen, daß es sich beim Backdraft nicht um eine Explosion im eigentlichen Sinne, sondern nach **Bussenius [1989, 1996]** um eine Verpuffung handelt. Bei einer Verpuffung beträgt der Druck weniger als 0,01 MPa (0,1 bar).

Bei den Untersuchungen hat sich herausgestellt, daß das Einsprühen von Wasser zur Abschwächung bzw. vollständigen Verhinderung eines Backdrafts bei Dieselöl eingesetzt werden kann. Die Wirksamkeit ist um so größer, je größer die eingesetzte Wassermenge ist. Die Wirkung beruht in einer Verminderung des Massenanteils des Brennstoffes durch Verdünnung mit Wasserdampf. Im Vergleich hierzu hat die Kühlwirkung des Wassers nur einen geringen Einfluß.

Nach **Knorr [2000]** stellt das schlagartige Durchzünden von Schwelgasen für die im Innenangriff vorgehenden Kräfte eine große Gefahr dar, da dies außerdem eine schlagartige Brandausbreitung bewirkt. Finden diese Vorgänge beim Öffnen der Tür zum Brandraum in Folge des hierdurch einströmenden Sauerstoffs statt, so schlägt dem vorgehenden Trupp eine Druckwelle, vor allem aber eine Stichflamme entgegen. Da Flammen in der Regel nach oben züngeln, ist der sicherste Platz für die Feuerwehreinsatzkräfte am Boden. Türen von Brandräumen werden daher grundsätzlich in der Hocke oder sogar liegend geöffnet, der vorgehende Trupp sucht dabei seitlich neben der Tür Deckung. Selbstverständlich muß sich bei solchen Aktionen Wasser am mitgeführten Strahlrohr befinden. Die Gefahr der Durchzündung droht allerdings auch beim weiteren Vorgehen innerhalb verqualmter Bereiche. Auch während der Nachlösch- bzw. Aufräumphase kann es noch zur Zündung von Schwelgasen kommen, da sich diese bei ungenügender Lüftung auch über längere Zeit unbemerkt im Gebäude ausbreiten können. Beim Zutritt von ausreichend Sauerstoff können verbliebene Glut-

nester als Zündquelle für die zündfähigen Gasanteile wirken.

Widetschek [2002] berichtet von einem der größten Unglücksfälle mit Todesfolge der Pariser Feuerwehr am 14. September 2002. Die Feuerwehreinsatzkräfte wollten einen kleinen Zimmerbrand bekämpfen, wobei sie jedoch von zwei Backdrafts überrascht wurden. Dieses Ereignis wird in **Bild 2.4** skizziert. Es ereignete sich im vorletzten Stock eines siebengeschossigen Wohnhauses. Beim Öffnen der Tür zum 10 m² großen Wohnraum durch zwei Feuerwehrmänner kam es nicht nur zu einer Stichflamme, sondern zu einer gewaltigen Explosion und einem mächtigen Feuerball, der die Tür aus den Angeln hob und die beiden Männer zu Boden schleuderte. Nach dem ersten Backdraft entwickelte sich erneut explosive Gase und Brandraucherosole im Bereich der brennenden Wohnung. Als 10 Minuten später drei Feuerwehrmänner versuchten, die beiden Verletzten in Sicherheit zu bringen, ereignete sich eine zweite Explosion beim Öffnen der Tür zum etwa nur 60 cm breiten Verbindungsgang. Diese Männer blieben ebenfalls regungslos am Boden liegen. Die fünf Opfer lagen mit stark beschädigten Helmen und Schutzanzügen schwer verletzt im Raum. Durch den Explosionsdruck wurden die Atemschutzmasken vom Kopf gestreift. Als Todesursache wurden zum einen Verbrennungen und zum anderen Verletzungen durch die Druckwirkung festgestellt. Durch letztere kam es zu letalen inneren Verletzungen. Bei der anschließenden Brandursachenermittlung wurde festgestellt, daß der Brand im Schlafbereich ausgebrochen sein dürfte. Anfänglich war wohl das Bettzeug (Matratze) und später das gesamte Inventar in das Brandgeschehen verwickelt. Aufgrund einer unvollständigen Verbrennung entstanden durch die thermische Zersetzung zündfähige Gase wie z.B. Kohlenmonoxid, die beim Öffnen der Tür (Sauerstoffzufuhr) schlagartig durchzündeten. Widetschek kommt zu der Erkenntnis, daß es bei jedem noch so kleinen Brandgeschehen zum Phänomen des Backdrafts kommen kann. Die Voraussetzungen für derartige Ereignisse sind sehr komplex, wie der Autor feststellt. Einen Einfluß haben demnach die Raumverhältnisse (Größe, Geometrie, etc.), die Art des Brennstoffs (Holz, Kunststoffe) und die Sauerstoffzufuhr (Dichtheit der Fenster etc.) eine große Rolle. Eine Voraussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit kann nach seiner Auffassung nicht gemacht werden. Auf jeden Fall sei beim Öffnen von Türen und Fenstern, aber auch von Dachflächen mit Backdrafts zu rechnen.

Riehl [2003] berichtet über eine Rauchgasexplosion am 7.12.2002 in Bruchsal-Untergrombach. Es handelte sich hierbei um ein 2 geschossiges Gebäude mit durchgehendem Treppenraum über 2 Geschosse bis zum Dachgeschoß. Im 1. OG war eine Sauna in einem kleinen Raum in Gebäudemitte eingebaut. Die ersten Einsatzkräfte trafen 6,5 min nach Alarmierung an der Einsatzstelle ein. Auf der Straße war gräulicher Rauch bemerkbar (Ein Polizist hatte die Tür eingetreten.). Im Flur war der Rauch gräulich (nicht schwarz oder gelb), Besonderheiten (pulsieren, bewegen des Rauches etc.) waren nicht zu bemerken. Zunächst wurde die Brandbekämpfung vom Flur aus vorgenommen. Da mit dem von den bereits geretteten Bewohnern geöffneten Dachfenster ein Rauchabzug gegeben war, wurde etwa zu diesem Zeitpunkt vor der Haustür ein Belüftungsgerät eingesetzt. Die Trupps bekamen dadurch bessere Sicht. Es wurde dann mit dem Hohlstrahlrohr stoßweise Wasser auf Flammen im mittleren Zimmer des 1.OG gegeben. Die Tür der Sauna war zu diesem Zeitpunkt noch geschlossen und der Strahlrohrführer sah im Raum nur die Flammenzungen hinter dem Türfenster. Plötzlich klirrte Glas, es war kurz ruhig und dann gab es ein Geräusch wie von einem Gasbrenner. Sofort waren die Einsatzkräfte von Flammen umgeben. Die Druckwelle ist hierbei durch das ganze Haus gelaufen und hat Wände, Schränke sowie Fenster mit Rahmen komplett herausgedrückt. Weiterhin entstand am Mauerwerk größerer Schaden. Der Strahlrohrführer und der Trupfführer wurden von der Druckwelle umgeworfen. Eine Flammenwalze kam die Treppe herunter und hüllte die Einsatzkräfte vollständig ein. Sekundärbrände waren im 1. und 2.OG. sowie im Dachgeschoß entstanden, die selbständig wieder verlöschten. Die Gegenstände in den Räumen waren jedoch nicht gleichmäßig beflammt. Vermutlich hatten die Rauchgase nur dort gezündet, wo ausreichend Sauerstoff zur Verfügung stand. Eine zweite Durchzündung hat es nicht mehr gegeben, da das Belüftungsgerät die restlichen brennbaren Gase über die durch die Explosion entstandenen Öffnungen herausgedrückt hat. Die beiden Trupps konnten verletzt, aber noch selbständig das Gebäude verlassen, nachdem die Flammen verloschen waren. Der weitere Einsatzverlauf verlief wie bei einem normalen Zimmerbrand. Vermutliche Ursache der Explosion war ein längere Zeit schwelender Brand mit thermischer Zersetzung des Mobiliars im Innern der Sauna. Das Zerplatzen der Fensterscheibe im Saunaraum führte anschließend zur Zündung. Es konnte festgestellt werden, daß bei den Einsatzkräften, bei denen eine geeignete Schutzkleidung vorhanden war (Flammschutzhaube, Nomex-Einsatzjacke, Nomex-Einsatzhose) keine nennenswerten Verletzungen aufgetreten sind.

Pulm [2003] berichtet ebenfalls kurz über die Rauchgasexplosion am 7.12.2002 in Bruchsal-Untergrombach.

Weiterhin beschreibt der Autor den Verlauf von Bränden in geschlossenen Räumen und geht hierbei auf den Brandverlauf sowie die Phänomene Flashover und Rauchgasexplosion ein.

Bei der Beurteilung der Gefahr einer bevorstehenden Rauchgasexplosion ist ein wesentliches Element der Erkundung, ob die Fenster und Türen zum Brandraum geschlossen sind. Darüber hinaus gibt es weitere Hinweise, die auf eine bevorstehende Rauchgasexplosion hinweisen können:

- Rauchaustritt unter Druck aus allen Öffnungen (Türritzen usw.)
- stoßweiser (pulsierender) Rauchaustritt
- Rauchaustritt auch im unteren Bereich der Tür
- dichter, grau-gelber Rauch (ungewöhnliche Farbgebung)
- rußgeschwärzte Fenster
- ungewöhnliche, gedämpfte Geräusche
- plötzliches Ansaugen von Luft beim Öffnen der Tür
- hohe Temperaturen auch im Bodenbereich
- kleines oder nicht sichtbares Feuer

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich auch in nicht vom Brand betroffenen Räumen eine hohe Konzentration an brennbaren Pyrolysegasen angereichert hat. Auch in diesen Räumen kann die Gefahr der Rauchgasexplosion nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Eine Rauchgasexplosion kann sich innerhalb weniger Sekunden nach dem Öffnen der Tür ereignen. Da davon ausgegangen werden muss, dass sich noch Zündquellen im Raum befinden, werden sich die entstehenden zündfähigen Gemische häufig sofort entzünden. Von daher müssen die Gegenmaßnahmen vor dem Öffnen oder unmittelbar nach dem Öffnen der Zuluftöffnung eingeleitet werden, will man die Explosion verhindern. Theoretisches Ziel der Maßnahmen muss sein, mögliche Zündquellen im Raum auszuschalten, bevor sich die brennbaren Gase mit der Luft vermischen können oder die brennbaren Gase aus dem Raum zu entfernen, bevor es zur Bildung zündfähiger Gemische kommt. Es dürfte in der Praxis jedoch kaum möglich sein, eine drohende Rauchgasexplosion unter ungünstigen Vorausset-

zungen überhaupt noch sicher zu vermeiden, wenn bereits Luft in den Raum einströmt.

Grundsätzlich ergeben sich nach **Pulm [2003]** zwei Möglichkeiten, mit dem Problem umzugehen:

1. Es werden Maßnahmen ergriffen, um zu versuchen, die Rauchgasexplosion zu vermeiden.
2. Die Rauchgasexplosion wird billigend in Kauf genommen oder sogar bewusst initiiert. Es werden allerdings Maßnahmen ergriffen, um deren Auswirkungen abzuschwächen.

Um die Gefahr einer Rauchgasexplosion zu reduzieren, erscheint es optimal, die Temperatur im Raum abzusenken, ohne hierbei Luft einströmen zu lassen. Dies kann bei geschlossener Tür durch die Verwendung eines FogNail erfolgen. Steht ein solches Gerät nicht zur Verfügung, bleibt nur der sachgerechte Einsatz eines Hohlstrahlrohres. Soll die Explosion verhindert werden, so muss der Strahlrohrführer so vor der Tür postiert sein, dass er in dem Moment, in dem die Tür geöffnet wird, bereits Wasser in den Raum geben kann. Wenn zwei bis drei Stöße Löschwasser in den Raum abgegeben worden sind, wird die Tür für 20 bis 30 Sekunden wieder geschlossen. Hierdurch wird die weitere Luftzufuhr unterbunden. Das verdampfende Wasser kühlt den Brandraum ab, der sich bildende Wasserdampf führt zu einer Inertisierung des Raumes und damit zu einer Reduzierung der Zündgefahr. Dabei müssen die Einsatzkräfte sich so verhalten, dass sie bei einem Fehlschlagen ihrer Maßnahme nicht in Gefahr geraten (Deckung nutzen, Abstand halten, auf dem Boden liegen o. a.). Bei Löschwasserabgabe mit dem Strahlrohr muss beachtet werden, dass mit dem Löschwasserstrahl nach dem Injektorprinzip Frischluft mitgerissen und in die Gaswolke befördert wird. Es kann zu einer sofortigen Flammenbildung entlang des Löschwasserstrahles in Richtung des Strahlrohrführers kommen. Um zu verhindern, dass die Flammen den Strahlrohrführer erreichen, muss der obere Bereich der Türöffnung mit dem Wasserstrahl vollständig abgedeckt werden.

Wie der Einsatz in Bruchsal-Untergrombach gezeigt hat, bietet der moderne Schutzkleidung einen wirkungsvollen Schutz gegen eine plötzliche Lageänderung mit Stichflammenbildung.

2.2 Rollover und Flashover

Wieder et al. [1992] stellen in ihrem Lehrbuch für Feuerwehreinsatzkräfte den Rollover und Flashover in Form einer Bildskizze dar (siehe **Bilder 3.1 und 4**).

Bild 3.2 zeigt einen Rollover während eines Brandversuches an einem Industrieleichtdach an der FFB.

Der Arbeit von **Südmersen [2000]** (siehe Zusammenstellung in **Tabelle 2**) gibt Auskunft über die Ursachen für die Entstehung eines Rollovers bzw. Flashovers.

Nach **Chitty [1996]** entsteht ein Flashover in einem Raum, wenn sich ein kleiner örtlich begrenzter Brand so ausbreitet, daß alle brennbaren Oberflächen miteinbezogen werden.

Nach **Drysdale [1996]** ist der Flashover die Übergangsphase zwischen der Brandentstehung und Vollbrand. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, daß ein Flashover ungefähr bei einer Wärmestrahlung von 20 kW/m^2 im Bodenbereich und einer Temperatur von ca. 600°C unter der Decke bei einer Deckenhöhe zwischen 2,5 m und 3 m eintritt. Nach erfolgtem Flashover schlagen kontinuierlich Flammen aus einer Raumöffnung (z.B. offenes Fenster). Ein weiteres Kennzeichen für den Flashover ist das Brennen der Gase in der Rauchschiebt. Vor dem Flashover kann ein Brand relativ leicht bekämpft werden. Der Brandschaden vor Eintritt des Flashovers ist vergleichsweise gering. In der Veröffentlichung werden empirische Gleichungen zur Berechnung der Wärmeströme und Massenströme, die zu einem Flashover führen, genannt.

Nach **Fleischmann [1996]** ist ein Flashover ein von der Wärmestrahlung dominiertes Ereignis, bei dem ein örtlich begrenztes Feuer zu einem vollentwickelten Raumbrand übergeht. Es handelt es sich hierbei um einen Vorgang, der zu einem Zeitpunkt eintritt wenn die Wärmestrahlung des Feuers, der Raumbegrenzungen und der heißen Gase groß genug ist, um alle brennbaren Oberflächen im Raum durch Wärmestrahlung zu entzünden. Der Brand beginnt hierbei in einem Raum mit angenommener offener Tür oder offenem Fenster. Der Brand breitet sich aus und bildet eine heiße Gasschicht an der Decke. Der Rauch beginnt, den Raum durch den oberen Teil der Öffnung zu verlassen. Durch den unteren Bereich der Öffnung

strömt Luft, welche die weitere Brandausbreitung unterstützt. Die Temperatur in der oberen Schicht steigt und strahlt Wärme an die brennbaren Oberflächen im Raum ab. Die Wände und Decke des Raumes heizen sich ebenso auf und strahlen ebenfalls Wärmeenergie an die Einrichtung ab. Wenn die Temperatur der oberen Schicht 500°C - 600°C erreicht, entzündet sich die Brandlast in kurzer Zeit mit der Folge, daß die exponierten brennbaren Oberflächen brennen. Dieser Vorgang dauert wenige Sekunden und wird Flashover genannt.

Nach **Shields et al. [1997 / 1998]** führen großflächige Doppelverglasungen für Gebäudefassaden vermutlich in vielen Fällen dazu, daß bislang gültige Berechnungen für die Voraussage der zeitlichen Entwicklung von Brandausbreitung, Flashover und Brandgastemperaturen fraglich werden. Bisherige Erfahrungen mit derartigen Szenarien lassen vermuten, daß bislang verwendete Gleichungen zur zeitabhängigen Beschreibung der Brandbedingungen in großen und tiefen Räumlichkeiten nicht geeignet sind. Zur Untersuchung des Brandverhaltens der obengenannten Verglasungen wurde ein Forschungsprogramm mit Brandversuchen in einem Großbürobereich eines hierfür gesondert errichteten Gebäudes durchgeführt. In Auswertung der detailliert dargestellten Versuche werden für das Verhalten von Fassadenverglasungen und die Brandentwicklung unter diesen Bedingungen 8 Schlußfolgerungen gezogen. So zeigte es sich z.B., daß eine Verglasung nicht so schnell wie angenommen bricht, eine Belüftungsöffnung entsteht dementsprechend später. Dieses muß bei Berechnungsverfahren, die z.B. eine Aussage zu den entstehenden Temperaturen und dem Eintreten des Flashovers machen entsprechend berücksichtigt werden.

Speth et al. [2002] haben im Rahmen einer Kooperation zwischen der Feuerwehr Aachen und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen einen Flashover-Container der Feuerwehr Aachen erstmals einer messtechnischen Betrachtung unterzogen. Zu diesem Zweck wurden die Temperaturen im Innenraum in Abhängigkeit von Ort und Zeit sowie der eingesetzten Löschmittel untersucht. Der Flashover-Container der Feuerwehr Aachen besteht aus zwei aneinandergesetzten Überseecontainern, von denen der vordere 0,5 m höher gesetzt ist und als Brandraum genutzt wird. Der 2. Container dient als Beobachtungsraum.

Ein Ausbildungsdurchgang gestaltet sich hierbei derart, daß nach Zündung des Stützfeuers (Brandlast: 6 Euro-Holzpaletten, hölzerne Innenauskleidung) mit kurzem Vorbrand (ca. 6 bis 7 min) der Container betreten wird und durch den Ausbilder von innen verschlossen wird. Die

sich nun anschließende Pyrolysephase der Holzbrandlast wird in erster Linie zur Demonstration der thermischen und optischen Effekte genutzt, die mit der Entwicklung von flashoverkritischen Einsatzsituationen verbunden sind. Vor allem lassen sich die absinkende Rauchgaszone und das allmähliche Verlöschen offener Flammen demonstrieren. Nach Entscheidung der Ausbilder wird dann zu einem bestimmten Zeitpunkt mit der Rauchgaskühlung begonnen. Hierzu werden die Zuluftöffnungen des Containers geöffnet. Durch mehrere kurze Wasserstöße kann die Temperatur während der folgenden zwei Minuten in Richtung der Decke deutlich unter 100°C gehalten werden. Gleichzeitig kann durch eine geregelte Frischluftzuführung zu diesem Zeitpunkt die für bevorstehende Rauchgasdurchzündungen typische Bildung von Flammenzungen in der Gasphase demonstriert werden. Es zeigt sich aber die deutlich prinzipbedingt fehlende Raumwirkung der Rauchgaskühlung: Während beim Beobachter eine Temperatur von etwa 60°C herrscht, steigt die Temperatur im Brandraum gleichzeitig bis auf fast 800°C an. Nach etwa 10 Minuten wird die Phase der Brandrauchkühlung beendet und die Entwicklung eines Vollbrandes abgewartet. Hierzu wird die Frischluftzufuhr des Containers freigegeben und nach erneuter Ausbildung eines Vollbrandes eine direkte Löschung des Brandgutes nach ca. 13 Minuten durchgeführt (Swift-Technik). In der Veröffentlichung werden zu den Temperaturverteilungen im Container weitere Aussagen gemacht.

In den weiteren Untersuchungen in Aachen wurde das Löschverhalten von Wasser und Schaum (Klasse A) verglichen. Es sollte zum einen festgestellt werden, wie stark sich die Brandraumkühlung im für den vorgehenden Trupp relevanten Bereich bis etwa 1,4 m über dem Boden auswirkt, und andererseits eine Aussage über die Löschwirksamkeit im Brandraum getroffen werden. In beiden Fällen wurde die Brandlast gezündet und der Container nach einer Vorbrenndauer von etwa 7 Minuten von innen verschlossen. Nach Ablauf der Pyrolysephase wurde anschließend zuerst eine Serie von stoßweisen Rauchgaskühlungen durchgeführt und darauf folgend nach Öffnung des Containers und Ausbildung eines Vollbrandes mehrmals über das Brandgut geswiftet (halbkreisförmiges Ablöschen des Brandgutes mit einer typischen Stoßdauer von etwa 3 s, wobei der Löschstrahl um eine auf die Mitte des Brandgutes gerichtete imaginäre Achse geführt wird und dabei keinen Kontakt zu den Wänden oder Decken hat). Der Strahlrohrführer war in beiden Durchgängen die selbe Person. Bei diesen Versuchen wurde zum einen die Wirksamkeit der unterschiedlichen Löschmittel zum einen auf die Brandrauchkühlung und zum anderen zur direkten Brandbekämpfung untersucht. Bezüglich der Brandrauchkühlung fiel die Temperatur beim Einsatz von Wasser schlagartig um ca. 100°C . Bei der Verwendung von Schaum ergibt sich kein derarti-

ger Effekt. Die Temperaturen erhöhten sich zwar nicht weiter, allerdings kann auch keine Abkühlung beobachtet werden. Die fehlende Temperaturentlastung wurde vom Trupp im Container auch subjektiv deutlich wahrgenommen. Bei der direkten Brandbekämpfung durch Swift-Technik war im Falle von Wasser die schnellere Wiederentzündung mit einem deutlich höheren Temperaturanstieg verbunden. Bei Verwendung von Klasse-A-Schaum blieb die Raumtemperatur auf einem niedrigerem Niveau. Die gesamte benötigte Löschmittelmenge bis zum end-gültigen Verlöschen des Brandes lag in beiden Fällen bei ca. 60 l. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die beiden Löschmittel unterschiedliche Eigenschaften in der Brandbekämpfung aufweisen. Da ein Wechseln beider Löschmittel im Einsatzfall praktisch nicht möglich sein wird, stellt sich hier die Frage nach dem sinnvollsten Vorgehen als Ansatz für weitere Überlegungen.

Widetschek [1996] zeigt einige Schutzmaßnahmen bei vermuteter Gefahr eines bald eintretenden Flashovers auf.

- Öffnen von Türen, einer Dachhaut oder dem Einschlagen von Fenstern nur unter Einhaltung der elementarsten Sicherheitsregeln.
- Die alte Grundregel für den Feuerwehrmann: "spritze nie in den Rauch, sondern nur in Glut und Flammen" muß überdacht werden. Nach den neuen Erkenntnissen über den Flashover müßte umgekehrt argumentiert werden: Zuerst in den Rauch spritzen, um den Feuersprung durch das Abkühlen des Brandrauches bzw. dem Löschen bereits vorhandener Feuerzungen in Deckennähe zu verhindern. Allerdings darf hierbei kein Vollstrahl sondern nur ein Sprüh- oder Nebelstrahl verwendet werden. In den USA ist es bereits gang und gäbe, daß die ins Gebäude eindringenden Feuerwehreinsatzkräfte auf ihrem Weg zum Brandherd automatisch den Sprühstrahl zur Decke richten.
- Abführung vor allem in größeren Industriehallen der vielfach brennbaren (auch giftigen und evtl. korrosiven) Rauchgase ins Freie bereits möglichst vor dem Eintreffen der Feuerwehr.
- Schaffung eines definierten Luft-Rauchgasstromes um im Zuluftstrom in das Gebäude eindringen zu können
- Erzeugung eines programmierten Feuerübersprungs zu einem weitgehend definierten Zeitpunkt durch Belüftung mit Druckventilatoren und Zerstören der heißen Fensterscheiben durch Kühlung mit Wasserwerfern. In der Zwischenzeit werden die Löschfahrzeuge in Stellung gebracht und der Außenangriff koordiniert. Im Druckluftstrom der Belüftungs-

geräte sei ein weitgehend gefahrloses Vorgehen in den Brandbereich möglich.

Widetschek empfiehlt als Vorbereitung auf diese Szenarien ein intensives Flashover-Training für die Einsatzkräfte der Feuerwehr in Brandcontainern und Brandhäusern. Bei den Versuchen sollen möglichst komplette Zimmerbrände mit Teppichen, Vorhängen und Polstermöbeln mit ihren großen Schaum- bzw. Kunststoffanteilen durchgeführt werden. Eine Verbrennung einzelner Stoffe wie z.B. nur Holz oder Papier sei für die realistische Simulation eines Flashover unbrauchbar. Weiterhin sollte der verstärkte Einsatz von Wärmebild (Infrarot)kameras erfolgen. Die wissenschaftliche Erforschung des Phänomens Flashover sollte ebenfalls intensiviert werden.

Nach **Jacobi [1998]** werden weltweit Einsatzkräfte bei der Bekämpfung von Raumbränden durch unsachgemäßes Vorgehen schwer oder tödlich verletzt, weil vor allem die Gefahren durch Flashover und Backdraft unterschätzt werden. Schwedische und amerikanische Feuerwehren haben umfangreiche Erfahrungen mit diesen Branderscheinungen. Dies hat in diesen Ländern zu Forderungen an die Ausbildung und zu Erkenntnissen für die Taktik der Brandbekämpfung unter Berücksichtigung dieser Gefahren geführt. Mehrere Hinweise zum richtigen Verhalten der Einsatzkraft und zur Erkennung von Anzeichen für einen Flashover und Backdraft werden genannt. In Schweden wird angestrebt, daß jeder Feuerwehrmann einmal im Jahr eine Flashover-Ausbildung absolviert. Über eine entsprechende Ausbildungsanlage und ihre Funktion wird informiert.

Nachfolgend werden einige Literaturstellen aufgeführt, die Aussagen zum Eintrittszeitpunkt eines Flashovers bei realen Bränden geben (siehe auch **Tabelle 4** und **Bild 4.4**).

Bechtold et. al. [1978] berichten über Brandversuche an einem zum Abbruch bestimmten viergeschossigen modernen Wohnhaus in Lehrte. **Tabelle 4** gibt Auskunft über einige Versuchsdaten eines Brandes. Die Autoren machen allerdings keine Aussage darüber, zu welchem Zeitpunkt der Flashover stattgefunden hat. Es werden daher die Zeitpunkte aufgeführt, wo im Brandraum eine mittlere Temperatur von 500°C und 600°C herrscht. Aus diesen Temperaturwerten lassen sich Rückschlüsse über den Zeitpunkt des Flashovers ziehen.

Klopovic und Turan [1998] haben im Rahmen von Flashover-Tests im Naturmaßstab die durch eine externe Belüftung verursachte Flammenausbreitung untersucht, auf die im Beitrag

näher eingegangen wird. Dazu wurde ein großer Raum mit Möbeln ausgestattet. **Tabelle 4** und **Bild 4.4** gibt Auskunft über die Zeiten, bei denen unter den jeweiligen Versuchsbedingungen der Flashover aufgetreten ist.

Nach **Leihbacher [1999]** wurden in den letzten Jahren eine steigende Anzahl von Einsatzkräften durch Branderscheinungen wie Flashover, Backdraft, rasche windunterstützte Ausbreitung einer Flammenfront tödlich verletzt. Zwischen 1980 und 1989 verloren in den USA 44 Einsatzkräfte durch die schnelle Brandausbreitung ihr Leben. Vorher hatte der Tod von Einsatzkräften wesentlich andere Ursachen. Vor allem neuartige bauliche Entwicklungen und eine veränderte Gebäudeausstattung (worüber ausführlich informiert wird) haben diese Veränderungen bedingt. Unter diesen Bedingungen erfordert die Personensuche besondere Erfahrung und Sorgfalt. 14 taktische Hinweise zur Auffindung und Rettung eingeschlossener Personen werden gegeben. **Tabelle 4** und **Bild 4.4** gibt Auskunft über die Zeiten, bei denen unter den jeweiligen Versuchsbedingungen der Flashover aufgetreten ist.

Liang [2002] et al. gibt eine Zusammenstellung für die von verschiedenen Autoren ermittelten Temperaturen und Wärmestrahlungen bei der ein Flashover im Raum auftritt. **Tabelle 3** zeigt die ermittelten Werte.

Yu [1992], **Kotthoff [2002]**, **Hakkarainen [2002]** und **Shipp [2002]** geben die in **Tabelle 4** und **Bild 4.4** aufgeführten Zeiten bis zum Eintreten eines Flashovers an.

2.3 Untersuchung des Phänomens Flashover bei Realbrandversuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Nachfolgend werden einige ausgewählte Versuche an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik beschrieben, welche die Temperaturentwicklung, die Wärmefreisetzung, das Auftreten des Flashovers, das Zerstören von Verglasungen sowie die Brandrauchentwicklung verdeutlichen.

Die **Bilder 4.1.1 bis 4.1.3 (Tabelle 4)** zeigen einen Brandversuch mit einer Brandlast von 336 kg. (Beispiel 1, siehe **Kunkelmann [2001/1]**). Bei diesem Versuch trat der Flashover

nach ca. 13 min auf. Die zugehörigen Diagramme zum zeitlichen Verlauf von diversen Temperaturen, der Abbrandmasse und der Abbrandrate finden sich in **Bild 4.1.4** und **4.1.5**. Beim Vergleich der Videoprints zum Zeitpunkt des Flashovers mit dem Temperaturverlauf an der Brandraumdecke erkennt man den kurzen Temperaturabfall nach einem kontinuierlichen Anstieg. Gekoppelt an diesen Temperaturabfall sind eine Rußanreicherung und eine Sauerstoffverringerng. Danach steigt die Temperatur weiter an. Der Brand wurde nach dem Flashover zunächst mit einem „Fog Nail“ (siehe **Bilder 8.1** und **8.2**) bekämpft. Das Löschwasser wurde hierbei in feinverteilter Form durch eine Bohrung neben der Brandraamtür dem Brandraum zugeführt. Die Hauptlöschmechanismen sind hierbei Kühlwirkung und Sauerstoffverdrängung. Sowohl die Videoprints in **Bild 4.1.3** als auch die Temperaturverläufe in den **Bildern 4.1.4** und **4.1.5** zeigen die schnelle Wirksamkeit des Fog Nails. Die Einsatzkräfte können z.B. hinter der geschlossenen Tür verharren und über Funk weitere Einsatzbefehle der draußen vor dem Fassadenbereich positionierten Einsatzkräfte abwarten.

Nach dem Fog Nail Einsatz konnten die weiteren Brandbekämpfungs- bzw. Nachförscharbeiten mit einem Strahlrohr relativ gefahrlos durchgeführt werden.

In Beispiel 2 bei einem Wohnzimmerbrand mit vorgesetzter Ganzflächendoppelfassade (**Bilder 4.2.1** bis **4.2.8**) (siehe **Kunkelmann [1998]**) kam es zum Flashover bereits nach ca. 3 min. Wie in der Einleitung bereits erwähnt, traten tödliche Sauerstoff- und Brandgaskonzentrationen bereits unter 3 Minuten auf. Die maximale Brandraumtemperatur betrug ca. 1.100°C nach 13 min (**Bilder 4.2.9** und **4.2.10**). Bei der zur Prüfung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen nach DIN 4102-2 verwendeten Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) werden vergleichbare Temperaturen erst nach über 2 Std. erreicht (120 min: $\Delta T = 1.029$ K) erreicht. An einem über dem Brandraum liegenden Geschoß traten Bestrahlungsstärken an der Fassade von ca. 67 kW/m² auf. Dieser Wert liegt wesentlich über den Werten der Bestrahlungsstärken für die Selbstentzündung von Holz (25 bis 34 kW/m²) und Textilien (24 bis 34 kW/m²). Die Bestrahlungsstärken für die Fremdentzündung dieser Stoffe liegen noch wesentlich darunter. Es traten Flammenlängen von 2 bis 3 m an der Fassade auf. An dieser Stelle soll erwähnt werden, daß bei diesen großen Flammenlängen und Bestrahlungsstärken in jedem Fall mit einem Feuerüberschlag in darüberliegende Geschosse zu rechnen ist. Hierbei ist es zunächst unerheblich, ob es sich um eine nichtbrennbare oder brennbare Außenfassade handelt. Die Versuche haben weiterhin gezeigt, daß das Zerstören von Vergla-

sungen eine nichtvorhersehbare Größe darstellt. Die **Bilder 4.2.7** und **4.3** zeigen, daß z.B. Einscheibensicherheitsglas (ESG) mit noch vorhandenen Restvorspannung in kleine Bruchstücke oder Krümel zerfallen kann aber auch unter bestimmten Einbaubedingungen und Temperaturverhältnissen seine Vorspannung verliert und ganzflächig, ggf. aus großer Höhe nach unten fällt. Passanten, Feuerwehreinsatz- und Rettungskräfte sind hierbei sowohl durch herabfallende große Verglasungsteile als auch durch Glaskrümel beträchtlich gefährdet. (siehe **Kunkelmann [1998, 2001/1]**).

Der Einfluß der verwendeten Glasart und der Einbauzustand der Gläser Floatglas, Wärmeschutzglas, Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG), Teilvorgespanntem Glas (TVG), Verbund-Sicherheitsglas (VSG), Brandschutzglas und Glaskeramik auf das Brandgeschehen macht deutlich, daß die Brandentwicklung und -ausbreitung ganz entscheidend vom Zeitpunkt des Zerstörens der Verglasungen abhängt. Zum einen können durch den Brand bestimmte Verglasungen mehr oder weniger schnell zerstört werden. Dadurch werden dann Ventilationsöffnungen geschaffen, die den Flashover bzw. Backdraft und damit die Zunahme des Brandschadens begünstigen. Zum anderen sollen aus feuerwehrtaktischen Überlegungen die Verglasungen zerstört werden. Beim gewollten Zerstören der Verglasungen durch die Feuerwehreinsatzkräfte treten bei den modernen Verglasungen jedoch immer mehr Probleme auf, da diese nicht ohne weiteres zerstört werden können. Hierdurch kann der Außenangriff für die Brandbekämpfung und Rettung deutlich erschwert werden.

Pulm [1999] beschreibt einen Brand- und Löschversuch der Berufsfeuerwehr Karlsruhe und der Forschungsstelle für Brandschutztechnik. Bei diesem Versuch kommen Fog Nails zum Einsatz, deren Wirkungsweise im Nachfolgenden näher beschrieben wird (**siehe Bilder 8.1** und **8.2**). Brandbekämpfung auch bei geschlossenen Türen und Fenstern ist ein Vorgang, den man bisher nur von stationären oder halbstationären Löschanlagen kennt. Mit Hilfe des Fog Nails ist es möglich, Löschwasser durch geschlossene Türen und Fenster, durch Wände und Decken in den Brandraum zu befördern. Im Beitrag wird über die Arbeitsweise, die Leistungsfähigkeit und die möglichen Einsatzgebiete des Fog Nails berichtet. Jede geschlossene Tür trägt dazu bei, Feuer und Rauch zurückzuhalten. Wird eine Tür geöffnet, hinter der sich Rauchgase aufgebaut haben bzw. hinter der es brennt, kommt es zwangsläufig zu einer ungewollten Verschärfung der Situation. Auch wenn sich durch den rechtzeitigen und fachgerechten Einsatz technischer Geräte wie Hochleistungslüfter einiges kompensieren läßt, muß es das Ziel sein, geschlossene Türen im Zuge der Brandbekämpfung nicht zu öffnen. Der

Autor betont, daß es sicherlich richtig ist, auf eine Brandbekämpfung zu verzichten bzw. die Brandbekämpfung zu verzögern, wenn sich dadurch der vom Brand verursachte Gesamtschaden reduzieren läßt. Dennoch drängt sich die Frage auf, ob es nicht möglich ist, beide Ziele parallel zu verfolgen - durch rasche und qualifizierte Brandbekämpfung bei geschlossener Tür.

Der Fog Nail ist eine Art Löschlanze, bei der an der Spitze Wasser in fein verteilter Form austritt. Dieser wird über einen D-Schlauch mit Wasser versorgt. Die Einspeisung erfolgt mit der herkömmlichen Feuerlöschkreiselpumpe des Fahrzeuges. Der Wasserdurchfluß beträgt ca. 70 l/min bei 8 bar. Für die Anwendung als Löschgerät wird der Fog Nail durch ein vorbereitetes Loch (Durchmesser: 17,5 mm) in den Brandraum eingebracht. Das Loch kann mit einem Bohrer geschaffen werden. Durch dünne Hindernisse wie z.B. Holztüren, Autobleche usw. kann der Nagel auch mittels Hammerschlägen getrieben werden.

Es werden zwei Arten von Fog Nails angeboten, die sich durch ihr Sprühbild unterscheiden. Dieses Sprühbild wird durch die unterschiedliche Anordnungen der Austrittsöffnungen in der Düse erreicht. Bei der Variante „Restrictor“ entsteht ein Wasserfächer. Er dringt nur 2 m weit in den Raum ein und deckt eine Breite von 5 m ab. Er ist vom Sprühbild und von der Anwendung her mit dem Hydroschild vergleichbar. Dieser eignet sich nicht, um gezielt Löschmittel auf den Brandherd zu bringen. Bei der Variante „Attack“ ergeben die Wasserstrahlen einen Kegel, der 8 m tief in den Raum eindringt und eine Breite von maximal 3 m abdeckt. Die Wasserverteilung ist nicht so ganz fein wie bei der erstgenannten Variante.

Die Löschwirkung des Fog Nails beruht auf zwei Effekten. Neben dem für das Löschmittel Wasser typischen Kühleffekt wird die sauerstoffverdrängende (erstickende) Wirkung des sich schlagartig bildenden Wasserdampfes angegeben.

Im Ausland ist der Fog Nail schon länger bekannt. Er findet sich in amerikanischen Ausbildungsunterlagen für Feuerwehren in vielfachen Anwendungen und wird seit Jahren auch in Skandinavien, Israel und anderen Ländern eingesetzt.

Ziele, die mit dem Fog Nail erreicht werden sollen:

- Rauchschäden vermeiden:

Das Öffnen einer Tür sorgt für eine verstärkte Ausbreitung von Rauchgasen. Diese können

Rettungswege unpassierbar machen und den Angriff der Feuerwehr erschweren. Schadstoffe, die am Ruß gebunden sind, lagern sich auf den Oberflächen von Einrichtungsgegenständen, Wänden usw. ab und führen zu hohen Sachschäden, Sanierungskosten und langen Ausfallzeiten. Wann immer es möglich ist, im Brandfall eine Tür geschlossen zu halten, so ist dies von entscheidendem Vorteil.

- Schnelle Stabilisierung der Lage:

Wenn es gelingt, mit Hilfe eines oder mehrerer Fog Nails die Lage zu stabilisieren, so kann mehr Zeit investiert werden, um einen effektiven und qualifizierten Angriff planen und durchführen zu können. „Stabilisierung der Lage“ bedeutet in diesem Zusammenhang:

- eine deutliche Absenkung der Temperatur im Brandraum und damit
- eine Reduzierung der Beanspruchung von Bauteilen
- eine Verlangsamung der Reaktionsgeschwindigkeit
- eine Reduzierung der Abbrandrate
- ein Unterbinden des Flammenaustritts aus dem Fenster und damit
- die Verhinderung einer Brandausbreitung u.a. über die Außenfassade

Das Löschmittel Wasser nimmt in flüssiger Form je Kilogramm eine Energie von 4,2 kJ auf, wenn es um 1 Grad erwärmt wird. Beim Übergang in den gasförmigen Aggregatzustand (verdampfen) bindet ein Kilogramm Wasser 2258 kJ. Wenn es gelingt, Löschwasser so einzusetzen, daß ein möglichst großer Anteil verdampft, lassen sich mehrere Effekte erzielen. Dem Feuer kann bereits bei Zugabe von wenig Wasser viel Wärme entzogen werden. Gleichzeitig kann das zugegebene Wasser in Form von Dampf den Raum verlassen, Wasserschäden können minimiert werden. Um einen hohen Verdampfungsgrad zu erreichen, muß das Wasser in möglichst fein verteilter Form in die heiße Zone des Brandraumes gelangen.

Diese Erkenntnis ist nicht neu, sie wird bei vielen modernen Löschverfahren (Hochdruck-, Impulslöschverfahren) genutzt. Allerdings birgt die rasche Verdampfung des Löschwassers bei diesen Verfahren ein nicht unerhebliches Verletzungsrisiko für die eingesetzten Kräfte. Verbrühungen durch Wasserdampfeinwirkung wurden nicht selten beobachtet. Wegen der geringen Wurfweite des fein verteilten Wassers sind ausreichende Sicherheitsabstände nur schwierig einzuhalten. Aus diesen Gründen gelang den Verfahren mit Wassernebel bis heute nicht der Durchbruch.

In früheren Versuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik in Karlsruhe, bei denen z.B. mit Dampfstrahlgeräten (Hochdruckreinigern) gearbeitet wurde, war festzustellen, daß kein nennenswerter Löscherfolg eintritt, wenn nicht genügend Wasser pro Zeiteinheit in den Raum gelangt. Es kam bei den Versuchen zwar im Bereich der Austrittsstelle des Wassernebels zu einer guten Löschwirkung, jedoch erfolgten sofort Rückzündungen, wenn der Nebelstrahl in einen anderen Bereich des Raumes gerichtet wurde.

Voraussetzung für einen erfolgreichen Löschangriff mit Wassernebel ist demnach, dass dem Feuer im Raum insgesamt soviel Energie entzogen wird, dass es zu einer nachhaltigen Störung des Verbrennungsprozesses bis hin zum endgültigen Löscherfolg kommt. Gleichzeitig muss der Schutz der eingesetzten Kräfte gegen den sich bildenden Wasserdampf gewährleistet sein. Wenn dies gelingt, lassen sich mit geringen Wassermengen ohne jeden Zusatzstoff sehr gute Löscherfolge erzielen und Wasserschäden vermeiden.

Das Öffnen einer Tür zum Brandraum birgt für die eingesetzten Kräfte erhebliche Risiken. Stichflammen und eine intensive Wärmestrahlung bedrohen die Feuerwehrleute beim Öffnen der Tür und bei den Löscharbeiten. Der Brandrauch, der über die Feuerwehrleute hinwegzieht, ist sehr heiß und sorgt für eine zusätzliche Belastung durch Wärmestrahlung von oben. Er enthält zudem brennbare Pyrolyseprodukte, die über den Einsatzkräften durchzündenden (Rollover) können.

Wenn es also möglich ist, das Löschmittel in den Raum zu befördern, ohne hierzu die Tür öffnen zu müssen, so ist dies ein deutlicher Sicherheitsgewinn bei jedem Brandeinsatz. In diesem Fall ist es auch gefahrlos möglich, einen Löschangriff mit Wassernebel durchzuführen, da die intakte Tür die Gefährdung durch freiwerdenden Wasserdampf ausschließt. Bei Bränden in besonderen Objekten wie z.B. in Laboratorien, in denen mit biologischen Agenzien oder radioaktiven Stoffen umgegangen wird, gewinnt dieser Sicherheitsaspekt zusätzlich an Bedeutung.

Versuchsaufbau:

In dem Brandraum mit einer Fläche von 25 m² wurde ein „Wohnzimmer“ mit Couch, Sessel, Tisch, Schränken usw. eingerichtet (Gesamtmasse der brennbaren Stoffe im Raum: 730 kg) und in Brand gesetzt. Der Raum verfügt über eine Fensteröffnung und eine Tür. Durch die Fensteröffnung konnten während des gesamten Versuchs Luft in den Brandraum eindringen

und Rauchgase austreten. Die Tür zum Brandraum wurde nach der Zündung geschlossen.

Speziell für diesen Versuch mit dem Fog Nail wurde ein kleines Loch neben der Tür durch die Wand des Brandraumes gebohrt. Eine Bohrung während des laufenden Versuchs schied wegen der besonderen Beschaffenheit der Wände des Versuchsraumes aus.

Versuchsablauf: Bereits 4 Minuten nach Zündung einer Zündwanne mit n-Heptan unter einem Schrank herrschte in der Ecke, in welcher der Brand ausgebrochen war, im Deckenbereich eine Deckentemperatur von ca. 950°C. Die heißen Rauchgase zogen an der Decke entlang. Alle brennbaren Stoffe im Raum wurden - ausgehend von der heißen Rauchsicht, die ihrerseits Wärmestrahlung emittiert von oben mit Wärme beaufschlagt und thermisch aufbereitet. Pyrolyseprodukte stiegen auf und vermischten sich mit den Verbrennungsprodukten. Bereits 5 - 6 Minuten nach der Zündung kam es zum Flashover. Dichter schwarzer Rauch drang aus dem Fenster, das Feuer war von außen zeitweise kaum noch zu sehen. Gelegentlich kam es zu Durchzündungen in der Rauchwolke innerhalb des Raumes. Schlagartig standen die Oberflächen der brennbaren Stoffe im Raum in Flammen. Kurze Zeit später schlugen Flammen aus der Fensteröffnung. Es kam zu Durchzündungen in der Rauchwolke auch außerhalb des Raumes. Im weiteren Verlauf nahm die Rauchentwicklung ab, meterlange Flammen schlugen an der Fassade empor. Nach 17 Minuten waren 40 % der im Raum befindlichen brennbaren Stoffe verbrannt, das Feuer voll entwickelt. Dies ist bei Brand- und Löschversuchen im realen Maßstab bei der Forschungsstelle für Brandschutztechnik das maßgebende Kriterium für den Beginn des Löscheinsatzes (siehe O.R.B.I.T.-Studie). Jetzt wurde der Befehl gegeben, das Feuer mit einem Fog Nail bei geschlossener Tür zu bekämpfen.

Phase 1: Einsatz des Fog Nail „Restrictor“

Zunächst kam ein Fog Nail mit dem Sprühbild des Wasserfächers zum Einsatz. Zu diesem Zeitpunkt herrschten an der Decke des Brandraumes Temperaturen von ca. 1000°C und in 1,50 m Höhe Temperaturen von ca. 800°C. Flammen schlugen ca. 3 m aus der Fensteröffnung.

Während der Angriffstrupp, ausgerüstet mit der bei Brandeinsätzen üblichen Schutzbekleidung unter Atemschutz, zu der Tür des Brandraumes vorging, bezog der Einheitsführer vor dem Fenster Position, um dem Angriffstrupp über Funk den Verlauf des Brandes im Raum

fortlaufend zu beschreiben. Dies erschien notwendig, da der Trupp selbst vor der geschlossenen Tür stand und keinen Einblick in den Brandraum hatte. Bereits wenige Sekunden, nachdem der Einsatz des Fog Nails begonnen hatte, ließ die Brandintensität deutlich nach. Der Austritt von Flammen aus der Fensteröffnung war innerhalb von ca. 40 Sekunden zum Erliegen gekommen. Das Feuer im Raum beschränkte sich nur noch auf einen Bereich in der Ecke gegenüber der Eingangstür (Brandausbruchsstelle). Dort brannte das Feuer auch in den folgenden Minuten anscheinend ungestört, ohne sich jedoch wieder zu einem Vollbrand entwickeln zu können. Der eingesetzte Fog Nail war offensichtlich nicht in der Lage, den Brand vollständig zu löschen. Allerdings war es innerhalb sehr kurzer Einsatzzeit zu einer Stabilisierung und damit zu einer entscheidenden Entspannung der Lage gekommen. In gleicher Weise konnte die Gefährdung durch einen Flammenüberschlag über die Außenfassade reduziert werden. Erstaunlicherweise strömte in dieser Phase fast kein sichtbarer Rauch aus der Fensteröffnung. Der weitere Abbrand erfolgte mit heller Flamme, die Sichtverhältnisse im Raum auf den Brand waren sehr gut.

Innerhalb von 4 Minuten waren die Temperaturen im Deckenbereich des Brandraumes auf 400°C - 500°C abgesunken. Die höchsten Temperaturen wurden noch oberhalb der Brandausbruchsstelle an der Decke gemessen, in dem Bereich, wo das Feuer scheinbar ungehindert brennt. In 1,50 m Höhe betrug die Temperatur noch 300°C. Im weiteren Verlauf der Löschmittelzugabe über diesen Fog Nail wurde keine weitere Temperaturabsenkung erzielt. Die Temperatur ließ sich jedoch konstant bei 300°C - 500°C halten. Als nach ca. 7-minütigem Einsatz der erste Fog Nail zurückgenommen wurde, um den Einsatz des anderen Fog Nails vorzubereiten, stiegen die Temperaturen im Raum rasch wieder an. Durch die Fensteröffnung war zu beobachten, dass sich der Brand fast schlagartig wieder im Raum ausbreitete. Hieraus lässt sich schließen, dass die Holzmöbelstücke trotz der permanenten Wasserzugabe, über mehrere Minuten, zumindest in Bereichen völlig trocken geblieben waren.

Besonders bemerkenswert in Hinblick auf die gesteckten Ziele ist auch der Blick in den Flur vor dem Brandraum, wo der Angriffstrupp eingesetzt ist. Statt auf dem Boden liegender Feuerwehrlaute, die einer starken Wärmestrahlung ausgesetzt sind und über deren Köpfen sich dichter, schwarzer Rauch ausbreitet, stehen dort zwei Einsatzkräfte fast gelangweilt aufrecht vor der Tür. Neben der Tür steckt der Fog Nail in der Wand und muss noch nicht einmal gehalten werden. Über den Feuerwehrlauten hat sich eine leichte Rauchsicht gebildet, die

in keiner Weise mit den Eindrücken vorheriger Versuche zu vergleichen ist. Die Einsatzkräfte wirken gerade in der Anfangsphase etwas verunsichert, da ihnen jeglicher Einblick in den Brandraum fehlt und auch das Vertrauen in die neue Technik noch nicht gegeben ist.

Phase 2: Einsatz des Fog Nail „Attack“

Nachdem erkennbar wird, dass der „Restrictor“ das Feuer zwar deutlich eindämmen, jedoch nicht endgültig löschen kann, wird entschieden, den Fog Nail „Attack“ nach ca. 25 Minuten einzusetzen. Die Überlegung ist, diesen Nagel wegen seiner größeren Wurfweite einzusetzen, um das Wasser näher an die eigentliche Brandstelle zu bringen und den dort nach wie vor scheinbar ungestört verlaufenden Verbrennungsprozess nachhaltig zu stören. Da nur eine Angriffsleitung verlegt wurde, muss der Wasserfluss gestoppt und der Nagel ausgetauscht werden. Während dieses Vorgangs, der ca. 1 - 2 Minuten dauert, steigt die Temperatur im Brandraum rasch wieder um ca. 150 K an. Das Feuer breitet sich im Raum deutlich erkennbar wieder aus - ein weiteres deutliches Zeichen für die Wirksamkeit des ersten Nagels.

Mit Einsatz des neuen Nagels verändert sich das Bild im Brandraum schlagartig. Der hell erleuchtete Raum, in dem gut sichtbar in einer Ecke ein Feuer fast ohne Rauchentwicklung brannte, wird dunkel. Flammen sind nicht mehr zu sehen, die Rauchentwicklung nimmt jedoch zu. Die Temperaturen sinken in 1,50 m Höhe auf 80°C. Die höchste Temperatur an der Decke liegt unter 200°C.

Vor der Tür des Brandraumes steht nach wie vor der Angriffstrupp, weiterhin kaum beansprucht. Allerdings muss jetzt der Fog Nail mit einer Hand gehalten werden.

Phase 3: Nachlöscharbeiten mit dem C-Rohr

Nachdem es gelungen ist, die Lage im Brandraum ausschließlich durch den Einsatz der Fog Nails zunächst zu stabilisieren und schließlich den Brand unter Kontrolle zu bringen, wird der Versuch abgebrochen. Der Angriffstrupp dringt mit einem C-Rohr in den Brandraum ein und führt die Nachlöscharbeiten durch. Im Ernstfall wäre zu überlegen, ob für diese Nachlöscharbeiten ein Trupp durch das Fenster einsteigen sollte, um auch in dieser Phase Rauchschäden außerhalb des Brandraumes so weit als möglich zu vermeiden. Alternativ könnte auch ein Hochleistungslüfter vor der Tür zum Einsatz kommen. Die Lage im Raum ist absolut sta-

bil und kann jederzeit vom Vorraum aus beherrscht werden.

Einsatzmöglichkeiten

Fog Nails können bei normalen Zimmerbränden ebenso eingesetzt werden wie bei Keller- oder Dachstuhlbränden. Zudem bieten sie sich an, um Brände in Hohlräumen, Zwischendecken und Doppelböden abzulöschen. Sie lassen sich nutzen, um den Brand zu bekämpfen oder um eine Riegelstellung aufzubauen. Auch die Kühlung von Gasflaschen in Gebäuden ohne Personaleinsatz im Gefahrenbereich ist möglich. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit kann der Einsatz bei PKW-Bränden sein. Wenn sich z.B. bei einem Brand im Motorraum die Motorhaube nicht mehr öffnen lässt, wird ein Nagel durch die Haube geschlagen, um das Feuer bei geschlossener Haube zu bekämpfen, bzw. soweit abzukühlen, dass die Motorhaube geöffnet werden kann.

Einsatzgrenzen und Probleme

Das Löschverfahren des Fog Nails beruht auf der abkühlenden und erstickenden Wirkung des Wassers bzw. des Wasserdampfes. Die Löschwirkung kann nur auftreten, wenn das Löschmittel in heiße Zonen eingesprüht wird. Die Spitze des Nagels muss in den Brandraum hineinragen, in dem sich das Feuer schon gut entwickelt hat. Es macht keinen Sinn, z.B. bei einem Zimmerbrand den Nagel durch die Wohnungseingangstür zu treiben, obwohl der hinter der Tür liegende Flur noch nicht brennt und entsprechend kalt ist.

Die Erkenntnisse aus dem Versuch lassen vermuten, dass ein Nagel ausreicht, um einen Brand in einem Raum von ca. 20 m² Grundfläche erfolgreich zu bekämpfen (Versuchsraum an der FFB: 25 m²). Bei größeren Räumen erscheint es sinnvoll, mehrere Nägel gleichzeitig einzusetzen und dabei zu versuchen, alle Bereiche des Raumes mit Wassernebel zu beaufschlagen. Vorteilhaft ist es natürlich, wenn die Geometrie des Raumes bekannt ist und eventuell noch vorhandene Brandstellen lokalisiert und gezielt mit dem Fog Nail „Attack“ bekämpft werden können.

Der hohe Verdampfungsanteil des Wassers sorgt für eine effektive Bindung von Reaktionswärme und einen guten Löscherfolg. Bedingt durch die Tatsache, dass kaum Wasser im Raum verbleibt, bleiben die brennbaren Stoffe jedoch trocken. Dies kann zu Rückzündungen führen, wenn der Angriff zu früh abgebrochen wird. Auch dieser Effekt ist von anderen Verfahren bekannt, die auf der Basis von Wassernebel arbeiten.

Bei der Brandbekämpfung mit dem Fog Nail werden in kurzer Zeit große Mengen an Wasserdampf freigesetzt. Dieser Wasserdampf kann zu schweren Verletzungen der Einsatzkräfte führen, sofern sie sich nicht im Schutz einer Tür, einer Wand o.ä. befinden. Ein klassischer Angriff mit dem Fog Nail bei einem aktiven Zimmerbrand verbietet sich aus Sicherheitsgründen.

Die Frage, ob bei einem voll entwickelten Zimmerbrand, bei dem nicht bekannt ist, ob sich noch Menschen im Raum befinden, der Fog Nail eingesetzt werden kann, stellt sich nach Auffassung von **Pulm [1999]** nicht. Wenn ein Feuer einen Raum voll erfasst hat und die Temperaturen ein Eindringen in den Raum ausschließen, ist ein Leben in diesem Raum nicht mehr möglich. Selbst wenn man unterstellt, dass doch noch jemand im Raum lebt, so wird man die Temperaturen drastisch absenken müssen, um in den Raum eindringen zu können. Dies geschieht in jedem Fall mit Wasser. Je effektiver das Wasser eingebracht wird, je schneller es zur Abkühlung des Raumes beiträgt, umso größer ist der Anteil des verdampfenden Wassers. Somit besteht die Gefahr durch Wasserdampf für potentiell lebende Personen im Raum in jedem Fall, wenn Wasser als Löschmittel eingesetzt wird.

Nach **Pulm [2002]** dürfen Feuerwehreinsatzkräfte bei der Lagebeurteilung die Gefahren durch die Ausbreitung von Brandrauch im Gebäude z. B. durch das Öffnen von Türen nicht unbeachtet lassen, z.B. wenn es in einem Keller brennt, die Tür geöffnet wird, dabei aber anschließend ein Treppenraum mit evtl. darin befindlichem Personen verraucht. Weiterhin ist der Gesamtschaden, der durch den Löscheinsatz entsteht, zu berücksichtigen. Dieser setzt sich zusammen aus Löschwasserschäden, Rauchschäden, Sanierungs- und Entsorgungskosten, Ausfallzeiten, ökologischen Schäden und Imageverlusten usw. Selbst von einem relativ kleinen Brand wie z.B. einem Schreibtischbrand in einem Verwaltungsgebäude kann ein Rauchschaden entstehen, der den Brandschaden um ein Vielfaches übersteigt.

Pulm [2003] verweist beim Flashover u.a. auf die Warnhinweise „Flammenzungen in der Rauchgasschicht“ bzw. daß in sehr hohen Räumen (Lagerhallen etc.) die Brandausbreitung in der oberen Regalebene bereits wesentlich weiter fortgeschritten sein kann als im Bodenbereich. Bedingt durch den geringeren Abstand zur Hallendecke und damit zur heißen Zone kann der Feuerübersprung dort schon stattgefunden haben, ohne daß dies vom eindringenden Trupp sofort erkannt wird. Gleiches gilt für Zwischendecken, in denen brennbare Stoffe verbaut sind.

Beim Flashover steht dem Feuer genügend Luftsauerstoff zur Verfügung. Die brennbaren Stoffe sind thermisch aufbereitet und stehen kurz vor der Durchzündung. Um diese Durchzündung zu vermeiden, muss die im Raum befindliche Wärme abgeführt werden. Dies kann erfolgen durch:

- das Schaffen ausreichend dimensionierter Abluftöffnungen,
- die rasche Abfuhr der heißen Rauch- und Pyrolysegase, ggf. mit mechanischer Unterstützung durch den Einsatz eines Drucklüfters
- die Zugabe von Löschwasser um die Rauchgase und um die erwärmte Oberflächen abzukühlen

Wichtig ist, dass der Raum erst betreten werden sollte, wenn die Gefahr des Feuerübergangs durch geeignete Maßnahmen unterbunden worden ist. Zu beachten ist auch bei allen Maßnahmen, dass sich eine Temperaturschichtung im Raum ausgebildet haben könnte, die sich durch die Zugabe von Löschwasser zu Ungunsten des vorgehenden Trupps verändern kann. Es kann zur Umwälzung von heißen und kalten Luftschichten und damit zu einem Temperaturanstieg in Bodennähe kommen. Eine weitere Gefahr resultiert aus dem sich bildenden Wasserdampf. Wird der Löschwasserstrahl ausschließlich gegen die Decke gerichtet, kann sich im Deckenbereich ein Wasserdampfpolster ausbilden, welches die heißen Gase nach unten drückt.

2.4 Druckbehälterzerknall und BLEVE

Gressmann [2001] beschäftigt sich in seinen Untersuchungen ausführlich mit dem Phänomen des BLEVE. BLEVE ist eine Abkürzung für Boiling-Liquid-Expanding-Vapour-Explosion (Explosion sich ausdehnender Dämpfe aus einer siedenden Flüssigkeit). BLEVE beschreibt den Vorgang des Behälterzerberstens bei Tanks, die brennbare druckverflüssigte Gase enthalten und deren Wandung durch äußere Wärmequellen (Beflammung durch ein Schadenfeuer) soweit erwärmt werden, daß sie - stets oberhalb des Flüssigkeitsspiegels - aufgrund der Materialschwächung im Tankmantel und wegen des stark steigenden Innendrucks aufreißen. Die durch den Wärmeeintrag trotz des herrschenden Drucks zum Sieden gebrachte Flüssigphase des brennbaren Gases geht durch diese Druckentlastung in Sekundenbruchteilen zu etwa 30 bis 50 % in den Gaszustand über; das sich ausdehnende Gas reißt die Flüssigphase dabei als Aerosol mit. Die Gas-Aerosol-Wolke dehnt sich sehr schnell aus und verbrennt explosionsartig in einem Feuerball. Dabei wird schlagartig eine sehr große Wärmemenge freigesetzt. Die resultierende Druckwelle zerstäubt noch vorhandene Flüssigkeit, die dann ebenfalls verbrennt. Die besondere Gefährlichkeit von BLEVEs besteht darin, dass nicht vorhersagbar ist, nach welcher Zeit es zur Explosion kommt. Einige als Beispiele aufgeführte Unglücksfälle zeigen die enorme Gefährdung bei Flüssiggasexplosionen:

- Spanien, Los Alfarques, 1978: Ein mit Flüssiggas Propylen beladener Tanklastwagen stürzte auf einen unterhalb der Straße gelegenen Campingplatz und explodiert. Es starben hierbei 250 Menschen.
- Mexico-City, 1984: Ein zunächst relativ kleines Feuer löste in einem Lager für Flüssiggas eine Explosion von mindestens 20.000 t LPG (Liquefied Petroleum Gas) aus. Es waren ca. 2.000 Tote zu beklagen. Im Umkreis von 1.500 m um die Anlage herrschte totale Zerstörung.
- Sydney, 1990: Ein relativ kleiner Initialbrand an den Gasventilen einer LPG-Abfüllstation löst durch die Beflammung von LPG-Tanks mehrere BLEVEs aus.

Derartige gravierende Ereignisse sind in Deutschland aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen bei Lagerung und Transport von Flüssiggas vernachlässigbar selten. Da aber auch bei uns zehntausende von Flüssiggastanks (Inhalt bei Haustanks ca. 1.500 bis 5.000 kg), hunderttausende von Flüssiggasflaschen (Inhalt von 0,5 bis 33 kg) und vermutlich Millionen von Kleingebinden (von ca. 2 g Inhalt im Gasfeuerzeug bis 0,5 kg in Gaskartuschen für Lötlampen und Gasleuchten) in Gebrauch sind, besteht die große Gefahr, z.B. auf

einem Campingplatz, auf der Straße, in einem Baumarkt oder auf einer Baustelle einem „kleinen“ BLEVE gegenüberzustehen.

Gressmann berichtet über einen Unfall bei Dachdeckerarbeiten am Neubau eines viergeschossigen Verwaltungsgebäudes in Braunschweig. Ein unbeaufsichtigter Teerkessel, der durch mit Flüssiggas versorgte Brenner beheizt wurde, kochte über. Die Teermasse entzündete sich an der offenen Brennerflamme. Der sich entwickelnde Brand erwärmte dann die angeschlossene und weitere auf dem Dach lagernde Flüssiggasflaschen (13 Stück á 33 kg Inhalt, 2 Stück á 11 kg Inhalt). Alle Flüssiggasflaschen hatten in unmittelbarer Nähe des Brandentstehungsortes gestanden (Entfernung: 2 bis 3 m). Noch während der ersten Angriffsphase durch die Feuerwehr flog plötzlich unter ohrenbetäubendem „Orgeln“ eine 33 kg-Gasflasche mit einem 10 m langen Feuerschweif in Richtung Hauptbahnhof und schlug ca. 90 bis 100 m vom Brandgebäude entfernt auf die Straße auf. Es folgten weitere Explosionen - Teile der zerborstenen Flüssiggasflaschen wurden später auf dem Parkplatz am Hauptbahnhof knapp 260 m vom Brandgebäude entfernt gefunden. Die BLEVEs ereigneten sich in einem Zeitraum von etwa drei Minuten bis rund 30 Minuten nach der Alarmierung. Die Mehrzahl ereignete sich innerhalb von 15 min nach Alarmierung. Die maximale Ausdehnung der Feuerbälle betrug nach Augenschein und späterer Überprüfung anhand der Baumaße sowie Auswertung der Einsatzfotos, die eine Privatperson zur Verfügung gestellt hatte, bei „freien Explosionen“ 25 m bis 30 m, bei „Lenkung“ des Flammenpilzes durch Bauwerksteile bis zu 40 m. Die Dauer der beobachteten Feuerbälle betrug jeweils ca. 1,5 bis 2 s. Zur Kühlung und Brandbekämpfung wurden von der Feuerwehr u.a. B-Rohre und tragbare Wasserwerfer eingesetzt.

Gressmann gibt folgende Einsatztaktik bei drohendem BLEVE an:

Wenn Flüssiggasbehälter beflammt werden oder erheblicher Wärmestrahlung ausgesetzt sind, muß immer mit einem möglichen BLEVE gerechnet werden.

- Sicherheitsabstände zum Behälter einhalten
- Behälter kühlen, dabei Deckung ausnutzen. Unbedingt erforderliches Einsatzpersonal kann bis auf Sprühstrahlreichweite herangehen, solange Sicherheitsventile nicht ansprechen. Der obere Teil des Behälters ist besonders gefährdet.
- Initialfeuer bekämpfen und Wärmestrahlung abschirmen. Einsatz von Schaum.
Noch nicht akut bedrohte Flüssiggasbehälter schützen. Wenn möglich, Behälter bergen.
- Sicherheitsabstände nach Ansprechen von Sicherheitsventilen nicht mehr unterschreiten.

Nur noch Kühlung mit unbemannten Monitoren.

- Primäre Gefahrenzone (zweifacher Sicherheitsabstand) von allen Unbeteiligten räumen. Häuser bieten gegen die Folgen von BLEVEs nur unzureichenden Schutz.
- Sekundäre Gefahrenzone (vierfacher Sicherheitsabstand) von allen Unbeteiligten räumen.

Es sind hierbei grundsätzlich drei verschiedene Gefahren durch die Begleiterscheinungen der Explosion zu unterscheiden:

- die Gefährdung durch die thermische Wirkung des Feuerballs
- die von der Explosion erzeugte Druckwelle
- die Gefahr durch Wurfstücke

Die Gefahr der Wurfstücke ist nicht exakt berechenbar. Mit Wurfweiten auch größerer, einige Kilogramm schwerer Teile von 300 bis 600 m muß stets gerechnet werden. In einigen Fällen sollen Wurfweiten bis 800 m beobachtet worden sollen.

Im Artikel werden Sicherheitsabstände für Einsatzkräfte mit Hitzeschutzkleidung für die Einsatzfälle Druckgasflaschen, Hausversorgungsanlagen, LKW mit Anhänger und Eisenbahnkesselwagen angegeben. Gegenüber den bisher in den Ausbildungsanleitungen und Einsatzanweisungen der Bundesländer genannten Werten wurden die Sicherheitsabstände mit der Gefahr des Explodierens von Flüssiggasbehältern (BLEVEs) um einen Sicherheitszuschlag von 30 % erhöht. Hierdurch ergaben sich neue Sicherheitsabstände für Einsatzkräfte mit Hitzeschutzkleidung bei Explosionsgefahr von Flüssiggasen. Nicht berücksichtigt sind hierbei die Gefährdungen durch Wurfstücke. Die nachfolgende Zusammenstellung gibt einen Überblick über diese neuen Sicherheitsabstände.

| Behälterart | Volumen [m ³] | Größte Lagermasse [kg] | Neuer Sicherheitsabstand für Ein- satzkräfte unter Hitzeschutzkleidung [m] |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|--|
| Druckgas- flaschen | bis 0,1 | Bis 33 | 25 |
| Hausversor- gungsanlagen | bis 5 | bis 2.500 | 100 |
| LKW mit Anhän- ger | bis 26 | bis 16.000 | 200 |
| Eisenbahn- kesselwagen | bis 110 | bis 65.000 | 300 |

Feutlinske und Borsch [1994] berichten über Brandversuche an Einwegfeuerzeugen (**Bild 5.1**). Diese werden in hoher Stückzahl gefertigt. Sie werden zu Verkaufseinheiten zusammengestellt, in Gefahrgutkartons verpackt und auf Euro-Paletten gestapelt. In speziellen Hochregallagern kann es zu beachtlichen Flüssiggaslagermengen kommen. Die Gehäuse der Feuerzeuge bestehen aus einem brennbaren Thermoplast und beinhalten ein Flüssiggasgemisch mit einem Gewichtsanteil von 5,75 % Propan und 94,25 % Butan. Es besitzt bei 20°C einen Dampfüberdruck von 2bar. Die untere Explosionsgrenze liegt bei 2 Vol.% und die obere bei 8 Vol.% in Luft. Diese Art von Feuerzeugen kann thermisch durch direkte Feuerwirkung oder indirekt durch Wärmestrahlung beschädigt werden. Feuer- und Wärmeeinwirkungen führen zu Festigkeitsreduzierungen der Gehäusewandung und gleichzeitig zur Drucksteigerung im Innern des Feuerzeuges. Hierdurch versagt dann der Kunststoff, das Gehäuse wird aufgeweitet. Kurz vorher öffnete sich aber in den Versuchen oft selbsttätig das Ventil des Feuerzeugs und das Gas strömte aus. Da das nichtentzündete Gas schwerer als Luft ist, sammelt es sich am Boden und kann dort entzündet werden. Beim Ablöschen besteht hierbei die Gefahr, daß zwar das Feuer aus ist, aber immer noch Flüssiggas entweicht und wieder entzündet werden kann. Werden einzelne Feuerzeuge direkt einer Flamme ausgesetzt, so zeigen sich nach etwa 60 s unterschiedliche Reaktionen, z.B:

- Der Gehäusekunststoff brennt, es bildet sich schwarzer Rauch.
- In der Tankwand entstehen Blasen und Löcher.

- Das unter hohem Druck stehende Gas strömt mit großer Geschwindigkeit aus und kann dabei sogar den Brandherd löschen.
- Das ausströmende Gas entzündet sich zu einem etwa 50 cm großen Feuerball oder zu einer 1 bis 2 m langen Stichflamme.
- Das Feuerzeug wird durch die Rückstoßkraft des ausströmenden Gases brennend mehrere Meter weggeschleudert.

Weiterhin wurden Versuche mit Packungseinheiten zu 50 Stück mit und ohne Umverpackung gezielt einem Brandherd ausgesetzt, außerdem mehrere Verpackungseinheiten bis zu 150 Stück sowie ein großer Brandversuch mit 24.000 Stück durchgeführt. Die Tabelle in **Bild 5.1** gibt Auskunft über die unterschiedlichen Abbrandzeiten bei den einzelnen Versuchen. Bei den Versuchen hat sich gezeigt, daß die Umverpackung in Form von Wellpappkartons sowie der Stapelaufbau und die dabei entstehende Kaminwirkung die Brandausbreitung begünstigen. Beim Großversuch begann bereits nach 90 s die heftige Verbrennung mit dem Zerknall der ersten Feuerzeuge. Nach 3 min setzte bei Flammhöhen von 7 bis 8 m ein wirbelförmiger Feuersturm ein. Die Temperaturen lagen hierbei bei 1.000°C; Feuerzeuge werden bis zu 6 m geschleudert. Von den Autoren wurde ein Löschversuch während des Brandes als aussichtslos angesehen.

Pölzl [1993] beschreibt einen schweren Unfall mit einer undichten Druckgaspackung mit brennbarem Treibgas in einem Waschtischunterschrank. Das Gas-Luft-Gemisch entzündete sich vermutlich durch das „Kollektorfeuer“ des Motors einer direkt daneben aufgestellten Waschmaschine. Ein Mädchen erlitt hierdurch schwere Verbrennungen an den Beinen. Durch den auftretenden Feuerball wurden nun auch andere Druckgaspackungen erhitzt und es kam zu einem weiteren Austritt von brennbaren Treibmitteln in größeren Mengen. Bei der folgenden Explosion wurde eine Holzriegelwand um ca. 10 cm verschoben und die Verglasung der Oberlichter wurden auf einen stark frequentierten Gehsteig geschleudert. Durch den raschen Einsatz der Feuerwehr konnte die Brandausbreitung auf die übrige Wohnung verhindert werden. In der Veröffentlichung wird die Funktionsweise einer Druckgaspackung aufgezeigt sowie auf die gesetzlichen Regelungen für Druckgasbehälter eingegangen. Da der Endverbraucher häufig nicht zur Zielgruppe der diversen Verordnungen ist zu rechnen ist, wird auf die Gefahren von Druckgaspackungen im Haushalt hingewiesen. Es werden weiterhin die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Spraydosen (Druckgaspackungen) im Haushalt sowie die damit verbundenen Gefahren dargestellt. Da die meisten gängigen Druckgas-

packungen durch aufgepfropfte Ventilköpfe dichten, kann es schon bei leichten mechanischen Beschädigungen zum Ausströmen des Treibmittels kommen. Da Propan/Butan schwerer als Luft ist, sammelt es sich in Bodennähe an und kann beispielsweise durch die Inbetriebnahme eines Elektrogerätes entzündet werden. Spraydosen dürfen weiterhin keinesfalls über 50°C (z.B. durch Wärmequelle, Sonneneinstrahlung am Fenster im Haus oder in Kraftfahrzeugen) erhitzt werden. Allgemein wird angenommen, daß bei Austritt eines brennbaren Treibmittels aus einer Druckgaspackung bei einer durchschnittlichen Raumgröße eines Badezimmers die untere Explosionsgrenze nicht erreicht wird. Nur wenn dieser Gasaustritt in einem Unterschrank oder einem sonstigen einigermaßen dicht schließenden Gebilde vonstatten geht, bewegt man sich im Explosionsbereich des Propan/Butan-Gemisches. Eine geringe Zündenergie kann auch dieses Gas-Luft-Gemisch zur Explosion bringen. Der Autor kommt zu dem Schluß, daß bei Sprays grundsätzlich- sowohl aus Umweltschutz- als auch aus Sicherheitsgründen- Pumpsysteme, die ohne Treibmittel arbeiten, bevorzugt werden oder auf das ungefährlichere Treibgas Luft umgestellt werden sollte.

Bild 5.2 zeigt einige Fotos von Versuchen mit Spraydosen.

Heller und Ludwig [2001] haben eine Untersuchung des Verhaltens von Aerosoldosen mit brennbarem Treibmittel an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) beschrieben. Es wurden zwei Abbrandversuche mit Aerosoldosen durchgeführt.

In Versuch 1 wurde eine Palette mit 30 Kisten á 60 Dosen mit Deo-Spray (Aluminiumdosen, Füllung 150 ml) auf einen Holzstapel aus Holzlatten aufgesetzt und gezündet. Hierbei ergaben sich folgende Ergebnisse:

Wetter: trocken, mäßiger bis starker Wind

Max. Flughöhe der Trümmer: ca. 30 m

Max. Trümmerflugweite: ca. 40 m

Restliche (zumindest noch teilweise) gefüllte Aerosoldosen: ca. 40

Ablauf Versuch Nr.1 (siehe **Bild 5.3**)

| Zeit (min) | Ereignis |
|------------|---|
| 0:00 | Zünden des Holzstapels |
| 1:15 | vollständige Flammeneinhüllung der Palette, Bersten der ersten Verpackung |
| 1:50 | beginnender Zerfall des Kistenstapels |
| 2:00 | nahezu kontinuierliches Bersten der meisten Aerosoldosen, größte Brandheftigkeit (Feuerballdurchmesser max. 10 m) |
| 5:00 | Brandberuhigung, gelegentliches Versagen einzelner Verpackungen in unmittelbarer Nähe des Holzstapels |
| 13:30 | Bersten der letzten in näherer Entfernung befindlichen Aerosoldosen infolge Wärmestrahlung |

In Versuch 2 wurde eine Palette mit 56 Kisten á 12 Dosen mit Schmiermittel (Dosenmaterial: Feinstblech, 400 ml) auf einem Holzstapel aus Holzplatten aufgesetzt und gezündet.

Wetter: trocken, mäßiger Wind

Max. Flughöhe der Trümmer: ca. 40 m

Max. Trümmerflugweite: ca. 60 m

Restliche (zumindest noch teilweise) gefüllte Aerosoldosen: ca. 15

Ablauf Versuch Nr.2

| Zeit (min) | Ereignis |
|------------|--|
| 0:00 | Zünden des Holzstapels |
| 1:40 | vollständige Flammeneinhüllung der Palette, Bersten der ersten Verpackung |
| 2:15 | nahezu kontinuierliches Bersten der meisten Aerosoldosen, größte Brandheftigkeit (Feuerballdurchmesser max. 15 m) |
| 4:40 | nachlassende Versagenshäufigkeit, gelegentliches Versagen einzelner Verpackungen in unmittelbarer Nähe des Holzstapels |
| 7:15 | Bersten der letzten in näherer Entfernung befindlichen Aerosoldose infolge Wärmestrahlung |

Die Versuche zeigen, daß bei einem Feuer dieser Art in relativ kurzer Zeit ein heftiger Abbrand erfolgt.

Nach **Knorr [2000]** ist die Ursache des Behälter- oder Druckgefäßzerknalls das Bestreben des Treibgases, sich bei Erwärmung stark auszudehnen. Ist die Ausdehnung durch den umschließenden Behälter behindert, so kommt es zu einem Druckanstieg. Beim idealen Gas ergibt sich bei einer Temperaturerhöhung um jeweils ca. 300°C eine Druckzunahme um den Wert des Fülldruckes bei Raumtemperatur. In einer Stahlflasche, die unter Raumtemperatur z.B. mit 200 bar gefüllt wurde, herrscht bei ca. 300°C bereits ein Druck von 400 bar und bei 600°C von 600 bar. Hinzu kommt, daß der Behälter durch den Temperaturanstieg an Festigkeit verliert. Ein sehr effektiver Wärmeübergang und damit eine rasche Temperaturzunahme ist bei von unten beflamten Behältern zu erwarten. Sehr schnell kann der Druckanstieg bei verflüssigten Gasen verlaufen. Hier befindet sich der Stoff in einem Gemisch von flüssigem und gasförmigem Zustand im Druckbehälter. Je nach zulässigem Füllfaktor, angegeben in Kilogramm des verflüssigten Gases pro Liter des Flaschenvolumens, besteht über der flüssigen Phase ein mehr oder weniger großer mit Gas gefüllter Raum. Bei Temperaturerhöhung steigt zum einen der Gasdruck an, zum anderen beginnt sich die Flüssigkeit auszudehnen und den über ihr befindlichen Gasraum zu verkleinern. Dabei wirkt die Gasphase quasi als »Puffer« und sorgt dafür, daß keine übermäßigen Drucksteigerungen auftreten können. Diese Funktion kann sie aber nur solange wahrnehmen, wie noch ein kleiner Gasraum über der Flüssigphase besteht. Ab derjenigen Temperatur aber, bei der die Flüssigphase das gesamte Flaschenvolumen ausfüllt, erfolgt bei jeder weiteren Erwärmung ein überaus starker Druckanstieg, der zu einer »hydraulischen Sprengung« des Druckbehälters führt. Diese gefährliche Temperatur liegt bei vielen druckverflüssigten Gasen relativ niedrig, bei höchstzulässiger Füllmenge beispielsweise bei Propan/Butan zwischen 60 °C und 70 °C. Sehr gefährlich sind punktförmige Beflammungen oberhalb des Flüssigkeitsspiegels eines druckverflüssigten Gases. Hierbei kommt es besonders schnell zum Festigkeitsverlust des Druckbehältermaterials, da Bereiche des Behälters erwärmt werden, die im Innern nicht von der Flüssigphase benetzt und damit gekühlt werden. Ist schließlich der Berstdruck des Behälters erreicht, so kommt es zum Druckgefäßzerknall, der im Falle druckverflüssigter Gase auch als BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) bezeichnet wird. Bei einem Druckgefäßzerknall können Teile des Behälters mehrere hundert Meter weit weggeschleudert werden. Ist das Gas brennbar, so schließt sich an den Druckgefäßzerknall eine Explosion des freigesetzten Gases an. Dabei ist zu bedenken, daß druckverflüssigte Gase durch die Verflüssigung unter Druck große Gasmengen enthalten. So erhält man beispielsweise aus 1 kg Flüssiggas (Propan/ Butan) rund 500 l Gas bei Normalbedingungen (1 bar, 0°C).

Knorr [2000] empfiehlt folgende Schutz- und Gegenmaßnahmen: Der Wärme ausgesetzte Druckbehälter sind aus der Deckung heraus zu kühlen. Hierzu sind Rohre mit großer Wurfweite einsetzen, wenn möglich unbemannte Wasserwerfer. Zum Instellungbringen der Löschgeräte sollte Hitzeschutzkleidung getragen werden. Bei Ansprechen des Sicherheitsventils, Verfärbung der Behälterlackierung oder plötzlicher Verformung des Behälters besteht höchste Berstgefahr. In diesem Fall bleibt nur der sofortige Rückzug.

Der Gefahrenbereich bei Unfällen mit Brandeinwirkung auf Druckgasbehälter kann je nach Behältergröße wie bei den explosiven Stoffen bis zu 1000 Meter, bei Speicheranlagen und Binnenschiffen u.U. auch mehr betragen."

Nach **Van der Meij [1997]** bestimmen bei Spraydosen die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe sowie das jeweilige Volumen das Brandrisiko. Die entstehenden Feuerbälle die z.B. bei 500 ml Inhalt 5 bis 6 m Durchmesser betragen können und die entstehende Druckwelle stellen eine keinesfalls vernachlässigbare Gefahr für die Brandausbreitung und die Brandbekämpfung dar. Die von einem Brand betroffene Spraydosen können wie Raketen davonfliegen. Die damit einhergehenden Gefahren für die Brandausbreitung und -bekämpfung sind entsprechend hoch. Eine erhebliche Bedeutung hat die große Verbrennungsgeschwindigkeit. Z.B. dauerte die vollständige Verbrennung von vier Paletten mit Spraydosen in einem Regal nur 4 Minuten. Spraydosen bilden dann ein Brandrisiko, wenn ein Leck auftritt und das leichtentzündliche Gas und/oder übrige brennbare Inhaltsstoffe in Kontakt mit einer Zündquelle kommen bzw. Spraydosen erhöhter Temperatur ausgesetzt werden.

Bei der Gefahrenbeurteilung ist zu unterscheiden zwischen einigen wenigen Spraydosen beim Endverbraucher, der Lagerung im Supermarktregal, in Distributionszentren von Ladenketten, in Baumärkten bis hin zu großen Mengen bei Großhändlern und Herstellern.

Weiterhin muß zwischen den Spraydosen unterschieden werden: Eine mit wässrigen Produkten gefüllte Spraydose mit Luft und/oder Kohlendioxid als Treibgas bildet ein deutlich anderes Risiko als eine mit Leichtbenzin gefüllte Spraydose mit Propan/Butan als Treibgas. Weiterhin spielt das Volumen der Spraydosen eine Rolle. Je größer das Volumen, desto höher ist die Gefährdung.

Bezüglich des Brandschutzes bei der Lagerung von Spraydosen gibt es einige Richtlinien zu beachten. Bauwerke sollten aus überwiegend nicht brennbaren Baustoffen ausgeführt wer-

den. Spraydosen sollen nicht zusammen mit anderen Produkten gelagert werden; dies gilt insbesondere für leichtentzündliche Flüssigkeiten.

Aufgrund bisheriger Erfahrungen aus Schadenfällen scheidet die manuelle Brandbekämpfung im Regelfall von vornherein aus. Spraydosenlager können durch Sprinkleranlagen geschützt werden. Hierbei sind eine sehr hohe Wasserbeaufschlagung und sehr schnelle Sprinkler erforderlich. Bei Regallagern sind Regalsprinkler erforderlich. Vorrangiges Ziel ist es, das „raketengleiche“ Wegfliegen von Spraydosen zu verhindern. Hierzu können – vornehmlich bei der Lagerung in Regalen – Behälter aus Drahtgeflecht wie auch feinmaschige Trennwände beitragen. Es wird empfohlen, brennbare Materialien aus der unmittelbaren Umgebung gelagerter Spraydosen fernzuhalten oder – falls unumgänglich - doch zumindest mengenmäßig zu begrenzen. Die bisher bekannt gewordenen Untersuchungen bezogen sich auf kartonverpackte Spraydosen. Durch die Befeuchtung der Kartons ergibt sich ein Kühleffekt. Weiterführende Untersuchungen in den USA sollen den Einfluß einer Verpackung mit Schrumpffolie betrachten. Ergebnisse hierzu sind jedoch noch nicht bekannt.

Als weitere Schutzmaßnahmen bieten sich der Einsatz von Sprühwasserlöschanlagen, Kohlendioxid, Inergen, Wassernebel oder Schaum an. Jede spezifische Anwendung muß jedoch vor ihrer praktischen Anwendung geprüft werden.

Der Autor kommt u.a. zu folgenden Schlußfolgerungen:

- Spraydosen, die von einem Brand betroffen werden, können beträchtliche Explosionen verursachen und zu beschleunigter Brandausbreitung beitragen
- Manuelle Brandbekämpfung in größeren Räumen, in denen Spraydosen lagern, wird als äußerst risikoreich betrachtet und hat wenig Aussicht auf Erfolg. Für kleine Lagermengen ist ein separates Lager unbedingt anzuraten, wenn nicht ohnehin eine automatische Löschanlage bevorzugt wird.
- Zum Brandschutz größerer Lagermengen von Spraydosen ist eine automatische Löschanlage dringend notwendig. Ein allgemein erprobtes Konzept für Spraydosen in Kartons beruht auf einer Sprinkleranlage, die vorzugsweise mit Behältern aus Drahtgeflecht wie auch mit derartigen Trennwänden kombiniert werden sollte.
- Spraydosen verschiedener Klassen bedingen unterschiedliche Brandschutzmaßnahmen. In Zweifelsfällen sollte man sich an der höchsten Klasse orientieren.

- Auch eine Leichtschäum-Löschanlage kann imstande sein, einen Brand in bestimmten Lagerkonfigurationen von Spraydosen unter Kontrolle zu bringen. Allerdings sind hierbei die Schaumkonzentration, Schaumgeneratortyp, Füllgeschwindigkeit und Auslösezeitpunkt von großer Bedeutung.
- Durch Brandeinwirkung können Spraydosen explodieren und beträchtlichen Überdruck verursachen. Bei kleinen Räumen oder auch Stahlschränken ist daher eine Druckentlastung nach außen oder eine drucksichere Konstruktion wünschenswert. Auch kleinere Räume sollten geschützt werden, z.B. durch eine einfache Sprinkler- oder Schaumlöschanlage.

Widetschek [1989] geht ebenfalls auf die mit Spraydosen verbundenen Brandrisiken ein. Durch das Verbot von vollhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) als Treibgas in Druckgaspackungen wird in vielen Fällen von der einschlägigen Industrie Ersatz der FCKW durch andere Flüssiggase, wie Propan/Butan, angestrebt. Durch die Brennbarkeit von Propan und Butan sind nicht nur zusätzliche Risiken bei der Erzeugung, sondern auch bei der Lagerung und Verwendung von Druckgaspackungen erforderlich. Spraydosen stellen geschlossene Behälter aus Aluminium- oder Eisenblech dar. Aluminium-Dosen sind in der Regel als Monoblockbehälter ausgeführt. Die Nähte der Dosen aus Stahlblech sind geschweißt oder weich gelötet. In speziellen Fällen werden Glasbehälter und Aerosolbehälter aus Kunststoff verwendet. Die Behälter besitzen ein Volumen bis zu 1.000 cm³. Die flüssige Füllungsphase besteht aus brenn- oder nichtbrennbaren Lösungsmitteln, gelöstem Wirkstoff und verflüssigtem brennbarem oder nichtbrennbarem Treibgas. Im Hohlraum darüber befindet sich Treibgas. Der Autor beschreibt Versuchsanordnungen sowohl von Einzelexperimenten als auch bis zum Massenversuch mit bis zu 1.000 Druckgaspackungen durchgeführt (siehe auch **Bild 5.2**). Bei den Brandversuchen konnte folgendes festgestellt werden:

- Aerosoldosen ohne brennbaren Inhalt können bei Brandeinwirkung zerreißen, wobei in bestimmten Fällen scharfkantige Bruchstücke entstehen können.
- Spraydosen mit brennbarem Inhalt zerreißen unter der Bildung eines Feuerballs, welcher bei herkömmlichen Produktgrößen einen Durchmesser von einigen Metern erreichen kann.
- Bei insgesamt 5.000 Spraydosen wurden Untersuchungen im Hinblick auf die Rißformen der Dosen angestellt. Bei 46% fehlte der Deckel, bei 32 % der Boden und insgesamt 6% der Dosen waren seitlich aufgerissen. Bei rund 16% der Druckgaspackungen brannte das Ventil ab, wobei es zu einer Ausgasung aus dem Behälter kam.

- Vor allem bei brennbaren Wirkstoffen können die Dosen bzw. ihre Bruchstücke mit großer kinetischer Energie wegfliegen und Reichweiten bis zu 40 m erzielen. Bei Versuchen im Brandhaus wurde in bestimmten Fällen auch das Durchschlagen von leichten Deckenkonstruktionen festgestellt.
- Bei Großversuchen ergab sich ein kettenreaktionsartiger Zerknall der Dosen, wobei Feuerbälle bis zu 30 m und mehr entstanden.
- Brandversuche in Räumen ergaben bei direkter Feuereinwirkung auf die Sprays zerstörerische Vollbrände innerhalb weniger Minuten. Bei einer Entfernung zwischen Brandstelle und Lagerung von nur wenigen Metern waren die Auswirkungen nicht so groß und in erster Linie die in der obersten Lageretage vorhandenen Druckgaspackungen gefährdet.

Fischer [2003] berichtet über den Brand eines Rettungswagens (RTW) des Bayerischen Roten Kreuzes (BRK). Als die Einsatzkräfte der Feuerwehr an der Einsatzstelle eintraf, stand der Rettungswagen bereits im Vollbrand. Während der Lageerkundung erfährt der Fahrzeugführer von der Besatzung des Rettungswagens, daß sich im RTW mindestens zwei 10-Liter – Sauerstoffflaschen und eine Drei-Liter-Flasche befinden. Nach dem Löschbeginn bildete sich eine sehr helle Flamme am Heck des RTW und Sekunden später zerbarst eine der beiden großen Sauerstoffflaschen. Sie riß das Dach des RTW ab und schleuderte es etwa 10 m durch die Luft. Die Flasche landete etwa 30 m entfernt in einer Böschung. Die Feuerwehr setzte den Löschangriff fort, um eine schnellere Abkühlung zu erreichen und so eine Druck-erhöhung in den verbleibenden Sauerstoffflaschen zu unterbinden.

Nach **Herterich [1980]** verursacht das Besprühen eines Flüssiggas-Behälters mit Wasser in den meisten Fällen eine Verstärkung der Gasfreisetzung und sollte daher nur bei unmittelbarer Bedrohung des Behälters durch Flammeneinwirkung angewendet werden. Beim Niederschlagen von giftigen wasserlöslichen Dämpfen (z.B. Ammoniak, Chlor, Phosgen) mit Sprühstrahl ist unbedingt zu beachten, daß der Druckbehälter nicht vom Wasser getroffen und dadurch „aufgeheizt“ wird. Im Zweifelsfall ist durch vorsichtiges Besprühen des Behälters der Flamme bzw. der Gasausströmung zu prüfen, ob es sich wirklich um Kühlen und nicht Aufwärmen handelt.

2.5 Weitere Brandphänomene

Kurz erwähnt sollen zwei weitere Phänomene die auch im Hausbereich auftreten können.

Nach **Knorr [2000]** ergeben sich neben der Gefährdung durch Explosionen von festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen im Hausbereich weitere Risiken erheblichen Umfangs:

- die Gefahr, daß es z.B. bei Dachböden mit zum Teil erheblichen Staubmengen zu einer **Staubexplosion** kommt. Der Autor betont hierbei, daß der Einsatz des Vollstrahles vermieden werden sollte, um das Aufwirbeln einer zündfähigen Staubwolke zu verhindern.
- die Gefahr einer **Fettexplosion**. Hierzu kommt es, wenn Wasser auf über 100°C erwärmtes Fett oder Öl gegossen oder gespritzt wird. Das Wasser, dessen Dichte größer als die der Öle und Fette ist, dringt in tiefer Schichten ein und wird dabei sehr rasch auf die Temperatur der umgebenden Flüssigkeit (also über 100 °C) erhitzt. Dabei verdampft das Wasser- nach einem kurzzeitig möglichen Siedeverzug- schlagartig, wobei aus 1 Liter Wasser rund 1.700 Liter Wasserdampf entstehen. Diese gewaltige Volumenvergrößerung schleudert die heiße Flüssigkeit aus dem Behälter heraus, wobei es meist zu einer feinen tröpfchenförmigen Verteilung kommt. Die bis zu mehreren Metern umherspritzende heiße Flüssigkeit stellt eine erhebliche Verbrennungsgefahr dar. Noch eindrucksvoller ist eine Fettexplosion, wenn das Wasser in bereits brennende Öle oder Fette gespritzt wird. Dann kommt es zu einem schlagartigen Abbrennen der ausgeschleuderten Flüssigkeitströpfchen. Der auftretende Feuerball kann leicht Ausmaße von mehreren Metern Durchmesser und 10 bis 20 m Höhe annehmen (siehe **Bild 6**).

2.6 Nennung weiterer spezieller Risiken

Die bisherigen Darstellungen haben gezeigt, wie wichtig eine schnelle Brandmeldung und eine ebenso schnelle und effektive Brandbekämpfung durch die Feuerwehreinsatzkräfte ist.

Ausreichende bauliche Brandschutzmaßnahmen wie feuerbeständige Wände und Decken etc., anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen wie Brandmeldeanlage, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen und ortsfeste automatische Löschanlagen sind bedeutende Werkzeuge, um bereits vor dem Feuerwehreinsatz die Alarmierung und wirksame Brandbekämpfung einzuleiten.

Allerdings gibt es aber Fälle, wo Feuerwehreinsatzkräfte, -geräte und Löschmittel nicht in ausreichender Anzahl, Menge und Schnelligkeit vor Ort sein können und zudem fehlende bauliche und anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen den Personen- und Sachschutz nicht gewährleisten.

Einige Beispiele können Straßen-, Eisen- und U-Bahntunnels, Bergbahnen, Berg- und Schutzhütten (siehe auch **Kunkelmann [2003]**) sein.

Hierbei ist die Erstellung eines brandschutztechnischen Gesamtkonzeptes zu erstellen, die über die jeweilige Nutzung Schutzziele vereinbart. Hieraus ergibt sich dann die Bemessung von baulichen, anlagentechnischen, betrieblichen, organisatorischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen.

3. ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen hatten zum Ziel, die Unterschiede zwischen Flashover, Backdraft, Rollover, Druckbehälterzerknall und BLEVE und dies insbesondere im Hinblick auf die Gefährdung von Feuerwehreinsatzkräften darzustellen.

Insbesondere mit dem Oberbegriff Flashover werden fälschlicherweise einige der obengenannten Phänomene bezeichnet, wobei deutlich wird, daß zwischen dem im Deutschen als Rauchexplosion bezeichneten Backdraft, dem Rollover und dem Flashover in der Entstehung und Auswirkung gravierende Unterschiede bestehen.

Ein **Backdraft** tritt auf, wenn brennbare Dämpfe, die im Brandbereich entstanden sind, aufgrund von Sauerstoffmangel und 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 bei Vorhandensein einer Zündquelle können diese brennbaren Dämpfe wieder gezündet werden und verbrennen dann schlagartig mit dem Erscheinungsbild einer Verpuffung. Als Zündquellen kommen im Brandraum herrschende hinreichend hohe Temperatur, Bereiche mit Flammenbildung oder glimmende Bereiche in Betracht. Besondere Gefährdung ergibt sich durch die Druckbelastung für den menschlichen Körper und für Gebäudeteile wie z.B. Fenstern und Türen. Der Backdraft wird oft von einem austretenden Feuerball begleitet und bewirkt, daß z.B. Fensterscheiben zerstört werden, Türen aus dem Rahmen gedrückt werden und deren Teile und Glassplitter anschließend in der Umgebung umherfliegen.

Bei einem Backdraft handelt es sich nicht um eine Explosion im eigentlichen Sinne, sondern um eine Verpuffung. Bei einer Verpuffung beträgt der Druck weniger als 0,01 MPa (0,1 bar). Bereits bei diesen kleinen Drücken entstehen schwere Schäden an Bauwerksstrukturen.

In der Praxis werden verschiedene Erscheinungsformen des Backdrafts unterschieden:

- Einfacher Backdraft:

Nach der Zündung folgen Flammenfront u. Druckwelle dem Weg der Zuluft und schlagen aus Lüftungsöffnungen.

- Verlagerter Backdraft:

Zündfähige Gemische befinden sich in einem anderen Raum, während der ursprüngliche Brandraum durch Querlüftung frei von zündfähigen Gasen ist. Bei Vorhandensein einer Zündquelle erfolgt im anderen Raum eine Verpuffung.

- Umgekehrter Backdraft:

Befinden sich Schwel- u. Pyrolysegase oberhalb der Zündtemperatur, erfolgt bei Kontakt mit Luftsauerstoff unmittelbar eine Zündung. Die Flammenfront folgt dem Weg der Zuluft von der Öffnung in den Raum hinein.

- Verzögerter Backdraft:

Explosionsfähiges Gemisch wird aufgrund einer fehlenden Zündquelle nicht sofort gezündet. Nach Abkühlung sinkt dieses Gemisch ab. Wird z.B. bei Aufräumarbeiten durch Einsatzkräfte ein Glutnest aufgewirbelt, erfolgt eine Verpuffung. Die besondere Gefahr ist hierbei, daß sich die Personen im Zentrum der Verpuffung befinden.

Es gibt kein sicheres Anzeichen für einen bevorstehenden Backdraft. In den meisten Fällen ist die Gefährdung unmittelbar nach dem Öffnen eines Brandraumes am größten.

Folgende 4 Anzeichen deuten auf einen bevorstehenden Backdraft hin: (Diese können einzeln, kombiniert oder auch alle zusammen vorher zu beobachten sein, jedoch kann hieraus keine Gesetzmäßigkeit abgeleitet werden.)

- Über lange Zeit unentdecktes oder ungestörtes Brandgeschehen.
- Heiße Türklinken bzw. -blätter und/oder heiße Fensterscheiben.
- Mit Brandrauch beschlagene Fensterscheiben oder Brandrauch quillt stoßweise aus Tür- und Fensterspalten.
- Luft wird nach dem Öffnen einer Tür in den Raum gesaugt.
- Ungewöhnliche, gedämpfte Geräusche

Ein weiteres Brandphänomen bildet der **Rollover**. Dieser kann wie folgt charakterisiert werden:

Beim Öffnen einer Tür oder eines Fensters können sich Rauchgase mit brennbaren Bestandteilen in den Nachbarräum z.B. auch den Flur ausbreiten und zu einer Durchzündung in Form einer Stichflamme führen und damit „die Feuerwehreinsatzkräfte überrollen“.

Dieses Phänomen wird in der Literatur wie folgt beschrieben:

- Überhitzte zündfähige Brandpyrolysegase und -dämpfe bilden eine Rauchschiicht im Deckenbereich (Brandpyrolysegase und -dämpfe können unsichtbar (farblos) sein).
- Durchzündung der Rauchschiicht (häufig Stichflamme) erfolgt ohne signifikanten Druckanstieg bei gerade ausreichender Sauerstoffzufuhr.
- Nur die Brandpyrolysegase und -dämpfe brennen, nicht die Raumeinrichtung (mit Ausnahme des Brandherdes).

Wie die Literaturuntersuchungen gezeigt haben, gibt es bisher noch keine vollständige verbrennungstechnische Beschreibung des Phänomens Rollover.

Der eigentliche **Flashover** tritt auf, wenn sich in einem Raum die Oberfläche des brennbaren Materials durch Wärmestrahlung aus den Flammen und aus der heißen Rauchgasschiicht unterhalb der Decke soweit aufgeheizt hat, daß flächendeckend brennbare Pyrolysegase und -dämpfe kurzfristig und in großer Menge entstehen. Es kommt zu einer Rußanreicherung und Sauerstoffverringernng, verbunden mit einem kurzfristigen Temperaturabfall. Hierbei geht der Brand von einem brandlastgesteuerten zum ventilationsgesteuerten Brand über. Bei eingeschränkter Sauerstoffzufuhr in den Brandraum wächst die Konzentration der bei der Pyrolyse produzierten brennbaren Gase und von Kohlenmonoxid in der Rauchschiicht trotz vorhandener Zündquelle über die obere Zündgrenze an. Es bilden sich Flammenzungen („dancing angels“) an der Grenzschicht Rauch/Luft wo ein zündfähiges Konzentrationsverhältnis vorliegt. Je nach den geometrischen Verhältnissen (Größe und Höhe des Brandraumes, Größe und Höhe der Raumöffnung) pendelt die neutrale Zone zwischen dem Überdruck im Rauchgas und dem Unterdruck in der bodennahen Zuströmung schneller oder langsamer um die Öffnungsoberkante. Der Brand pulsiert und der Rauch wird stoßweise aus dem Brandraum gedrückt („Lokomotiveneffekt“). Mit der im Raum vorhandenen Luft bilden die brennbaren Gase ein zündfähiges Gemisch, das durch die vorhandenen Flammen oder durch andere Zündquellen gezündet wird. Liegt die neutrale Zone über der Öffnungsoberkante, ergibt sich die maximale Frischluftzufuhr, der Brand wird angefacht und produziert Rauchgase. Dies hat zur Folge, daß der Druck in der Rauchschiicht gesteigert wird. Die Rauchschiicht-Unterkante fällt unter die Öffnungs-Oberkante und Rauch verläßt den Brandraum. Der Öffnungsquerschnitt für die Frischluftzufuhr wird hierdurch verkleinert und die Brandintensität dadurch verringert. Es werden nun weniger Rauchgase produziert, der Druck

in der Rauchsicht fällt wieder und die neutrale Zone steigt über die Öffnungs-Oberkante. Nach dem Flashover brennt in der Regel das gesamte im Raum befindliche brennbare Material, es kommt zur Durchzündung des gesamten Raumes. Als Temperaturkriterium für das Auftreten eines Flashovers wird häufig ein Wert zwischen 500°C bis 600°C in der Rauchsicht (Deckenbereich) und ein Wärmestrahlungskriterium von ca. 20 kW/m² im Bodenbereich angenommen. Durch frühzeitige Abkühlung der Rauchgase (Löscheinsatz) wird die Gefahr eines "Flashovers" durch die Eindämmung der Pyrolyse erheblich verringert.

Vorboten eines bevorstehenden Flashovers sind

- Starke Rauchentwicklung (massiver, geballter Brandrauch jeglicher Farbe, der einen Brandraum unter hohem Druck verläßt).
- Evtl. Flammenzungen im Rauch an der Grenzschicht zwischen Rauch- und Luftzone und beim Verlassen des Rauches aus dem Brandraum.

Einflußfaktoren für die Entstehung eines Flashovers sind:

- Art, Zündverhalten, Heizwert, Menge und Anordnung der Brandlast
- Geometrie des Raumes
- Ventilationsbedingungen (z.B. Größe von Tür- und Fensteröffnungen)
- Thermische Eigenschaften von Wänden, Decke und Fußboden

Die Auswertung der in- und ausländischen Literatur als auch von an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Brandversuche haben gezeigt, daß der Flashover im Mittel aller aufgeführten Werte bei ca. 7 min auftritt. Dabei ergeben sich bei unterventilierten Bränden längere, bei ausreichend ventilierten Bränden (offene Türen bzw. Fenster) noch weitaus kürzere Zeiten. Hiermit eng verknüpft sind schnell entstehende tödliche Sauerstoff- und Brandgaskonzentrationen beim Brand.

Ein weiteres Gefahrenpotential ergibt sich durch die Lagerung von Druckgasbehältern. Im Hinblick auf die unterschiedlichen Eigenschaften der Füllgase müssen folgende Fälle beim **Druckbehälterzerknall** unterschieden werden:

- Gase, die sich bei Normaltemperatur nicht verflüssigen lassen (z.B. Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Argon Helium) werden mit Drücken bis zu 300 bar gasförmig verdichtet und in Flaschen gefüllt. Der maximal zulässige Fülldruck ist so bemessen, daß auch eine mögliche Drucksteigerung durch intensive Sonneneinstrahlung die Flasche nicht zum Bersten bringt. Dies kann aber eintreten, wenn die Flasche durch äußeres Feuer erhitzt wurde.

*Z.B. ergibt sich bei einem idealem Gas folgender Druckanstieg bei Temperaturerhöhung:
Raumtemp.: 200 bar => ca. 300°C: 400 bar, ca. 600°C: 600 bar.*

- Gase, die sich bei Normaltemperatur durch Druck verflüssigen lassen (z.B. Propan, Kohlendioxid, Ammoniak, Lachgas) werden mit Drücken bis zu 60 bar in flüssigem Zustand in Flaschen gefüllt. Ein Behälter mit druckverflüssigtem Gas kann bersten, wenn er entweder mäßig überfüllt ist und geringfügig erwärmt wird oder normal gefüllt ist und erheblich z.B. durch Feuer erwärmt wird. In beiden Fällen bewirkt die Erwärmung eine Ausdehnung der Flüssigkeit, bis diese den Behälter vollständig füllt und der Druck der inkompressiblen Flüssigkeit den Behälter bei Überschreiten des Berstdruckes hydraulisch sprengt. Siedende Flüssigphase des Gases verdampft durch die Druckentlastung zu ca. 30 - 50 % schlagartig und reißt die noch vorhandene Flüssigphase als Aerosol mit: Es kommt zum **BLEVE**. Dieses Phänomen tritt auch auf bei unterdimensionierten Sicherheitseinrichtungen, wie Berstscheibe oder Sicherheitsventil, wenn aufgrund der Wärme einwirkung der Druck nicht ausreichend schnell abgebaut werden kann.

Z.B. beträgt die Temperatur bei Propan/Butan, ab der bei höchstzulässiger Füllmenge die hydraulische Sprengung auftreten kann 60°C bis 70°C.

Ist das Gas brennbar kommt es neben den umherfliegenden zerborstenen Teilen zur explosionsartigen Verbrennung mit Feuerball.

Die Vorhersage der Zeitdauer bis zum BLEVE ist nicht möglich.

In dieser Untersuchung wurde der Schwerpunkt auf Kleingebinde wie Gasfeuerzeuge, Gaskartuschen für Lötlampen, Gaskocher, etc., Spraydosen mit und ohne Mischkugeln gelegt, wie sie im Wohnungsbereich, in Bau-, Camping-, Super- und Drogeriemärkten, Schuhge-

schäfte, Friseurgeschäfte, Autozubehörhandel, Geschäfte für Malerbedarf etc. vorkommen können.

Die Potenzierung des Gefährdungspotentials bei Flüssiggaslägern, Tanklastwagen, LKW zum Transport von Flüssiggasflaschen, Eisenbahnkesselwagen und Binnenschiffen ist unmittelbar ableitbar und erfordert spezielle sicherheitstechnische Maßnahmen durch den Betreiber sowie Feuerwehreinsatzkräfte.

Der Gefahrenbereich kann hier bis zu 1000 Meter, unter Umständen auch mehr betragen.

Man erkennt, daß der Druckbehälterzerknall vergleichsweise bereits bei geringen Temperaturen und in sehr kurzer Zeit vorkommen kann. Einzelne Einwegfeuerzeuge haben z.B. eine Abbrandzeit von 20 – 80 s. Ereignet sich nun z.B. ein Wohnungsbrand, wird die Lage unter Umständen durch vorhandene brennbare Treibgase um ein Vielfaches verschärft. Die Feuerwehreinsatzkräfte rechnen eher selten mit dem Druckbehälterzerknall, der zusätzlich zu Rollover, Flashover oder Backdraft vorkommen kann.

Daneben können für Bewohner und Feuerwehreinsatzkräfte weitere Gefahren auftreten, Z.B.

- die Gefahr, daß es z.B. bei Dachböden mit zum Teil erheblichen Staubmengen zu einer **Staubexplosion** kommt.
- die Gefahr einer "**Fettexplosion**". Hierzu kommt es wenn Wasser auf über 100°C erwärmtes Fett oder Öl gegossen oder gespritzt wird. Das Wasser, dessen Dichte größer als die der Öle und Fette ist, dringt in tiefer Schichten ein und wird dabei sehr rasch auf die Temperatur der umgebenden Flüssigkeit (also über 100 °C) erhitzt. Dabei verdampft das Wasser- nach einem kurzzeitig möglichen Siedeverzug- schlagartig. Diese damit verbundene erhebliche Volumenvergrößerung schleudert die heiße Flüssigkeit aus dem Behälter heraus, wobei es meist zu einer feinen tröpfchenförmigen Verteilung kommt. Die bis zu mehreren Metern umherspritzende heiße Flüssigkeit stellt eine erhebliche Verbrennungsgefahr dar. Wenn das Wasser in bereits brennende Öle oder Fette gespritzt wird kommt es zu einem schlagartigen Abbrennen der herausgeschleuderten Flüssigkeitströpfchen. Der auftretende Feuerball kann leicht Ausmaße von mehreren Metern Durchmesser und 10 bis 20 m Höhe annehmen. Die Gefahr der Fettexplosion ist nicht nur im häuslichen Bereich zu sehen sondern z.B. natürlich auch bei Großküchen.

Aus den hier aufgeführten Brandphänomenen ist ersichtlich, wie wichtig die schnelle und effektive Brandbekämpfung für den Personen und Sachschutz ist.

Für den Fall, daß kein ausreichend schneller Feuerwehreinsatz möglich ist, bieten sich

- Brandmelder und Brandmeldeanlagen
- Rauchabzugsanlagen
- Automatische ortsfeste Löschanlagen (Sprinkler- bzw. Wassernebellöschanlagen)

als anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen zur Verhinderung der obengenannten Phänomene an.

Beim Einsatz der Einsatz der Feuerwehr werden verschiedene Einsatztaktiken angewendet, um die Gefahren durch Backdraft, Rollover, Flashover, Druckbehälterzerknall und BLEVE zu reduzieren.

Nachfolgend werden einige ausgewählte Taktiken aufgezeigt.

- Raumkühlung: Abkühlen der raumabschließenden Wände (insbesondere der Decke) und gezielte Erzeugung von Wasserdampf zur Verringerung der Zündfähigkeit und der Freisetzung von Brandgasen sowie weiteren Brandpyrolyseprodukten durch einen geeigneten (schmalen oder breiten) Sprühstrahl.

Hierbei hat aber ein Versuch an der Forschungsstelle gezeigt, daß durch das Spritzen an die aufgeheizte Decke beim vollentwickelten Brand (in diesem Fall mit Druckluftschäum) ein gewaltiger Feuerball aus dem Fenster austrat. Durch die enorme Volumenvergrößerung des schlagartig verdampfenden Löschwassers an der aufgeheizten Decke werden teilverbrannte Rauchgase aus jeder Öffnung des Brandraumes getrieben, übertragen dadurch das Brandrisiko auf benachbarte Nutzungen, brennbare Gegenstände und führen zu einer Gefährdung von Feuerwehreinsatzkräften, die sich z.B. auf einer Drehleiter vor der Fensteröffnung befinden. Dieser Vorgang ist fotografisch ein drucksvoll bei einem Druckluftschäumversuch am 19.7.2000 in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (siehe **Bild: 9**) dokumentiert worden.

- Brandrauchkühlung: Abkühlung und Kontraktion der Brandgase durch direkte Aufgabe eines geeigneten (schmalen oder breiten) Sprühstrahles direkt in den Rauch. Verringerung der Zündfähigkeit der Rauchschiicht und Verhinderung der Durchzündung.

Eine Absenkung der Brandrauminnentemperatur verringert auch die Gefahr eines Backdrafts, jedoch nicht in dem Maße, wie bei einem Flashover. Bei einem Backdraft ist das Erreichen des zündfähigen Gemisches (z.B. bei Kohlenmonoxid CO: UEG: 12,5 Vol.-%, OEG: 74 Vol.-%) nicht mehr von der Brandrauminnentemperatur, sondern nur noch von der Sauerstoffzufuhr abhängig (z.B. Öffnen einer Tür oder eines Fensters). Die Gefahr eines Backdrafts ist also nur durch die Minimierung von Zündquellen (Zündtemperatur CO: 605° C) verringerbbar; jedoch ist davon auszugehen, daß in dem Schwelgasgemisch auch Komponenten mit weitaus geringeren Zündtemperaturen vorhanden sind.

- Der Wärme ausgesetzte Druckbehälter sind aus der Deckung heraus zu kühlen. Entscheidend ist hierbei u.a. die gute Kühlwirkung des eingesetzten Löschmittels, was bei zerstäubtem Wasser besonders der Fall ist. Hierbei sind Rohre mit großer Wurfweite einzusetzen, wenn möglich unbemannte Wasserwerfer. Zum Instellungbringen der Löschgeräte sollte Hitzeschutzkleidung verwendet werden. Bei Ansprechen des Sicherheitsventils, Verfärbung der Behälterlackierung, Austreten von Flüssigphase oder plötzlicher Verformung des Druckbehälters besteht höchste Berstgefahr. In diesem Fall bleibt nur der sofortige Rückzug.

Da sich diese Gebinde aber auch in Wohnungen und Kellerräumen befinden können, ist höchste Vorsicht geboten. Für die Feuerwehreinsatzkräfte bedeutet dies, daß sie immer mit einem Druckbehälterzerknall rechnen müssen.

Allerdings verursacht das Besprühen eines Flüssiggas-Behälters mit Wasser in den meisten Fällen eine Erhöhung der Gasfreisetzung und sollte daher nur bei unmittelbarer Bedrohung des Behälters durch Flammeneinwirkung angewendet werden. Beim Niederschlagen von giftigen wasserlöslichen Dämpfen (z.B. Ammoniak, Chlor, Phosgen) mit Sprühstrahl ist unbedingt zu beachten, daß der Druckbehälter nicht vom Wasser getroffen und dadurch „aufgeheizt“ wird. Im Zweifelsfall ist durch vorsichtiges Besprühen des Behälters der Flamme bzw. der Gasausströmung zu prüfen, ob es sich wirklich um ein

Kühlen und nicht „Aufwärmen“ handelt.

Gerade bei einem Wohnungsbrand kann man diese Regeln nicht immer einhalten, da unter anderem auch durch evtl. starke Verrauchung die Gefahrenlage bzgl. Druckbehälterzerknall nicht gut einzuschätzen ist.

Bei den erwähnten Staubexplosionen soll der Einsatz des Vollstrahles vermieden werden, um das Aufwirbeln einer zündfähigen Staubwolke zu verhindern.

Bei einer zu erwartenden Fettexplosion darf auf keinen Fall der Vollstrahl verwendet werden. Besser ist der Sprühstrahl, noch besser ein feiner Nebelstrahl evtl. unter Zusatz von hierfür bestimmten Schaummittelzusätzen.

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, besteht beim Löschangriff das größte Problem im Öffnen einer Tür oder eines Fensters. Insbesondere ein Backdraft oder ein Druckbehälterzerknall kann eine so große Wucht aufweisen, daß selbst auf dem Boden liegende Feuerwehreinsatzkräfte durch die Feuer- und Druckeinwirkung enorm gefährdet sind. Die umherfliegenden zerborstenen Teile tun ein übriges. Durch spezielle Schutzkleidung kann die Sicherheit der Einsatzkräfte entscheidend verbessert werden.

Versuche mit dem Fog Nail an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik bei Wohnzimmerbränden haben hierbei die gute Wirksamkeit dieses Löschgerätes aufgezeigt. Das Löschwasser wird hierbei in feinverteilter Form dem Brandraum durch geschlossene Türen und Fenster, durch Wände und Decken zugeführt. Die Hauptlöschmechanismen sind hierbei Kühlwirkung und Sauerstoffverdrängung. Die Einsatzkräfte können z.B. hinter der geschlossenen Tür verharren und über Funk weitere Einsatzbefehle der draußen vor dem Fassadenbereich positionierten Einsatzkräfte abwarten. Nach dem Fog Nail Einsatz können relativ gefahrlos die weitere Brandbekämpfungs- bzw. Nachlöscharbeiten durchgeführt werden.

Ein weiteres Problem bereitet das gezielte Öffnen von Verglasungen, um einen Backdraft oder Flashover in kontrollierter Form aus einem ausreichenden Sicherheitsabstand einzuleiten und einen Außenangriff zu starten. Besonders die modernen Verglasungen aus z.B. Einscheibensicherheitsglas, Verbundsicherheitsglas etc. können für Feuerwehreinsatzkräfte ein unüberwindbares Hindernis darstellen, wenn aus der gegebenen Situation von einem Innen-

angriff abzuraten ist.

Die Untersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik in diversen Brandversuchen mit Wohnzimmereinrichtung haben gezeigt, daß der Fog Nail eine gute Möglichkeit bietet, den Brand zunächst durch geschlossene Türen und Fenster zu soweit zu bekämpfen, daß ein relativ gefahrloser Innenangriff mit dem Strahlrohr möglich ist. Es ist hierbei zunächst nur eine relativ kleine Bohrung mit einem Durchmesser unter 20 mm erforderlich, um den Fog Nail durch die Wand zu führen. Zu beachten ist hierbei allerdings, daß keine elektrischen Leitungen oder Gasleitungen in der Wand angebohrt werden bzw. daß die Strom- bzw. Gaszufuhr vorher unterbrochen wird. Insbesondere bei Druckgasbehältern ist hiermit der empfohlene Regel "aus der Deckung heraus kühlen" am besten Rechnung zu tragen.

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, kann ein Flashover selbst in einem gewöhnlichen Wohnzimmer bereits unter 3 Minuten auftreten. Auch die Tatsache, daß es im Brandfall bei der Erhitzung von Druckbehältern mit brennbarem Treibgas und evtl. sogar noch mit brennbarem Nutzinhalt wie z.B. bei Spraydosen als auch in der Küche bei einer Fettexplosion zu einer rasanten Brandausbreitung kommen kann, machen das Überdenken der Festlegung der Einsatzzeiten der Feuerwehren erforderlich. In diesem Zusammenhang sei auch auf die Untersuchungen in der **O.R.B.I.T.-Studie [1978]** verwiesen. Die **Bilder 7.1 und 7.2** zeigen einige Ergebnisse dieser Untersuchungen.

Auf die Problematik von Rauchdurchzündungsübungsanlagen mit Holzbeladung, gasbetriebenen Brandübungsanlagen etc. wurde in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. An dieser Stelle soll jedoch darauf hingewiesen werden, daß im Ernstfall mit realer Brandlast (z.B. Wohnzimmereinrichtung, Vorhänge an den Fenstern, feste glutbildende Stoffe, brennbare Flüssigkeiten, zerstörbare oder bedingt zerstörbare Verglasungen, Druckbehälter mit brennbarem Inhalt und brennbarem Treibgas) die Auswirkungen von Flammen, Wärme, Brandrauch und Druckbelastungen auf den menschlichen Körper weitaus dramatischere Folgen haben können, als dies z.B. in einer gasbetriebenen Übungsanlage simuliert werden kann. Die Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus der Übungsanlage auf den Realfall ist daher nicht gesichert. An dieser Stelle sei hierzu auf die umfangreichen Arbeiten zu der Problematik von Brandübungsanlagen des Landes Nordrhein-Westfalen und hier insbesondere der Feuerwehr Unfallkasse NRW, der AGBF NRW und des LFV NRW verwiesen.

4. LITERATURVERZEICHNIS

| | | |
|------|---|--|
| [1] | Basmer, P., Zwick, G.: [2002] | Brandversuche: Messung des Giftgascocktails bei Bränden. FFZ Feuerwehr Fachzeitschrift, 3/2002, S. 176 - 180 |
| [2] | Bechtold, R., Ehlert, K.-P., Wesche, J.: [1978] | Brandversuche Lehrte - Brandversuche an einem zum Abbruch bestimmten, viergeschossigen modernen Wohnhaus in Lehrte. Schriftenreihe "Bau- und Wohnforschung" des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Nr. 04.037, Bonn-Bad Godesberg, 1978 |
| [3] | Beyerle, G., Bez, U., Dietz, H.-L., Rauser, M., Stahl, H.W.: [1978] | Feuerwehrsystem – O.R.B.I.T. - Entwicklung eines Systems zur optimierten Rettung, Brandbekämpfung mit Integrierter Technischer Hilfeleistung. Forschungsbericht KT 7612 des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Weissach, Düsseldorf 1978 |
| [4] | Bogenberger, S., et al.: | Lexikon Medizin 3. Auflage, Verlag Urban & Schwarzenberg, München. |
| [5] | Bukowski, R.W.: [1995] | Modelling a Backdraft: The Fire at 62 Watts Street. NFPA Journal, Nov./Dec. 1995, S. 85 – 89 |
| [6] | Bussenius, S.: [1989] | Brand- und Explosionsschutz in der Industrie. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin 1989 |
| [7] | Bussenius, S.: [1996] | Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln 1996 |
| [8] | Cagliostro D.E.: [1980] | Modeling of Exposure to Carbon Monoxide in Fires. Journal of Combustion Toxicology, Vol. 7, 1980, p. 231 – 242 |
| [9] | Chitty, R.: [1996] | A Survey of Backdraught - (Management Summary FRDG Report No. 5/94), Fire Engineers Journal, Nov. 1996, S. 12 – 13 |
| [10] | Clark, W.E.: [1994] | Flashover: The sudden, silent killer Fire Engineering, June 1994, p. 26 – 29 |
| [11] | Dektar, C.: [1983] | 24 killed in Apartment Fire. Fire Engineering, January 1983, S. 44 – 45 |
| [12] | Drysdale, D.: [1996] | The Flashover Phenomenon. Fire Engineers Journal, November 1996, S. 18 – 23 |
| [13] | Ehret, Kister, Feut: [1992] | Wohnungsbrand im Sturm. Florian Hessen, 10/92, S. 8 – 10 |
| [14] | Feutlinske, K., Borsch, J.: [1994] | Das Zeug zum Feuer Gefährliche Ladung, 39. Jahrgang, Nr. 1/1994, S. 12 – 14 |
| [15] | Fischer, U.: [1997] | Dachstuhlbrand am Kurhaus. UB 12/97, S. 10 – 12 |
| [16] | Fischer, K.: [2003] | „Feuer RTW“ – Vorsicht: Explosionsgefahr bei Fahrzeugbränden. UB 9/03, S.38 |
| [17] | Fleischmann, C.M., Pagni, P., J., Williamson, R.B.: [1993] | Exploratory Backdraft Experiments. Fire Technology, Fourth Quarter, 1993, S. 298 – 316 |
| [18] | Fleischmann, C.M.: [1996] | New Zealand Backdraft and Flashover Training. Fire Engineers Journal, Sept. 1996, S. 27 – 28 |
| [19] | Fleischmann, C.M., McGrattan K.B.: [1999] | Numerical and experimental gravity currents related to backdrafts. Fire Safety Journal 33 (1999), S. 21 – 34 |
| [20] | Gojkovic, D.: [2000] | Initial Backdraft Experiments. Report 3121, ISSN: 1402-3504, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 2000, www.brand.lth.se/english/bibl/public.htm . |
| [21] | Gottuk, D. T., Peatross, M.J., Farley, J.P., Williams, F., W.: [1999] | The development and mitigation of backdraft: a real-scale shipboard study. Fire Safety Journal 33 (1999), S. 261 – 282 |
| [22] | Gressmann, H.-J.: [2001] | Auch >>kleine<< BLEVEs können Probleme bereiten! Brandschutz - Deutsche Feuerwehr-Zeitung, 6/2001, S. 549 – 553. |

| | | |
|------|--------------------------------------|---|
| [23] | Hakkarainen, T.: [2002] | Post-Flashover Fires in Light and Heavy Timber Construction Compartments Building and Transport, Fire Research, Finland Journal of Fire Sciences, Vol. 20, March 2002, p.: 133 – 175 |
| [24] | Heller, W., Ludwig, J.: [2001] | Deo-Brand. Gefährliche Lagerung, 2/2001, S. 27 – 31 |
| [25] | Herterich, H.: [1980] | Die Freisetzung von verflüssigten Gasen aus Druckbehältern. Brandschutz / Deutsche Feuerwehrzeitung 1/1980; S. 13 - 16 |
| [26] | Hommel, G.: [1999] | Handbuch der gefährlichen Güter. 9. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1999 |
| [27] | Jacobi, J.: [1998] | Training im Extrembereich. UB 4/98, S. 16 – 18 |
| [28] | John R.: [1983] | Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß. Teil 2: Optische Brandrauchdichte Forschungsbericht Nr. 50 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten. Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1983) |
| [29] | John R.: [1988] | Rauch- und Wärmeabzug bei Bränden in großen Räumen. VFDB-Zeitschrift, 1/88 |
| [30] | John R.: [2000] | Rauchfreie Treppenträume – Voraussetzungen für die Wirksamkeit von Druckbelüftungsanlagen – Bundesbaublatt, 7/2000, S. 29 – 31 |
| [31] | Klopovic, S., Turan, Ö.F.: [1998] | Flames venting externally during full-scale flashover fires: two sample ventilation cases. Fire Safety Journal 31 (1998), S. 117 – 142 |
| [32] | Knorr, H.-H.: [2000] | Die Gefahren der Einsatzstelle. W. Kohlhammer Verlag, 7. Auflage, Stuttgart 2000 |
| [33] | Kotthof, I.: [2002] | Glasfassaden – Brandausbreitung an Fassaden Vortrag beim VI. Baurecht & Brandschutz-Symposium, Frankfurt am Main, 2002, www.ziller-ass.de |
| [34] | Kunkelmann, J.: [1998] | Auswirkung des Einsatzes ortsfester Wassernebellöschanlagen auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden. Teil 3: - Literatursauswertung (Wassernebellöschanlagen - 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 Feuerwehrangelegenheiten. Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1998) |
| [35] | Kunkelmann, J.: [1999] | 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) |
| [36] | Kunkelmann, J.: [2001/1] | Verringerung der Temperaturen an Stahl-Glasfassaden im Brandfall durch thermische Entlastungsöffnungen und ortsfeste Niederdruck-Wassernebellöschanlagen. Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag der Stiftung Industrieforschung, Förderkennzeichen: Nr. S 483, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 2001 |

| | | |
|------|--|--|
| [37] | Kunkelmann J.: [2001/2] | Entwicklung und Erprobung neuartiger Löschanlagen für den mehrgeschossigen Holzbau zur Brandbekämpfung und Fluchtwegsicherung. Forschungsbericht zum Forschungsprojekt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Förderkennzeichen: 0339852, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 2001 |
| [38] | Neumann, J.: | Brand- und Explosionsschutz. Skriptum zur Vorlesung Arbeits- und Anlagensicherheit, Universität Dortmund, Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen, Lehrstuhl Umwelttechnik, 2003 |
| [39] | Kunkelmann, J.: [2002] | Einsatz von Wasserdampf-Löschanlagen zur Verhinderung der Ausbreitung von Bränden innerhalb von Treppenträumen mit Holztreppe und/oder Holzverkleidungen in die darüberliegenden Wohnungen insbesondere bei Altbauten. Teil 2: Brand- und Löschanlagenversuche Forschungsbericht Nr. 129 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2002) |
| [40] | Kunkelmann, J.: [2003] | Brandschutz / Vorsorgevorkehrungen auf Berg- und Schutzhütten. Vortrag beim 3. Internationalen Fachseminar „Umweltgerechte Ver- und Entsorgungskonzepte für Berg- und Schutzhütten“, Kloster Benediktbeuern, 2003 |
| [41] | Leibacher, D.: [1999] | Search in the modern environment. Fire Engineering, July 1999, S. 65 – 76 |
| [42] | Liang, F.M., Chow, W.K., Liu, S.D. [2002] | Preliminary Studies on Flashover Mechanisms in Compartment Fires. Journal of Fire Sciences, Vol. 29, March 2002, p. 87 – 112 |
| [43] | Mommsen, H.: [1990] | Der Gesundheits-Brockhaus. 4. Auflage, Mannheim 1990 |
| [44] | Pölzl, A.: [1993] | Schwerer Unfall mit Spraydosen. Blaulicht 2/93, S. 24 – 26 |
| [45] | Pulm, M.: [1999] | Fog Nail - Der Sprinkler für danach. Brandhilfe 10/1999, S. 345 – 352 |
| [46] | Pulm, M.: [2002] | Falsche Taktik – Große Schäden. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart 2002 |
| [47] | Pulm, M.: [2003] | Der Zimmerbrand, das unbekannte Wesen. Brandhilfe 4/2003, S. 124 - 131 |
| [48] | Riehl, J.: [2003] | Rauchgasexplosion – Vier verletzte Feuerwehrangehörige. Brandhilfe 4/2003, S. 117 - 121 |
| [49] | Shields, T.J., Silcock, G.W.H., Hassani, S.K.S.: [1997/1998] | Behavior of glazing in a large simulated office block in a multi-story building. J. Applied Fire Science, Vol. 7(4), 1997 - 98, S. 333 – 352 |
| [50] | Shipp, M.: [2002] | Keeping the home fires burning. Fire Engineers Journal, Fire Prevention, February 2002, S. 15 - 16 |
| [51] | Speth, H., Peter, S., Grooz, O., Hellberg, K.-H.: [2002] | Betriebsverhalten von Flash-over-Containern - Untersuchungen zum Temperaturverhalten von Flash-over-Containern am Beispiel des Containers der Feuerwehr Aachen. VFDB-Zeitschrift, 2/2002; S. 53 – 58 |
| [52] | Südmersen, J.: [2000] | Rauchdurchzündungen und Rauchexplosionen: Definition, Anzeichen und Gegenmaßnahmen beim Flash-over. Tagungsband der Fachtagung BrandO.2000, UMSICHT-Schriftenreihe Band 23, Fraunhofer IRB Verlag |
| [53] | Van der Meij, W.B.: [1997] | Lagerung von Spraydosen - überschätztes oder unterschätztes Risiko? Allianz Report 70, Heft 5, 1997, S. 182 – 189 |

| | | |
|------|---|--|
| [54] | Widetschek, O.: [1989] | Spraydosen: Wie geht es weiter? Problematik der Treibgase betrifft auch die Feuerwehren. Blaulicht 7/89, S. 4 – 6 |
| [55] | Widetschek, O.: [1996] | Flash Over - Herausforderung für die Feuerwehr. Blaulicht, 10/96, S. 5 - 10 |
| [56] | Widetschek, O.: [2002] | Tödlicher Feuersprung – Warum fünf Männer sterben mußten. Blaulicht 10/2002, S.14 – 15 |
| [57] | Wieder, M.A., Smith, C., Brackage, C.: [1992] | Essentials of Fire Fighting. The International Fire Service Training Association, Fire Protection Publications, 3. Auflage, Oklahoma State University, 3. Auflage, 1992 |
| [58] | Yu, K.S.S.: [1992] | Flashover and Backdraft. Fire Engineers Journal, December 1992, S. 27 – 30 |

| Gefährdungen durch Brandgase und Sauerstoffmangel bei Bränden | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Sauerstoff: Sauerstoffmangelkrankheit: < 12 Vol%, 3 Vol%: baldiger Erstickungstod • Kohlendioxid: MAK-Wert: 5000 ppm Kurzzeiteinwirkung von 30.000 ppm: 300%ige Erhöhung der Atmung 120.000 - 150.000 ppm: nach wenigen Minuten bewusstlos • Kohlenmonoxid: MAK-Wert: 30 ppm <ul style="list-style-type: none"> 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 Min. 12.000 ppm: Tod nach 5 Minuten | |
| <p>Beispiel: Wohnzimmerbrand an der FFB (Meßstelle: zentral, 1,5 m über dem Brandraumboden)</p> <p>Sauerstoff: 12 Vol% nach 2 min 40 s unterschritten, 3 Vol% nach 4 min 42 s unterschritten</p> <p>Kohlendioxid: 120.000 ppm nach 3 min überschritten (Meßwert: max. ca. 200.000 ppm)</p> <p>Kohlenmonoxid: 1.600 ppm nach 1 min 40 s, 3.200 ppm nach 2 min 25 s überschritten 12.000 ppm nach 2 min 54 s überschritten (Meßwert: über 50.000 ppm)</p> | |
| <p>Die Gefahren durch die Brandgasbestandteile Ruß, aromatische Kohlenwasserstoffe, Reizgase und sonstige Pyrolyseprodukte sind zusätzlich zu berücksichtigen. Wie diese Brandgasbestandteile sowie die Sauerstoff-, Kohlendioxid und Kohlenmonoxidkonzentration in ihrer Zusammenwirkung den menschlichen bzw. tierischen Organismus schädigen, ist bis jetzt unzureichend geklärt.</p> | |

Tabelle 1: Gefährdungen durch Brandgase und Sauerstoffmangel bei Bränden –

Vergleich mit Meßwerten eines Brandversuches an der FfB (Beisp.: 2: V8))

Tabelle 2: Zusammenstellung von Anzeichen und Gegenmaßnahmen für Flashover und Backdraft nach **Südmersen [2000]**.

| Erscheinungsform | Ursachen und Wirkung | Anzeichen |
|--|--|---|
| Rauchdurchzündung (Lean Flashover, Rollover) | <ul style="list-style-type: none"> • Wärmestrahlung führt zur Zersetzung (Pyrolyse) der umliegenden Stoffe => größere Mengen heißer brennbarer Gase werden freigesetzt. • Größere Mengen von brennbaren Stoffen im Brandraum, die bei Erwärmung schnell größere Volumen an Pyrolysegasen freisetzen. • Ausreichende Luftzufuhr, um Verbrennung mit Flammerscheinung permanent aufrechtzuerhalten. • Durchzündung der Rauchschiicht erfolgt ohne signifikanten Druckanstieg und bei gerade ausreichender Sauerstoffzufuhr, sobald die untere Explosionsgrenze (UEG) der Pyrolysegase erreicht wird. • Häufiges Erscheinungsbild ist Stichflamme. | <ul style="list-style-type: none"> • Im oberen Bereich des Raumes bildet sich eine Rauchschiicht, die mit Pyrolysegasen und brennbaren Produkten aus einer unvollständigen Verbrennung angereichert werden. • In Abhängigkeit vom brennbaren Stoff kann unter gleichen Verbrennungsbedingungen auch eine Durchzündung erfolgen, ohne daß sich eine sichtbare Rauchschiicht gebildet hat, wenn die Pyrolysegase unsichtbar sind. |
| Rauchdurchzündung mit Druckanstieg (Rich Flashover) | <ul style="list-style-type: none"> • Brandherd mit ausreichend großer Energiefreisetzung bei begrenzter, die Größe des Brandes kontrollierende Sauerstoffzufuhr. • Durch den heißen, aufsteigenden Rauch entsteht unterhalb der Raumdecke eine Wärmestau, dadurch wird die Rauchschiicht zusätzlich aufgeheizt. Innerhalb der Rauchschiicht werden alle brennbaren Stoffe ebenfalls erhitzt und ggf. pyrolysiert. Mit zunehmender Temperatur wird von der aufgeheizten Rauchschiicht selbst soviel Wärmestrahlung abgegeben, dass eine Pyrolyse auch fernab vom ursprünglichen Brandherd verursacht wird. • Die Rauchdurchzündung mit Druckanstieg ist das plötzliche Durchzünden einer Rauchschiicht oder eines ganzen Raumes. In der Rauchschiicht reichern sich Pyrolyseprodukte, brennbare Gase und Kohlenmonoxid an, die aber aufgrund von Sauerstoffmangel in dieser Schicht nicht durchzünden können. • In punktuellen Bereichen findet bei ausreichender Brandgaskonzentration bei gleichzeitig auftretender ausreichender Sauerstoffkonzentration eine Verbrennung statt. Diese können sich als Flammenzungen im Rauch an der Grenzschicht zwischen Rauch- und Luftzone und beim Verlassen des Rauches aus dem Brandrauch beobachtet werden. • Wird die Rauchschiicht mit Sauerstoff verwirbelt (z.B. Platzen oder Einschlagen von Fenstern, Öffnen von Türen, ggf. verstärkt durch Zugluft bzw. ggf. verstärkt durch falsche Be- und Entlüftung) zündet sie in Form einer Stichflamme und in Verbindung mit einer gemäßigten Druckwelle durch. Die Vormischung erfolgt hier aufgrund von folgenden Ereignissen. Zunächst erfolgt immer ein Pulsieren in je nach Ausgangslage verschiedenen Stärken. Der Rauch wird stoßweise aus dem Brandraum gedrückt (Lokomotiveneffekt). Dabei kann es im Extremfall zu einer kompletten Verwirbelung der Rauchschiicht mit der eintretenden Luft kommen. • Je nach Situation kann es zur sofortigen oder zeitverzögerten Durchzündung der Rauchschiicht kommen. | <ul style="list-style-type: none"> • Starke Rauchentwicklung: Massiver geballter Brandrauch jeglicher Farbe, der einen Brandraum unter hohem Druck verläßt. • Die Gefährdung ist kurz nach dem Öffnen des Brandraumes und während eines Innenangriffs, wenn sich der direkte Löschangriff auf den Brandherd verzögert oder nicht möglich ist, am größten. • Brandübertragungen über Entfernungen von weit mehr als 100 m sind beobachtet worden. • Bauliche Gegebenheiten, die einen Wärmestau entstehen lassen können, begünstigen die folgende Entwicklung: z.B. dichtschießende Fenster und Türen, Isolierverglasungen Doppelverglasung. D.h. Scheiben brechen unter Hitzeeinwirkung später. |

Fortsetzung von Tabelle 2

| | | | |
|---|---|--|--|
| Backdraft (Rauch- explosion) | <p>Grundbedingung: ausgedehnter Brand in einem geschlossenen Raum ohne weitere Sauerstoffzufuhr.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Im Raum befindliche Luft wird in der ersten Phase durch ein Feuer verbraucht. • In der folgenden Schwelbrandphase verlischt das offene Feuer, verstärkte CO-Bildung. Raumtemperatur ist vorerst konstant. Ist die Temperatur hoch genug werden weitere Pyrolysegase freigesetzt. Durch fehlenden Luftsauerstoff können diese nicht verbrennen. • Raumtemperatur sinkt. Heiße Brandgase kühlen sich langsam ab und verringern dabei ihr Volumen. Es entsteht Unterdruck im Brandraum im Verhältnis zur Umgebungsatmosphäre • Wird Tür oder Fenster geöffnet, wird Luft in den Brandraum gesaugt und mit brennbaren Gasen verwirbelt. • Sobald diese brennbare Atmosphäre eine Zündquelle erreicht, erfolgt die Rauchexplosion in Verbindung mit einer Druckwelle. <p>Bauliche Gegebenheiten die eine Rauchexplosion begünstigen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dichtschließende Fenster und Türen • Isolierverglasungen (Scheiben brechen unter Hitzeeinwirkung später). • Kaum mehr eigene Raumlüftungen. • Ganz allgemein: Gebäude die den heutigen Wärmeschutzverordnungen entsprechen. | | <ul style="list-style-type: none"> • Kein sicheres Anzeichen, Gefährdung nach Öffnen eines Brandraumes am größten • Folgende 4 Anzeichen deuten auf eine bevorstehende Rauchexplosion hin. Diese können einzeln, kombiniert oder auch alle vorher zu beobachten sein, jedoch kann hieraus keine Gesetzmäßigkeit abgeleitet werden. <ol style="list-style-type: none"> 1. über lange Zeit unentdecktes oder ungestörtes Brandgeschehen 2. heiße Türklinken bzw. blätter u./o. heiße Fensterscheiben 3. mit Brandrauch beschlagene Fensterscheiben oder Brandrauch quillt stoßweise aus Tür- u. Fensterspalten 4. Luft wird nach dem Öffnen einer Tür in den Raum gesaugt <p>Explosion kann nach einigen Sekunden, aber auch nach mehreren Minuten erfolgen.</p> |
| | Einfache Rauchexplosion | nach Zündung folgen Flammenfront u. Druckwelle dem Weg der Zuluft u. schlagen aus Lüftungsöffnung | |
| | Verlagerte Rauchexplosion | Zündfähige Gemische befinden sich in einem anderen Raum, während der ursprüngliche Brandraum durch Querlüftung frei von zündfähigen Gasen ist. Bei Vorhandensein einer Zündquelle erfolgt dort eine Explosion. | |
| | Umgekehrte Rauchexplosion | Befinden sich Schwel- u. Pyrolysegase oberhalb der Zündtemperatur, erfolgt bei Kontakt mit Luftsauerstoff unmittelbar eine Zündung. Die Flammenfront folgt dem Weg der Zuluft von der Öffnung in den Raum hinein. | |
| | Verzögerte Rauchexplosion | Explosionsfähiges Gemisch wird aufgrund einer fehlenden Zündquelle nicht sofort gezündet. Nach Erkaltung sinkt dieses Gemisch ab. Wird z.B. bei Aufräumarbeiten durch Einsatzkräfte ein Glutnest aufgewirbelt, erfolgt eine Explosion. Die besondere Gefahr hierbei ist, daß sich die Personen im Explosionsherd befinden. | |

Temperatur und Wärmestrahlung im Brandraum beim Auftreten des Flashovers (verschiedene internationale Untersuchungen)

| Quelle | Temperatur im Deckenbereich in °C | Wärmestrahlung im Bodenbereich in kW m ⁻² |
|----------------------------------|--------------------------------------|---|
| - Hagglund (1974) | 600 | keine Angabe |
| - Parker und Lee (1974) | keine Angabe | 20 |
| - Fang (1975) | 450 - 650 | 17 - 33 |
| - Lee und Breese (1978) | 650 | 17 - 30 |
| - Babrauskas (1979) | 600 | 20 |
| - Budnick und Klein (1979) | 673 - 771 | 15 |
| | 634 - 734 | |
| - Fang und Breese (1980) | 706 ± 92 | 20 |
| - Thomas (1980) | 520 | 22 |
| - Quintiere und McCaffrey (1981) | 600 | 17,7 - 25 |

Tabelle 3: Temperatur und Wärmestrahlung im Brandraum beim Auftreten eines Flashovers. Zusammenstellung aus verschiedenen internationalen Untersuchungen nach Liang [2002])

Tabelle 4: Zusammenstellung von Zeiträumen bis zum Eintreten eines Flashovers(siehe **Bild 4.4**)

| Allgemeine Kenndaten zum Brand: Brandlast, Raumgröße, Öffnungen, Löscheinsatz, etc. | Zeit zwischen Zündung und Flashover | Literaturquelle |
|--|---|--|
| Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik Brandraum: 25 m ² *2,7 m hoch Tür geschlossen, Fenster geöffnet (ohne Verglasung): 1 m ² , Brandlast:336 kg (überwiegend Holzkrippen) Brandbekämpfung: Löschbeginn mit Fog Nail nach ca. 21 min anschließend Strahlrohr (BF Karlsruhe) | ca. 13 min | Kunkelmann J.: Verringerung der Temperaturen an Stahl-Glasfassaden im Brandfall durch thermische Entlastungsöffnungen und ortsfeste Niederdruck-Wasserebellöschanlagen. Forschungsvorhaben im Auftrag der Stiftung Industrie-Forschung, Förderkennzeichen Nr. S 483, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Karlsruhe, 2001 |
| Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik Brandraum: 25 m ² *2,7 m hoch Tür geschlossen, Fenster geöffnet (ohne Verglasung): 1,5 m ² , vorgesetzte Ganzflächendoppelfassade in 1,2 m Abstand Brandlast: Wohnzimmereinrichtung, 754 kg Brandbekämpfung: nach dem Flashover mit Strahlrohr durch die BF Karlsruhe | ca. 3 min | Kunkelmann J: Auswirkung des Einsatzes ortsfester Wasserebellöschanlagen auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden. (Teil 3) Forschungsbericht Nr. 108 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V – Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten. Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 1998 |
| Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik Brandraum: 25 m ² *2,7 m hoch Tür geschlossen, Fenster geöffnet (ohne Verglasung): 1,5 m ² , Brandlast: Wohnzimmereinrichtung, 730 kg Brandbekämpfung: Löschbeginn mit Fog Nail nach ca. 17 min, anschließend Strahlrohr-Einsatz (BF Karlsruhe) | 5 - 6 min | Pulm, M.: Fog Nail – Der Sprinkler für danach. Brandhilfe 10/1999, S. 345 – 352 |
| MFPA Leipzig, Brandversuchseinrichtung in Laue Brandraum: ca. 20 m ² , 2,6 m hoch, Fensteröffnungsfläche: ca. 2 m ² Brandlast: möblierter Wohnraum, 500 – 600 MJ/kg | 7 – 15 min | Kotthof, I.: Glasfassaden – Brandausbreitung an Fassaden Vortrag beim VI. Baurecht & Brandschutz-Symposium, Frankfurt am Main, 2002, www.ziller-ass.de |

| Fortsetzung von Tabelle 4 | | |
|---|--|--|
| Brandversuch an einem zum Abbruch bestimmten viergeschossigen modernen Wohnhaus in Lehrte Wohnzimmer: 18 m ² * 2,5 m hoch Tür geschlossen, Fenster geöffnet: 2,7 m ² Brandlast: 30 kg/m ² | Mittlere Temperatur im Brandraum: 500°C ¹⁾ nach 8 min 600°C nach 13 min | Bechtold, R., Ehlert, K.-P., Wesche, J.: Brandversuche Lehrte Schriftenreihe Bau- und Wohnforschung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Nr. 04.037, Bonn-Bad Godesberg, 1978 |
| Versuche in 3-geschossigem Gebäude aus Stahlbeton Brandraum: 19 m ² * 2,4 m hoch Fenster: 1,5 m * 2,4 m (3,6 m ²) Tür: 0,8 m * 2,0 m (1,6 m ²) Brandlast: Möbel, Bücher, ca. 700 kg | Brandraumbür zu, Fenster nach 9 min 45 s geöffnet: 13 min Brandraumbür geöffnet, Fenster nach 5 min 25 s geöffnet: 7 min 20 s | Klopovic, S., Turan, Ö.F.: Flames venting externally during full-scale flashover fires: two sample ventilation cases. Fire Safety Journal 31 (1998), S. 117 – 142 |
| Einrichtungsgegenstände aus Kunst- und Schaumstoffen | 3 – 10 min | Leihbacher, D.: Search in the modern environment. Fire Engineering, July 1999, S. 65 – 76 |
| Versuche mit Wandverkleidungen | Polyurethan-Schaum: 14 s Holz-Paneelen: 2 min 18 s Faserplatten: 2 min 30 s | Yu K.S.S.: Flashover and Backdraft. Fire Engineers Journal, December 1992, S. 27 – 30 |
| Realbrände | Wohnzimmer: < 1 min Scheune: 1 min, 3 min Raumbrände: Unterventiliert: ca. 30 min Raumbrände Fenster geöffnet: 10 min | Clark, W.E.: Flashover: The sudden, silent killer Fire Engineering, June 1994, p. 26 – 29 |

1 Als Temperaturkriterium wird in der Literatur häufig ein Wert zwischen 500°C bis 600°C in der Rauchsicht angenommen, ab dem ein Flashover auftritt.

| Fortsetzung von Tabelle 4 | | |
|--|---|--|
| <p>Versuchsbrandräume: 3,5 m * 4,5 m (15,8m²), Höhe: 2,5 m, Fenster(2,8m²): auf, unterschiedliche Konstruktionen in Holzbauweise (Holzrahmenkonstruktion oder Brettschichtholzkonstruktion) mit und ohne Verkleidung aus Gipskartonplatten, Boden: Nut- und Federbretter aus Holzfaserverplatten, zum Teil Dämmung mit Mineralwolle Bewegliche Brandlast: 230kg bzw. 680kg Holzkrippen</p> | <p>4 min 30 s 4 min 50 s 6 min 6 min 10 s</p> | <p>Hakkarainen, T.: Post-Flashover Fires in Light and Heavy Timber Construction Compartments VTT Building and Transport, Fire Research, Finland Journal of Fire Sciences, Vol. 20, March 2002, p.: 133 – 175</p> |
| <p>Versuchsbrandraum: 2,5 m * 3,75 m (9,4 m²), Holzrahmenkonstruktion mit Calcium-Silikat- und Gipskartonplatten beplankt, Ventilationsöffnung: eine Wand vollständig offen (3,75 m * 2,4 m = 9m²) Brandlast: Möbel, Vorhänge, Zeitschriften etc. (keine Massenangabe)</p> | <p>10 min 42 s</p> | <p>Shipp, M.: Keeping the home fires burning. Fire Engineers Journal, Fire Prevention, February 2002, S. 15 – 16</p> |

6. BILDER

Möglichkeiten der Brandübertragung

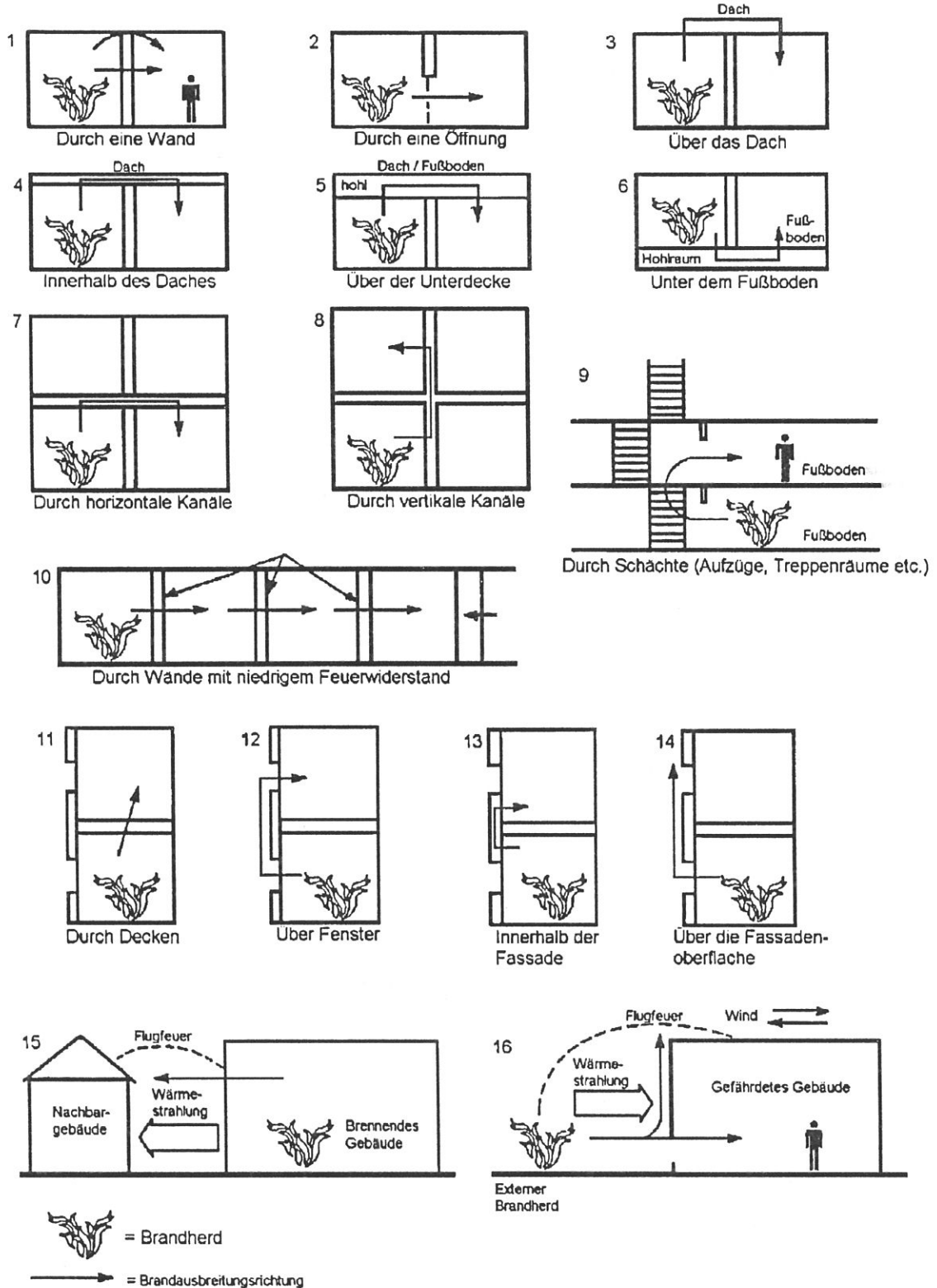
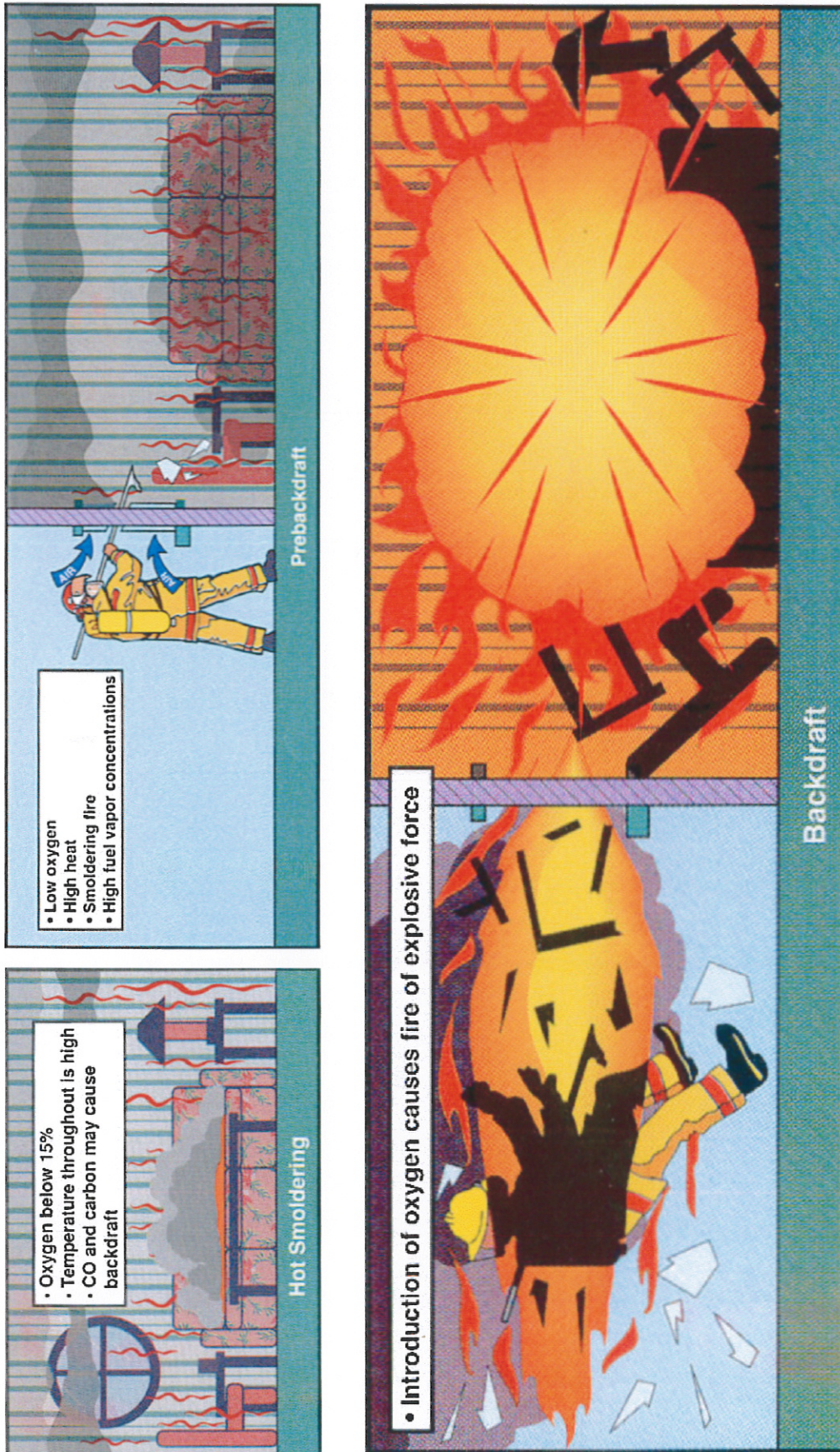


Bild 1: Möglichkeiten der Brandübertragung innerhalb und zwischen Gebäuden.

Gefährdung von Feuerwehreinsatzkräften durch Backdraft



Quelle: Wieder, M.A. et al.: Essentials of Fire Fighting, The International Fire Service Training Association, Fire Protection Publications, Oklahoma State University, 1992

Bild 2.1: Gefährdung von Feuerwehreinsatzkräften durch Backdraft.

Entstehungsprinzip eines Backdraft

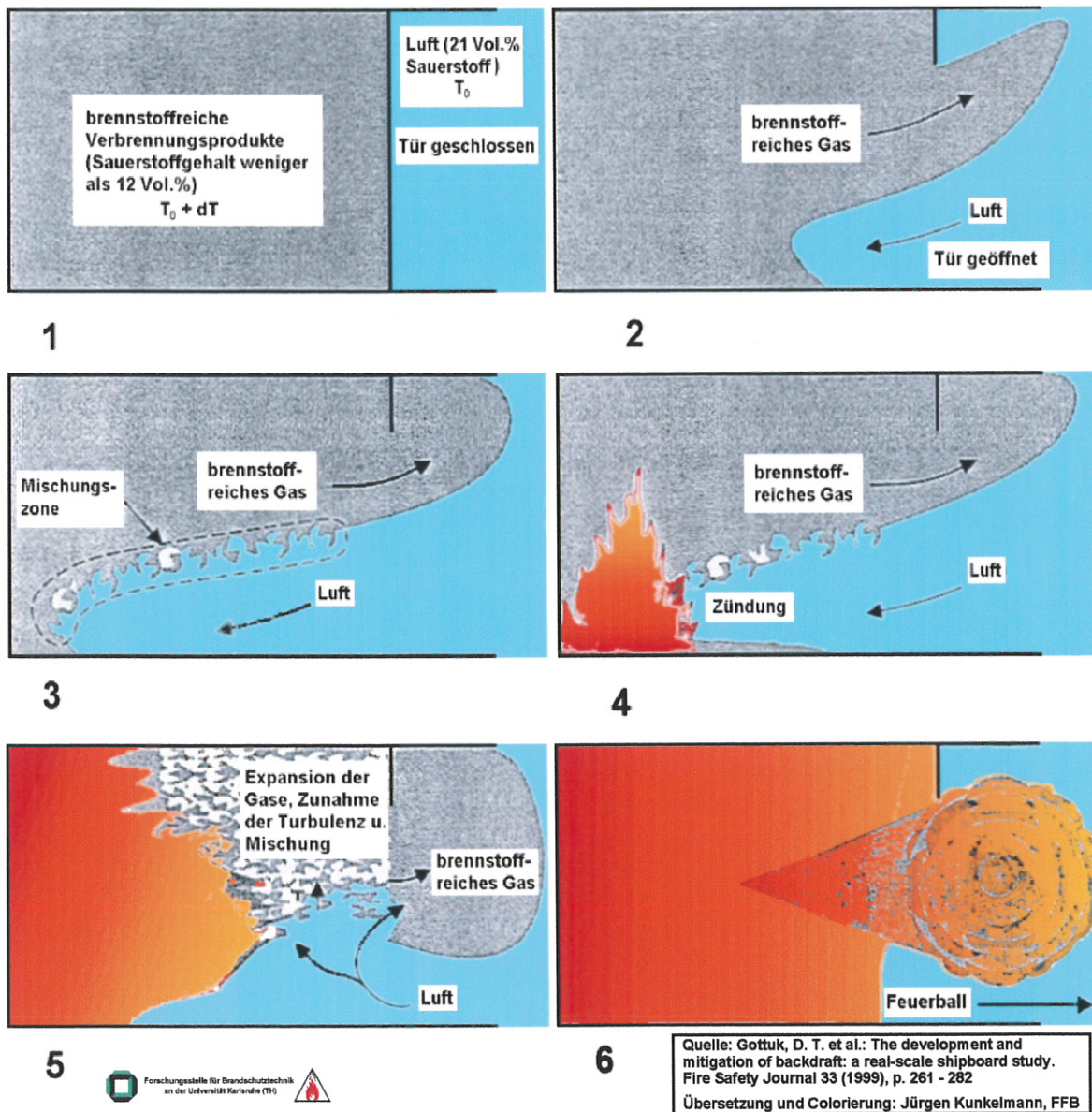


Bild 2.2: Entstehungsprinzip eines Backdraft.

Backdraft-Untersuchungen

(Daniel Gojkovic: Initial Backdraft Experiments, Report 3121, Department of Fire Safety Engineering, Universität Lund/Schweden, 2000
<http://www.brand.lth.se/english/bibl/public.htm.>)



Backdraft-Container



Druckentlastungs-
 öffnung
 (beim Versuch
 geschlossen)



Ventilationsöffnung



Öffnung der Ventilationsöffnung und Vermischung der einströmenden Luft mit dem im Raum befindlichen, durch Luftmangel noch unverbrannten Erdgas - Entzündung an einem Heizdraht



Wärmeentwicklung bewirkt Expansion der Brandgase - bis zu diesem Zeitpunkt noch unverbrannte Gase strömen aus der Ventilationsöffnung



Die unverbrannten Gase verbrennen in einem Feuerball außerhalb des Containers

Bild 2.3: Backdraft-Untersuchungen an der Universität Lund in Schweden.

Tötung von fünf Feuerwehrmännern am 14. September 2002 in Paris durch zwei Backdrafts

Quelle: Widetschek, O.: Tödlicher Feuersprung - Warum fünf Pariser Feuerwehrmänner sterben mussten. Blaulicht 10/2002, S. 14 - 15

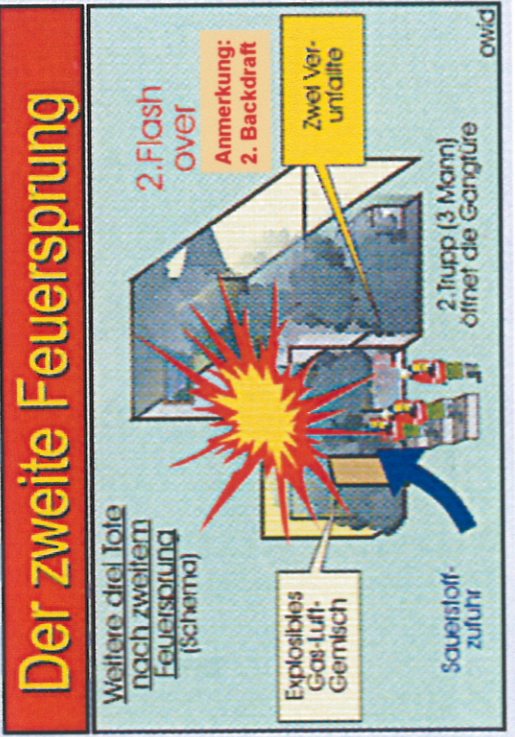
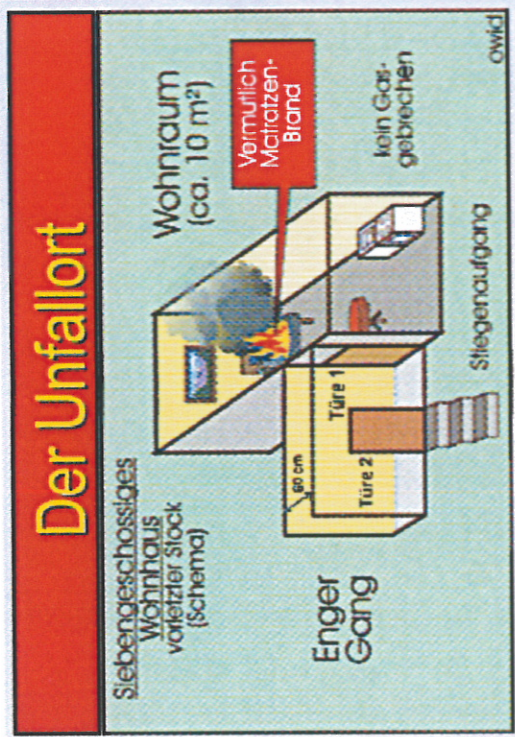


Bild 2.4: Beispiel für ein Brandereignis mit Backdraft.

- **Deflagration (Verpuffung)**

Schwache Explosion, Verbrennungsprodukte können noch durch Öffnungen und Entlastungsöffnungen entweichen, bevor es zu einem nennenswerten Druckaufbau kommt.

Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reaktionsfront: bis ca. 10 m/s

Druck: weniger als 0.01 MPa (0,1 bar)

- **Explosion:**

Da die gebildeten Verbrennungsprodukte nicht genügend schnell entweichen können und in kurzer Zeit große Wärmemengen freigesetzt werden, erfolgt ein Druckaufbau.

Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reaktionsfront: bis zu einigen 100 m/s

Druck: bei Gasexplosionen bis 0,8 MPa (8 bar), bei Staubexplosionen bis 1,4 MPa (14 bar)

- **Detonation:**

Aufs äußerste gesteigerte Explosion.

Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reaktionsfront: bis 4000 m/s

Druck: bis 10 MPa (100 bar)

Quellen:
 Bussenius, S.: Brand- und Explosionsschutz in der Industrie, Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin 1989;
 Bussenius, S.: Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln, 1996

Bild 2.5: Erläuterung der Begriffe Deflagration (Verpuffung), Explosion, Detonation.

Explosionen

Schadensarten bei Explosionsdruckwellen

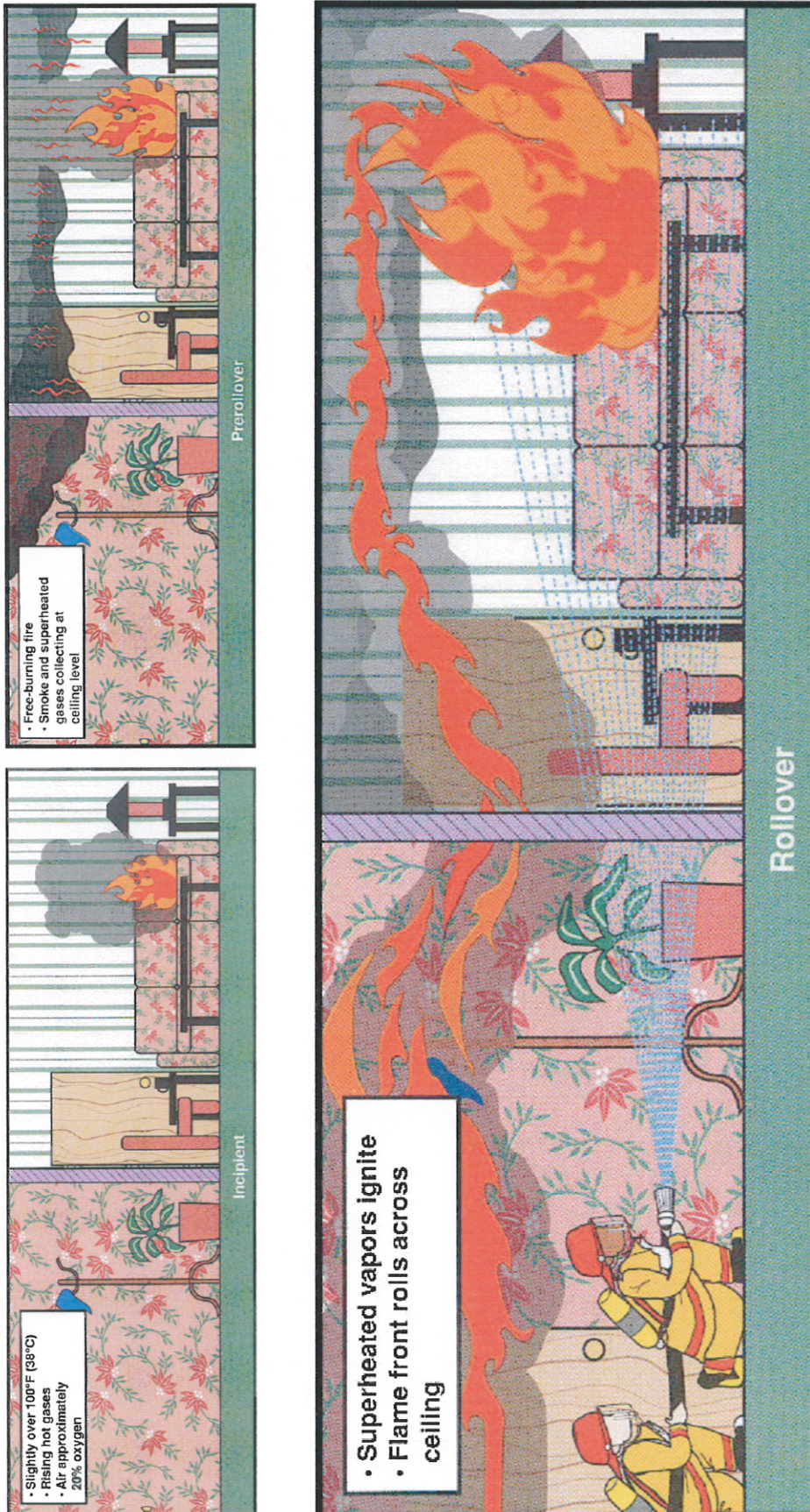
| Maximale Druckamplitude der Druckwelle [bar] | Schadensart |
|---|--|
| 0,01 | Glasschäden an Gebäuden |
| 0,03 | Leichte Schäden an Bauwerksstrukturen |
| 0,1 | Schwere Schäden an Bauwerksstrukturen |
| 0,17 | Trommelfellverletzungen |
| 0,6 | Totale Zerstörung von üblichen Bauwerken |
| 3 | Tod durch Lungenriss |

Seite 4

Quelle: Neumann, J.: Brand- und Explosionsschutz (Skriptum zur Vorlesung Arbeits- und Anlagensicherheit), Universität Dortmund, Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen, Lehrstuhl Umwelttechnik, Juni 2003

Bild 2.6: Schadensarten bei Explosionsdruckwellen.

Gefährdung von Feuerwehreinsatzkräften durch Rollover



Quelle: Wieder, M.A. et al.: Essentials of Fire Fighting, The International Fire Service Training Association, Fire Protection Publications, Oklahoma State University, 1992

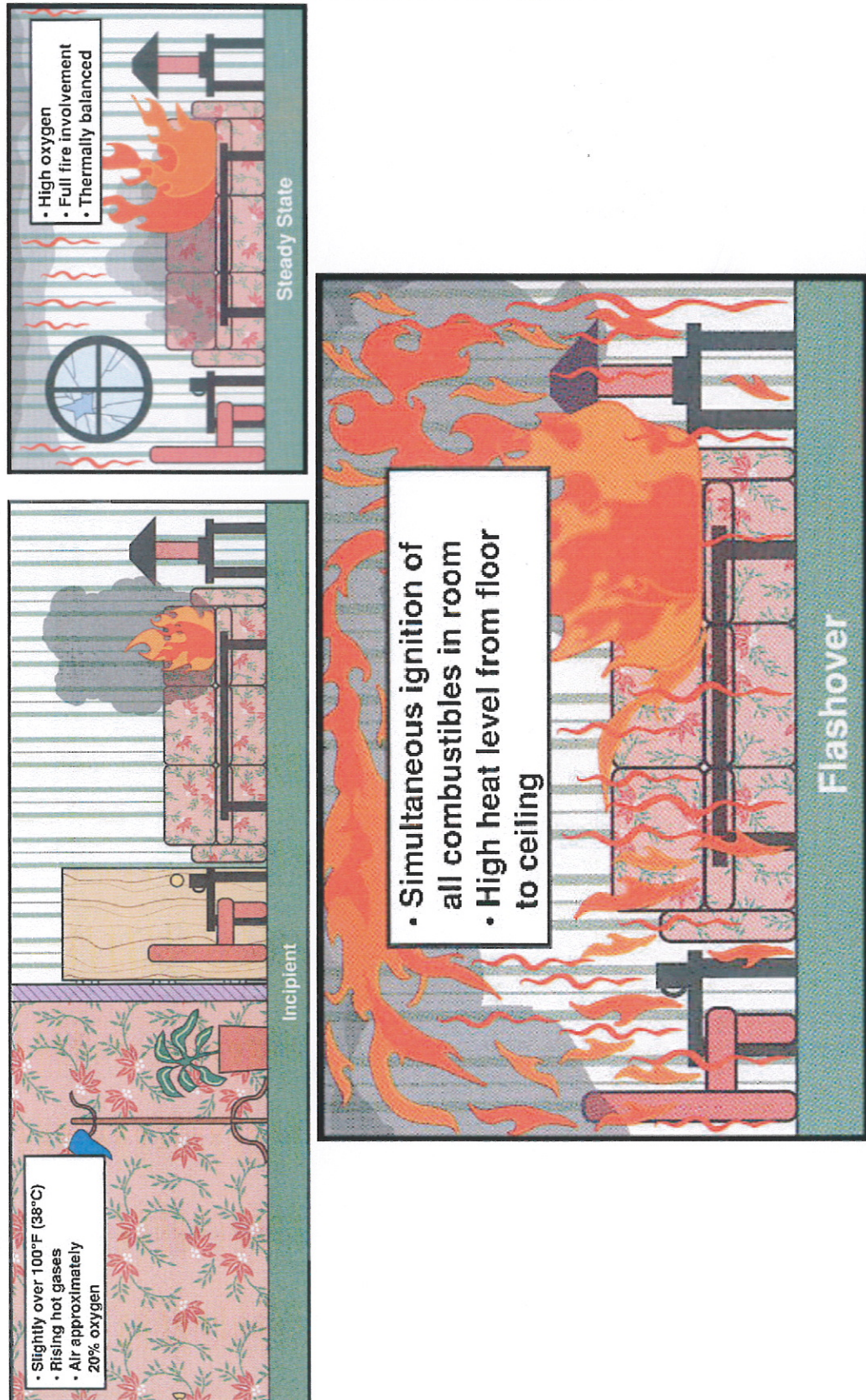
Bild 3.1: Gefährdung von Feuerwehreinsatzkräften durch Rollover.



Rollover
während eines Brandversuches an einem Industrieleichtdach

Bild 3.2: Rollover während eines Brandversuches an einem Industrieleichtdach an der FFB.

Gefährdung von Feuerwehreinsatzkräften durch Flashover



Quelle: Wieder, M.A. et al.: Essentials of Fire Fighting, The International Fire Service Training Association, Fire Protection Publications, Oklahoma State University, 1992



Forschungsinstitut für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (ITF)



Bild 4: Gefährdung von Feuerwehreinsatzkräften durch Flashover.

Versuch 1 (Thermische Belastung von Stahlträgern): Versuchsaufbau



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



Brandraum mit Stahlträger 3 und Brandraumtür



Brandraum mit Stahlträger 1, 2 und Fensteröffnung



Temperaturmeßstelle am Stahlträger



Messung der Durchbiegung von Stahlträger 1

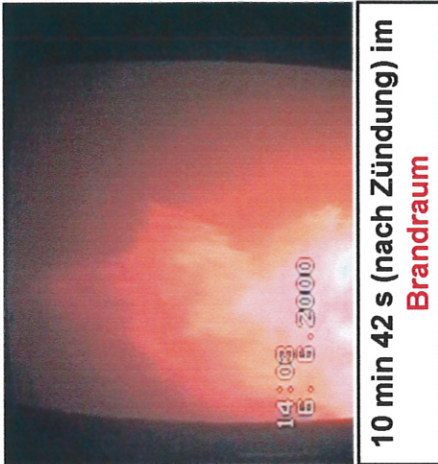


Bild 4.1.1: Beispiel 1 eines Brandversuches mit Flashover an der FfB. Thermische Belastung von Stahlträgern - Versuchsaufbau und Brandlast.

Versuch 1: Versuchsablauf



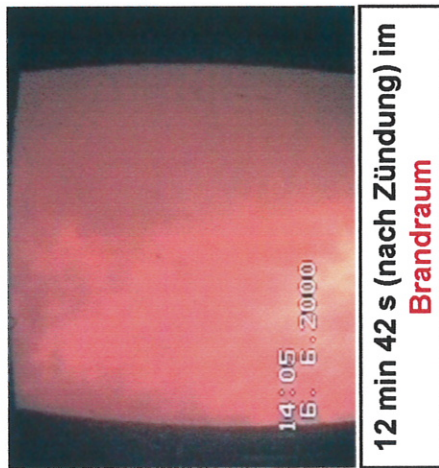
1 min 8 s (nach Zündung) im
Brandraum



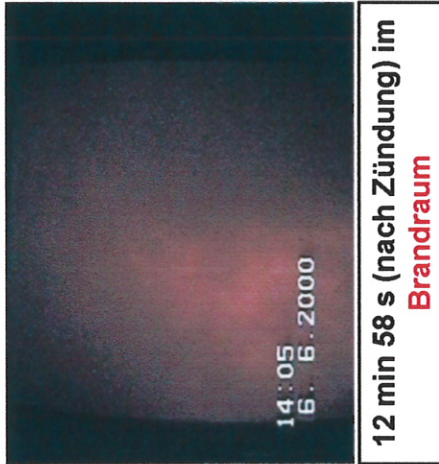
10 min 42 s (nach Zündung) im
Brandraum



10 min 42 s (nach Zündung)
an der **Fensteröffnung**



12 min 42 s (nach Zündung) im
Brandraum



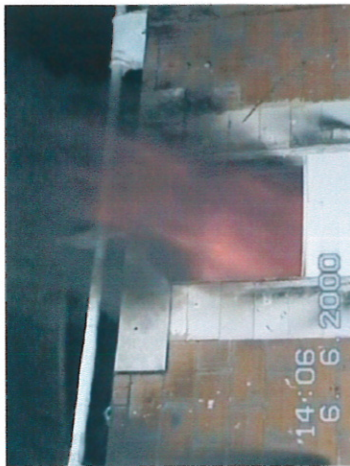
12 min 58 s (nach Zündung) im
Brandraum
Flashover



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

Bild 4.1.2: Beispiel 1 - Versuchsablauf.

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 4.1.3: Beispiel 1 - Versuchsablauf - Löscheinsatz mit Fog Nail, anschließend mit Strahlrohr.

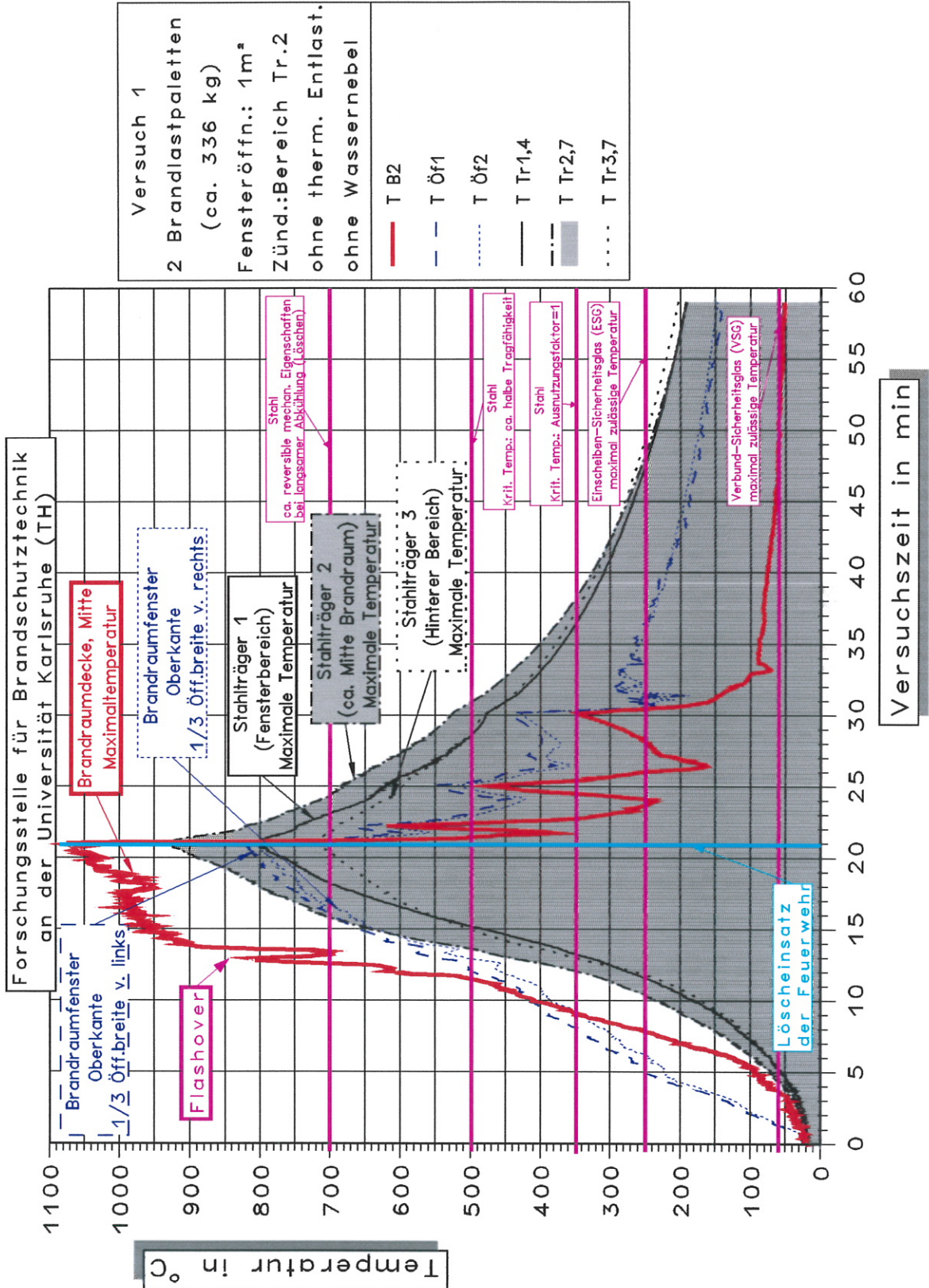


Bild 4.1.4: Beispiel 1 - Zeitlicher Verlauf verschiedener Temperaturen im Brandraum (kritische Temperaturen von Stahl und Verglasungen).

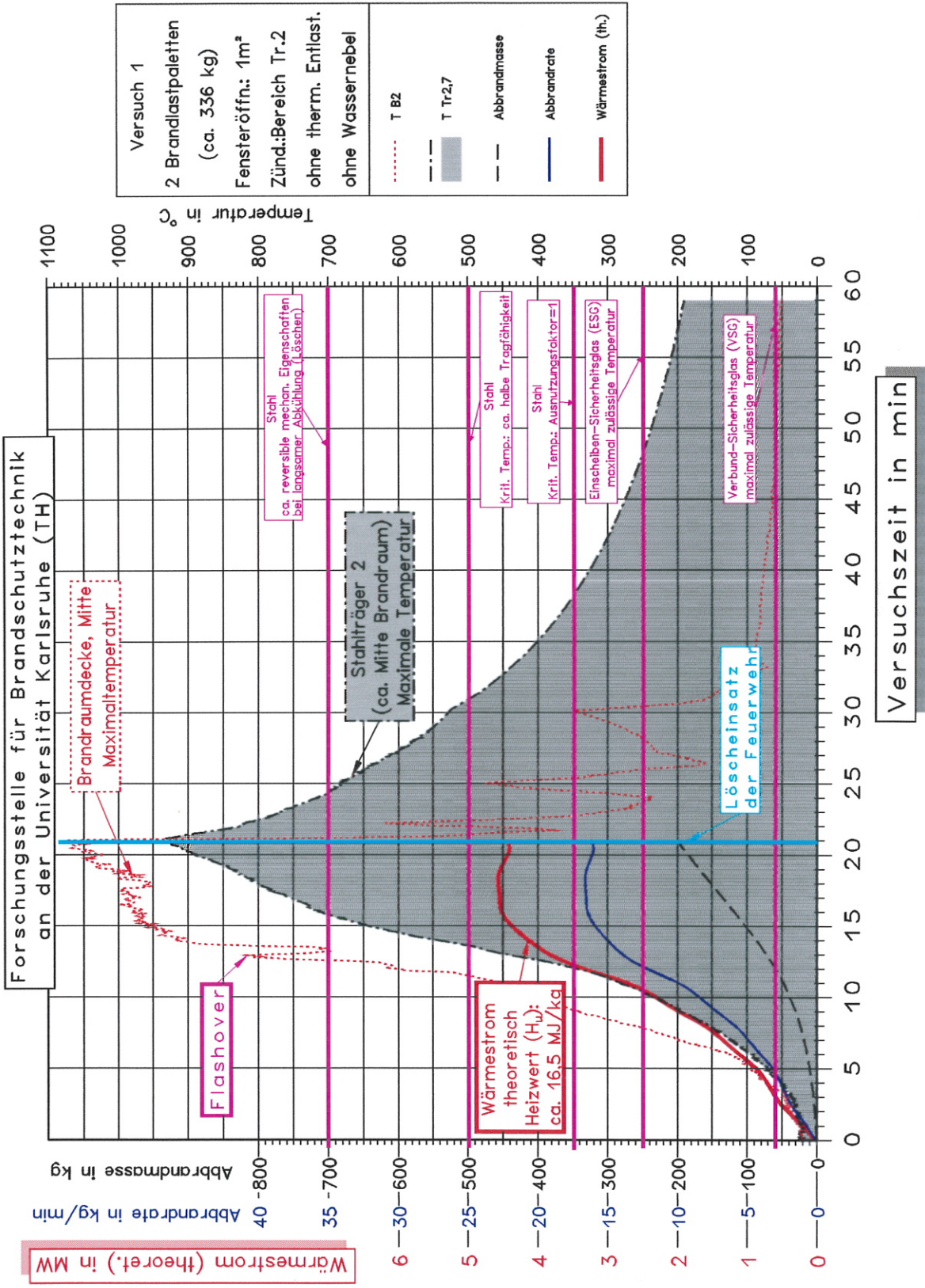


Bild 4.1.5: Beispiel 1 - Zeitlicher Verlauf der Maximaltemperatur im Brandraum sowie der Abbrandmasse, Abbrandrate und Wärmefreisetzung.

Versuch 8 (Ganzflächendoppelfassade): Versuchsaufbau



Versuchsaufbau:

Brandraum: 25 m², Höhe: 2,68 m, Brandraumtür

geschlossen

Brandlast: Wohnzimmerinricht., 754 kg, 0,5 l Heptan

Innenfassade: Fenster geöffnet (ohne Verglasung),
ca. 1,5 m²

Außenfassade: ESG-Verglasung (8 mm ESG) in

Aluminiumprofilssystem mit Glashalteleisten, ca. 3 m²

Zwischenfassadenbereich: ohne Abschottungen,

Abstand zwischen Innen- u. Außenfassade: 1,2 m



Bild 4.2.1: Beispiel 2 eines Brandversuches mit Flashover an der FfB. Ganzflächendoppelfassade - Versuchsaufbau und Brandlast.

Versuch 8 (Ganzflächendoppelfassade): Versuchsablauf



Zündung: 0 s
Brandraum



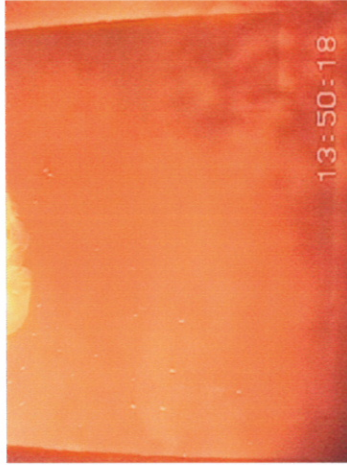
Zündung: 0 s
Fensteröffnung



1 min 34 s
Brandraum



1 min 34 s
Fensteröffnung



2 min 18 s
Brandraum



2 min 18 s
Fensteröffnung

Bild 4.2.2: Beispiel 2 - Versuchsablauf.

Versuch 8 (Ganzflächendoppelfassade): Versuchsablauf

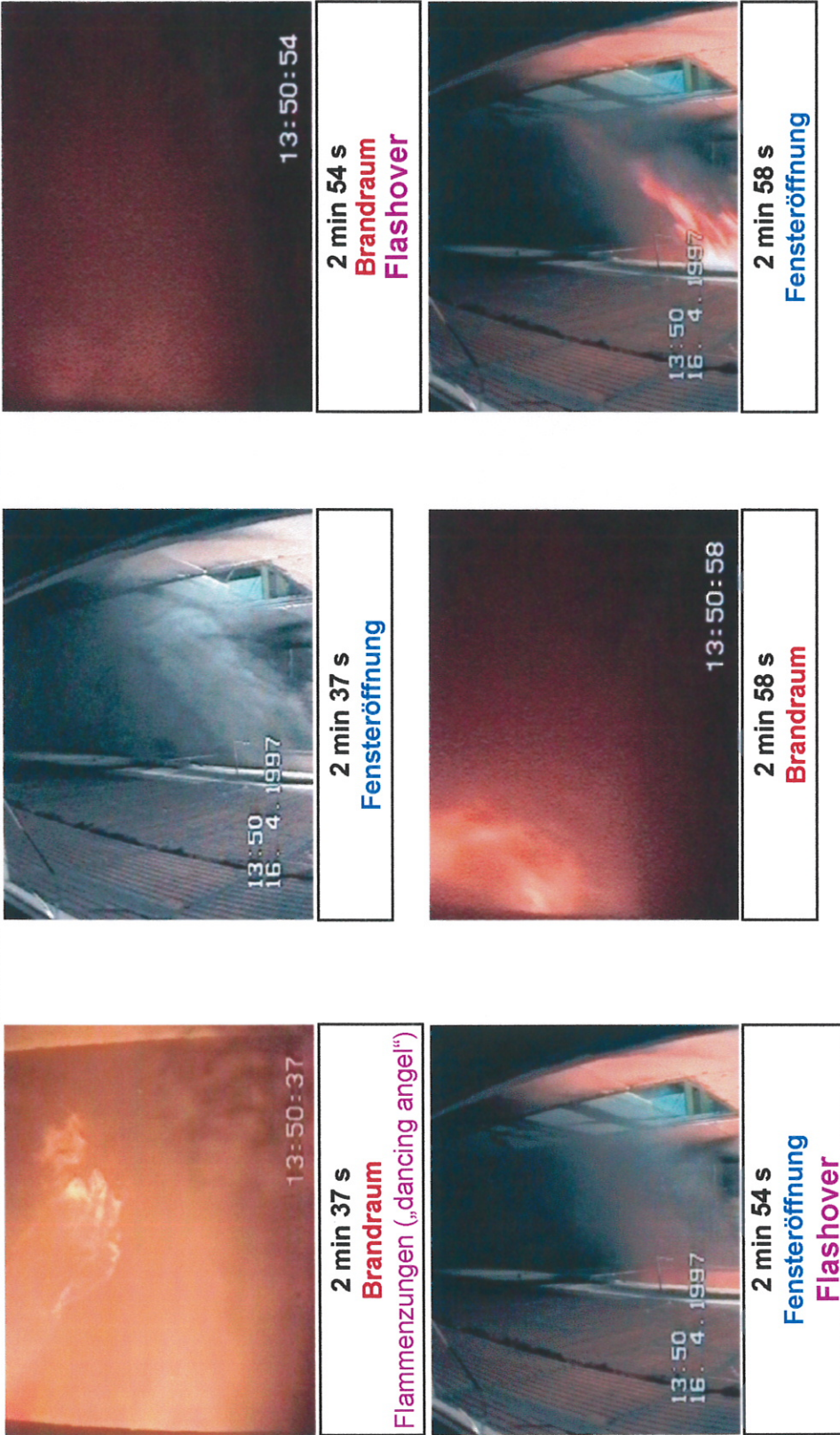
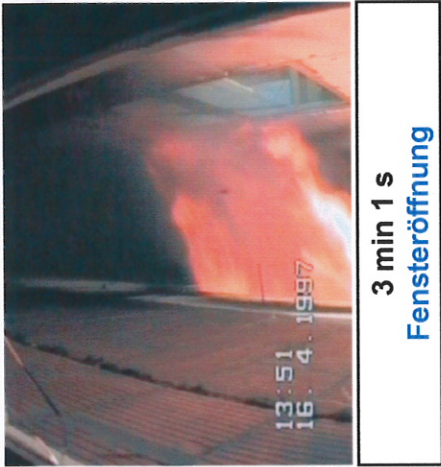


Bild 4.2.3: Beispiel 2 - Versuchsablauf.

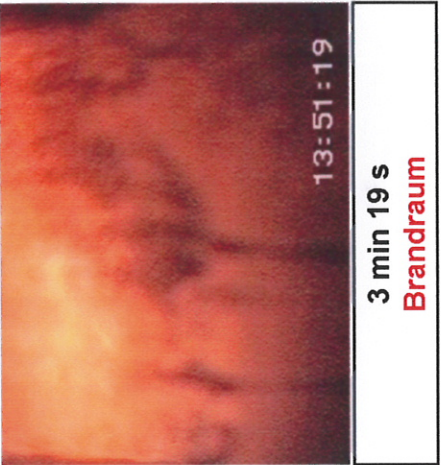
Versuch 8 (Ganzflächendoppelfassade): Versuchsablauf



3 min 1 s
Brandraum



3 min 1 s
Fensteröffnung



3 min 19 s
Brandraum



3 min 19 s
Fensteröffnung



3 min 29 s
Fensteröffnung



4 min 38 s
Fensteröffnung

Bild 4.2.4: Beispiel 2 - Versuchsablauf.

Versuch 8 (Ganzflächendoppelfassade): Versuchsablauf



13:52
16. 4. 1997

4 min 54 s
Fensteröffnung



13:53
16. 4. 1997

5 min 1 s
Fensteröffnung



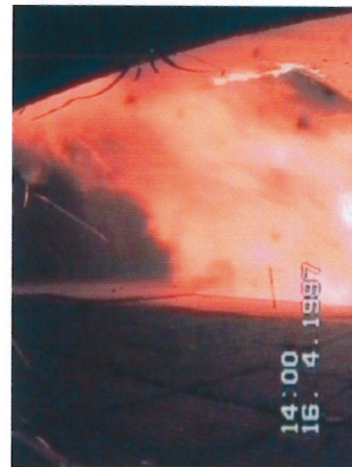
13:53
16. 4. 1997

5 min 14 s
Fensteröffnung



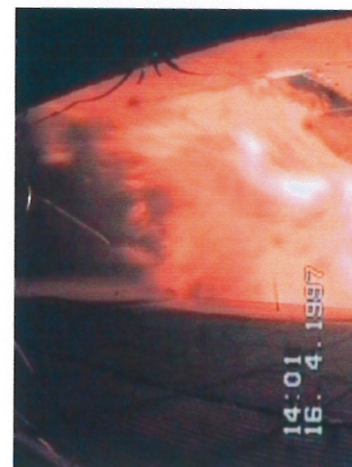
13:54
16. 4. 1997

6 min 8 s
Fensteröffnung



14:00
16. 4. 1997

12 min 55 s
Fensteröffnung



14:01
16. 4. 1997

13 min 2 s
Fensteröffnung
Löschbeginn der Feuerwehr

Bild 4.2.5: Beispiel 2 - Versuchsablauf.

Versuch 8 (Ganzflächendoppelfassade): Versuchsablauf



13 min 50 s
Fensteröffnung
Löschzeit: 48 s



16 min 41 s
Fensteröffnung
Löschzeit: 3 min 39 s



14 min 16 s
Fensteröffnung
Löschzeit: 1 min 14 s



42 min 33 s
Fensteröffnung
Löschzeit: 29 min 31 s



14 min 19 s
Fensteröffnung
Löschzeit: 1 min 17 s

Bild 4.2.6: Beispiel 2 - Versuchsablauf.

Brand- und Rauchausbreitung bei der Ganzflächendoppelfassade



Zwischenfassadenbereich
Zündung im Brandraum



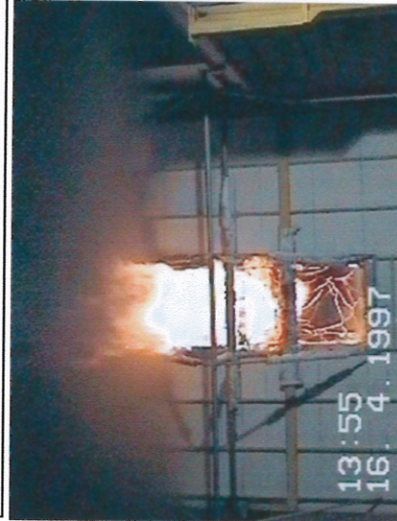
Außenfassade
nach ca. 4 min
(Flashover im Brandraum
nach ca. 3 min)



Zwischenfassadenbereich: direkte Beflammung der Außenfassade,
Entzündung unverbrannter Rauchgase bei ca. 3 - 4 min



Außenfassade: Zerstörung der oberen ESG-Scheibe nach 5 min 53 s,
Flammen oberhalb der Fassadenoberkante



Außenfassade: Zerstörung der unteren ESG-Scheibe nach 7 min 50 s



Bild 4.2.7: Beispiel 2 - Versuchsablauf (Entzündung von Brandgasen im Zwischenfassadenbereich, Zerstörung der ESG-Verglasung).



**Brand in einem Wohnzimmer (Brandraum: 25 m²)
mit Löscheinsatz der Feuerwehr nach dem Flashover**

Bild 4.2.8: Beispiel 2 - Löscheinsatz der Feuerwehr nach dem Flashover.

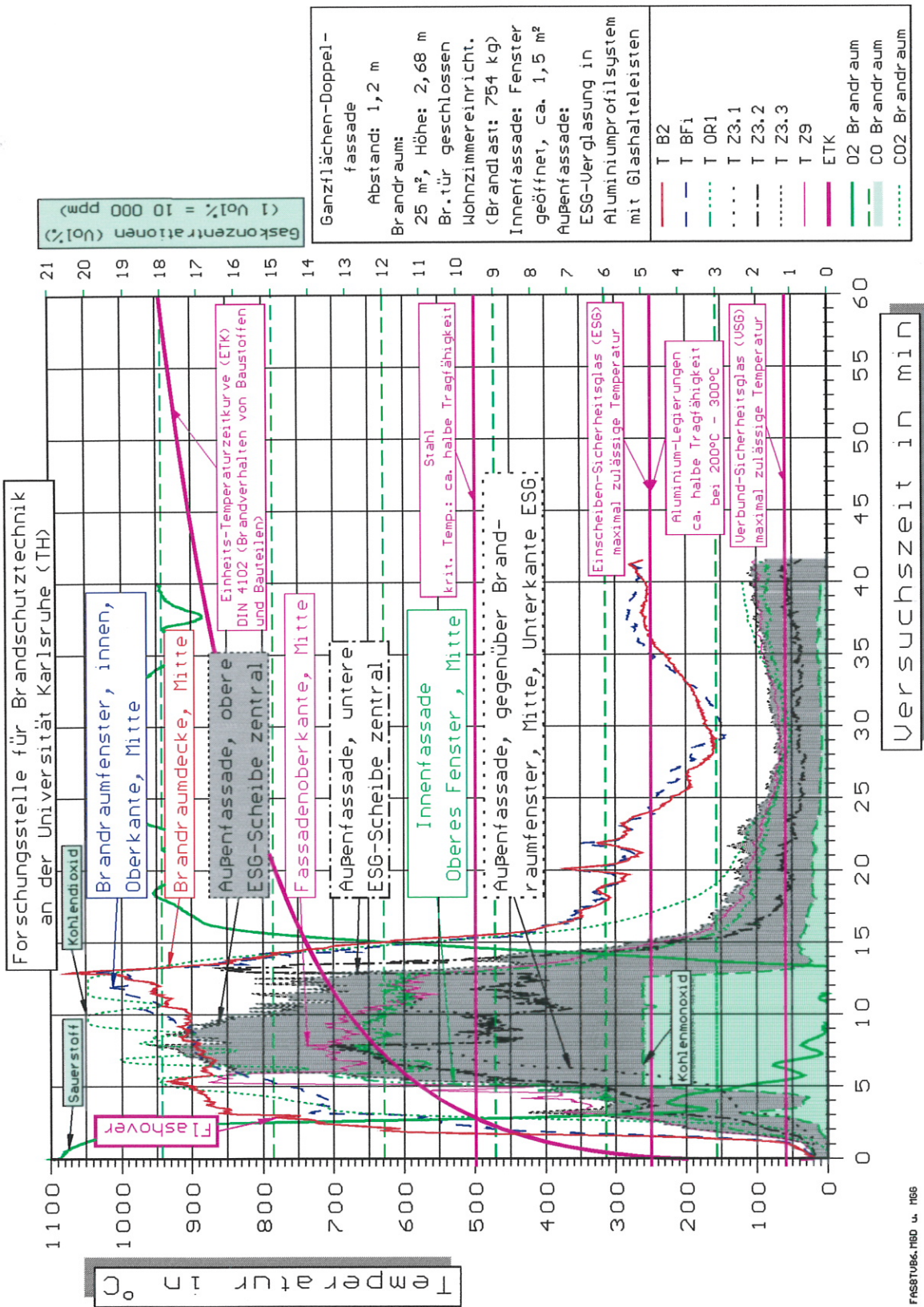


Bild 4.2.9: Beispiel 2 - Zeitlicher Verlauf verschiedener Temperaturen im Brandraum (Vergleich mit ETK, kritische Temperaturen von Stahl, Aluminiumlegierungen und Verglasungen).

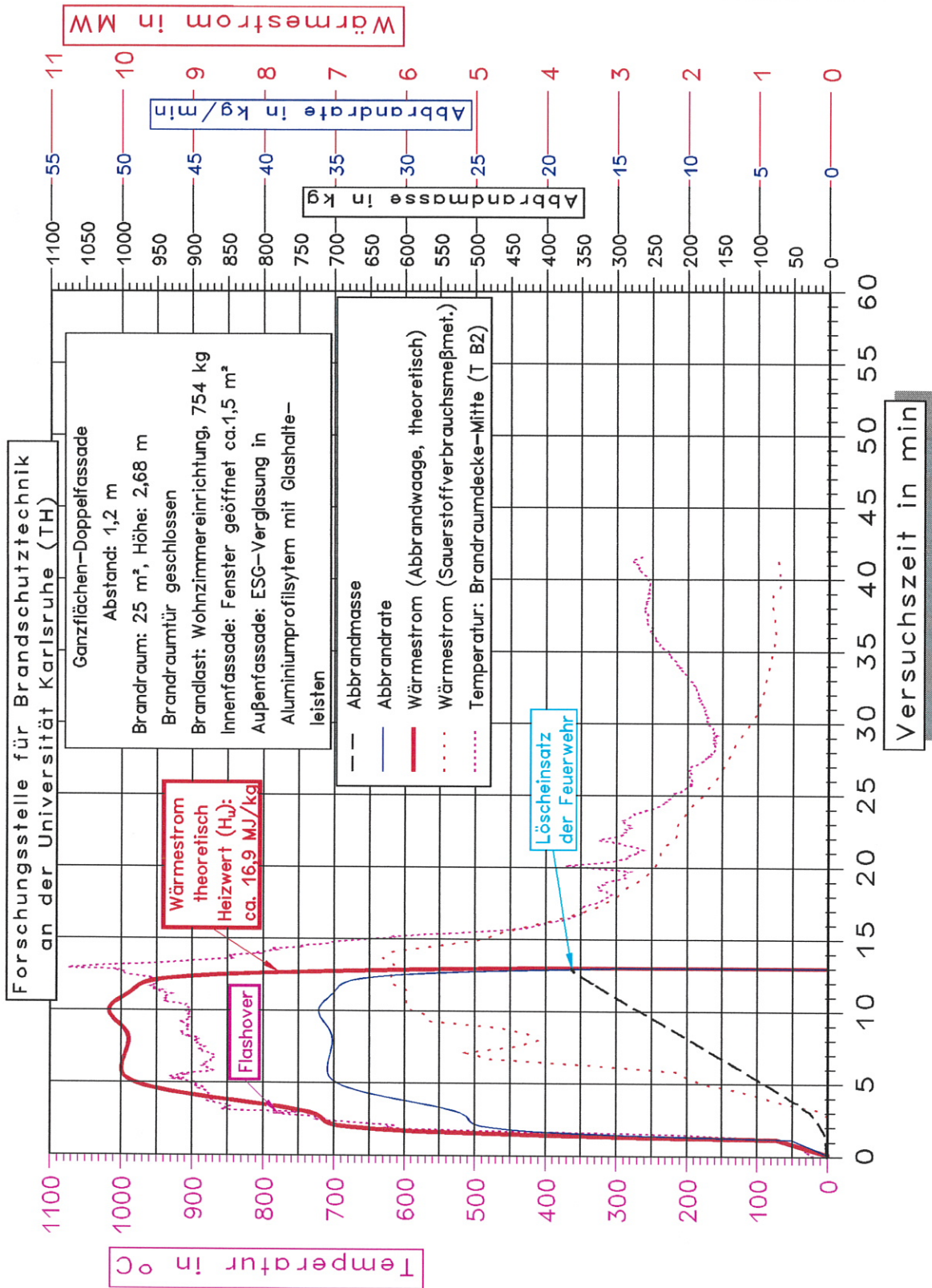


Bild 4.2.10: Beispiel 2 - Zeitlicher Verlauf der Maximaltemperatur im Brandraum sowie der Abbrandmasse, Abbrandrate und Wärmefreisetzung.

**Brand- und Rauchausbreitung bei der Kastendoppelfassade
Vertikale und horizontale Stahlabschottungen**



Außenfassade



Zwischenfassadenbereich



Außenfassade: ESG-Scheibe hat während der Brandbelastung ihre Vorspannung verloren und fällt vollständig aus dem Aluminiumprofilsystem

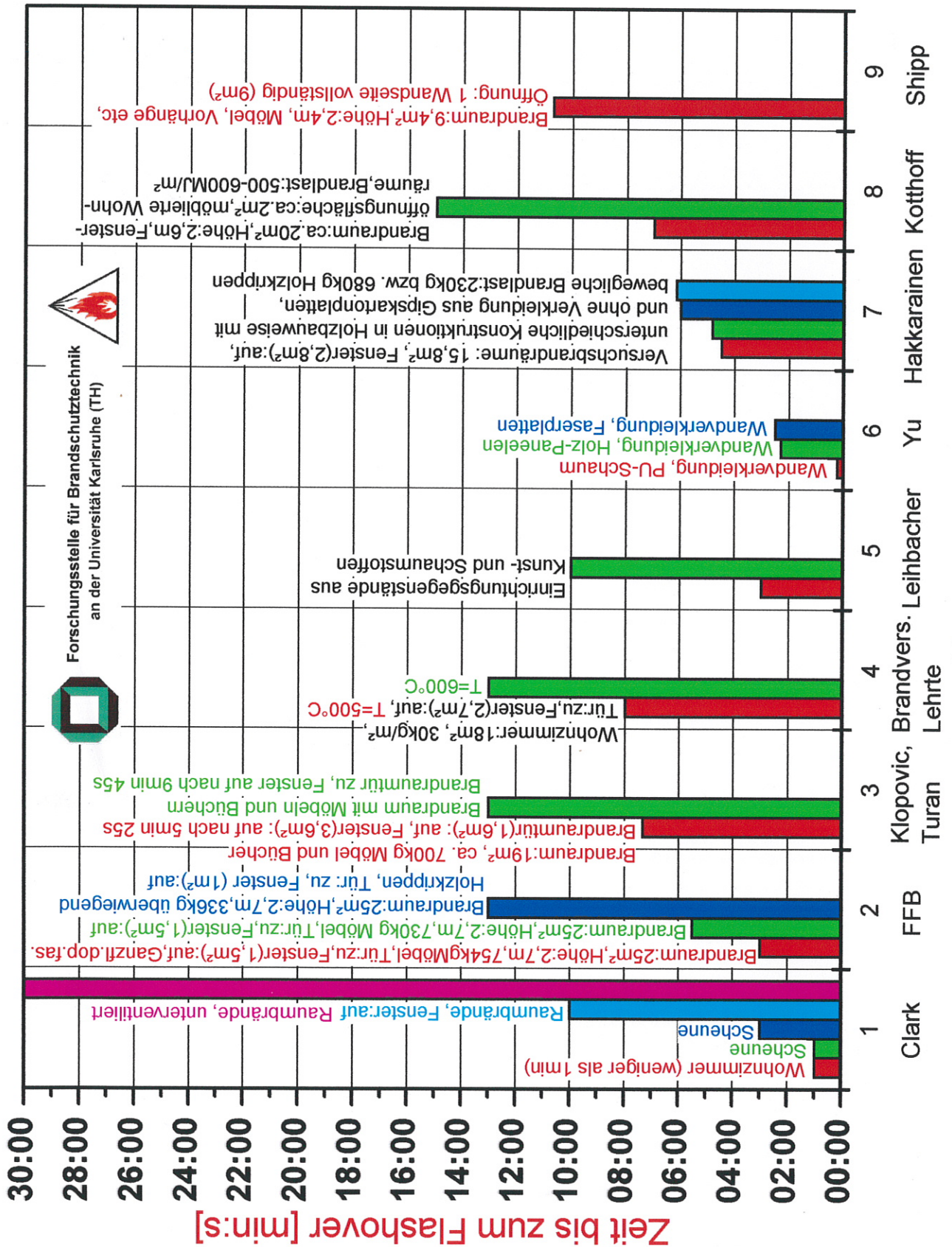


ESG-Scheibe (nach der Brandbelastung ohne Vorspannung) zerspringt auf dem Boden in große Stücke



Zwischenfassadenbereich: links: Stahlabschottungen nach dem Brand intakt (Rauchdichtheit nicht überprüft), rechts: unteres Kastenfenster ohne Scheiben

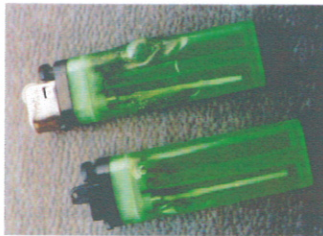
Bild 4.3: Beispiel 3 eines Brandversuches an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik. - Kastendoppelfassade mit Stahlabschottungen: Zerstörung der ESG-Verglasung.



Literaturquelle

Bild 4.4: Zusammenstellung von Zeiten bis zum Flashover aus verschiedenen internationalen Untersuchungen.

Gefährdungspotential durch Brände von Einwegfeuerzeugen

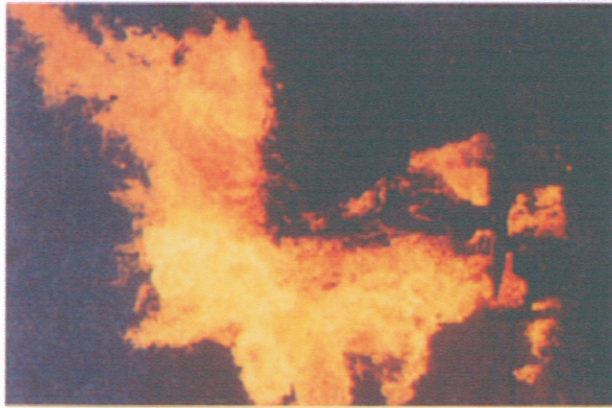


Geschädigte Feuerzeuge mit Blasen und Löchern

| | |
|----------------------|-----------|
| Abbrandzeiten: | 20 - 80 s |
| Einzelfeuerzeug: | 4 min |
| 50er Packung: | 7 min |
| zwei 50er Packungen: | 13 min |
| drei 50er Packungen: | 17 min |
| 24.000er Palette: | |



30 s: Kamineffekt



90 s: erste gezündete Gaswolke



150 s: Bildung dunklen Rauchs



5 min: Stichflammen und starke Rauchentwicklung beim Abbrand der 24.000 Feuerzeuge

Quelle: Feutlinske, K., Borsch, J.: Das Zeug zum Feuer (Fotos: BAM in Berlin), Gefährliche Ladung, 39. Jahrg., Nr. 1/1994, S. 12 - 14

Bild 5.1: Gefährdungspotential durch Brände von Einwegfeuerzeugen.

Gefährdungspotential durch Brände von Spraydosen mit Propan/Butan-Treibgas



Feuerball von nur einer Druckgaspackung; tritt dies in einem geschlossenen Raum auf...

Quelle: Pözl, A.: Schwere Unfall mit Spraydosen, (Foto: Dr. Otto Widetschek), Blaulicht 2/93, S. 24 - 26



Zündung mit drei Liter Benzin



Brandentwicklung nach eineinhalb Minuten



Brandentwicklung nach drei Minuten

In Kartons verpackte Spraydosen, auf einem Regal gelagert.

Quelle: Widetschek, A.: Spraydosen: Wie geht es weiter?, Blaulicht 7/89, S. 4 - 6

Bild 5.2: Gefährdungspotential durch Brände von Spraydosen mit Propan/Butan-Treibgas (1).

Gefährdungspotential durch Brände von Spraydosen mit brennbarem Treibgas



Palette mit 30 Kisten à 60 Dosen mit Deo-Spray (Aluminium 150 ml) auf Holzstapel (Versuch 1)



Holzstapelfeuer unmittelbar nach Zündung



Vollständige Flammeneinhüllung, Bersten erster Dosen nach 1 min 15 s



Flammenbild zum Zeitpunkt größter Heftigkeit



Brandentwicklung 2 min nach Zündung (Feuerballdurchmesser max. 10 m)



Schadensbilder bei den Druckgaspackungen

Quelle: Heller, W., Ludwig, J.: Deo-Brand, (Fotos: BAM in Berlin), Gefährliche Ladung, 2/2001, S. 27 - 30

Bild 5.3: Gefährdungspotential durch Brände von Spraydosen mit brennbarem Treibgas (2).

Fettexplosion

1 Liter Speiseöl und 50 cm³
hineingegossenes Wasser

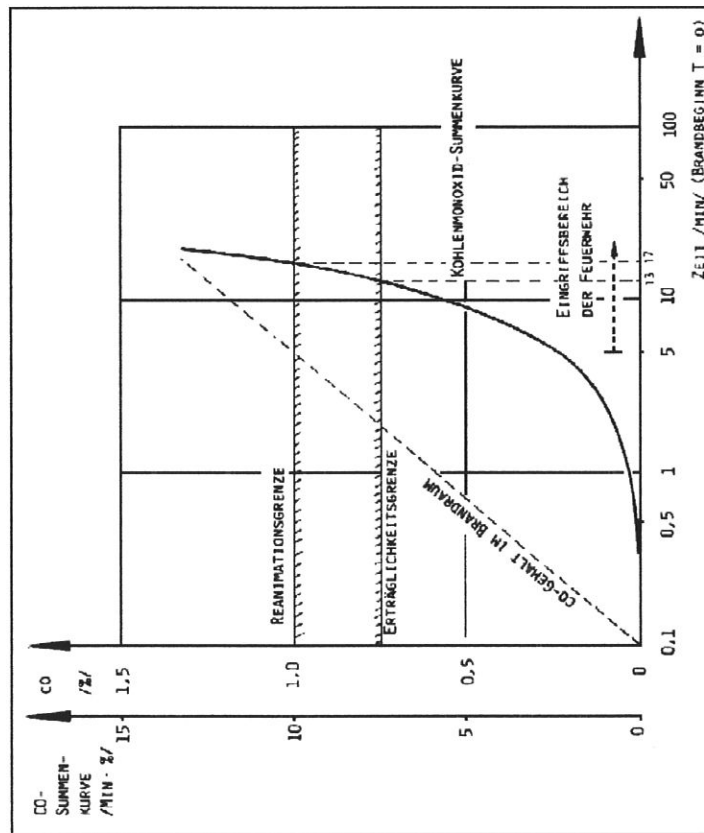
Foto: Horst Reimer, Feuerwehr Heidelberg



Bild 6: Beispiel für eine Fettexplosion.

Feuerwehrsystem - Optimierte Rettung Brandbekämpfung mit Integrierter Technischer Hilfeleistung (O.R.B.I.T.)

(Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht KT 7612, 1978)



CO-Konzentration, Erträglichkeitsgrenze und Reanimationsgrenze in Abhängigkeit von der Vorbrenndauer. (Bild 915)

| Minuten | Vorgang |
|---------|------------------------------|
| 0 | Notfallmeldung |
| 1 | Ausrücken |
| | Einsatzfahrt |
| 5 | Ankunft am Einsatzort |
| 6 | Fahrzeug abgestützt |
| 7,5 | Korb eingehängt |
| 9 | Leiter im 4. Stock |
| 10 | 1 Person mit Korb gerettet |
| 12 | 2 Personen mit Korb gerettet |
| 14 | 3 Personen mit Korb gerettet |

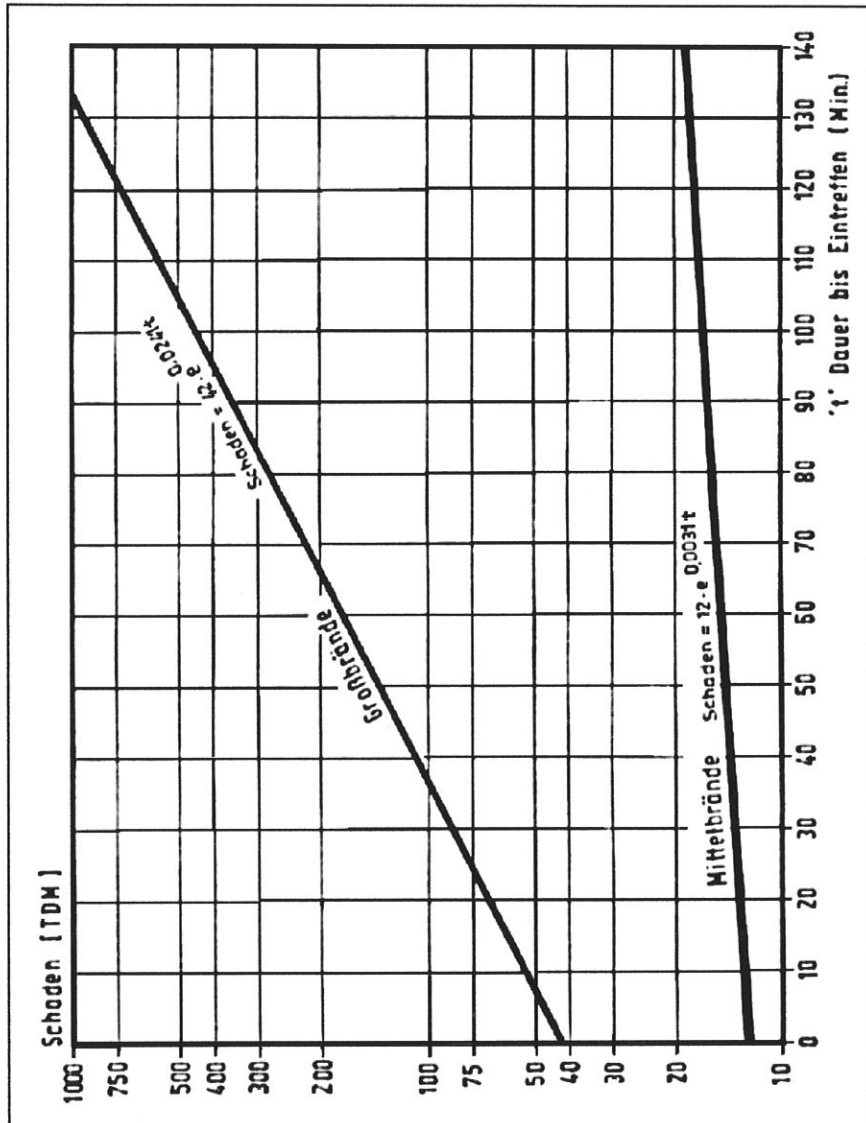
Zeitkette eines typischen Drehleitereinsatzes. (Bild 919)

Bild 7.1: O.R.B.I.T.-Studie: Darstellung der CO-Konzentration, Erträglichkeitsgrenze und Reanimationsgrenze in Abhängigkeit von der Vorbrenndauer sowie der Zeitkette eines typischen Drehleitereinsatzes.

Feuerwehrsystem - Optimierte Rettung Brandbekämpfung mit Integrierter

Technischer Hilfeleistung (O.R.B.I.T.)

(Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht KT 7612, 1978)



Zusammenhang zwischen der Zeitdauer ab Brandentstehung bis zum Eintreffen der Feuerwehr an der Einsatzstelle und dem Gesamtschaden (Sachschaden) am Einsatzobjekt nach Abschluß der Löscharbeiten. (Bild 920)

Bild 7.2: O.R.B.I.T.-Studie: Zusammenstellung zwischen der Zeitdauer ab Brandentstehung bis zum Eintreffen der Feuerwehr an der Einsatzstelle und dem Gesamtschaden (Sachschaden) am Einsatzobjekt nach Abschluß der Löscharbeiten.

Fog Nail



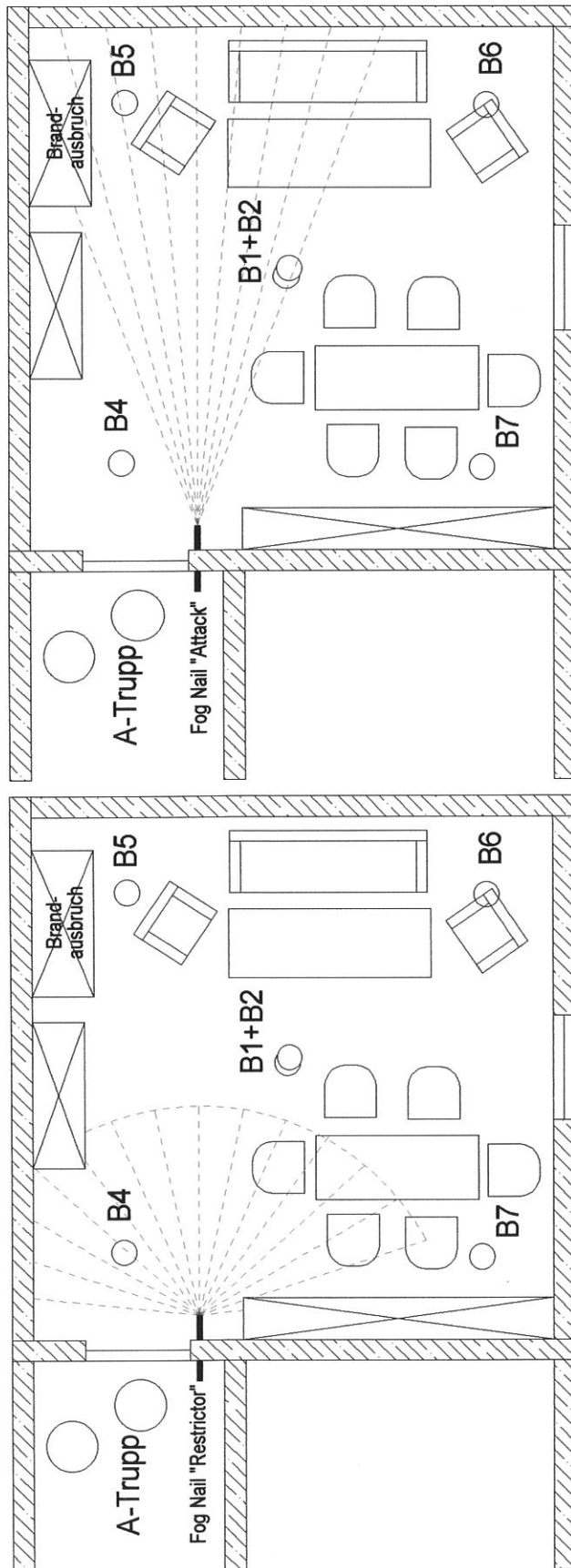
Wirkungsweise des Fog Nails:

Mit Hilfe des Fog Nails ist es möglich, Löschwasser in feinverteilter Form durch geschlossene Türen u. Fenster, durch Wände u. Decken in den Brandraum zu befördern.

Löschmechanismen: Kühlung und Sauerstoffverdrängung

Wasserversorgung: D-Schlauch, 70 l/min bei 8 bar

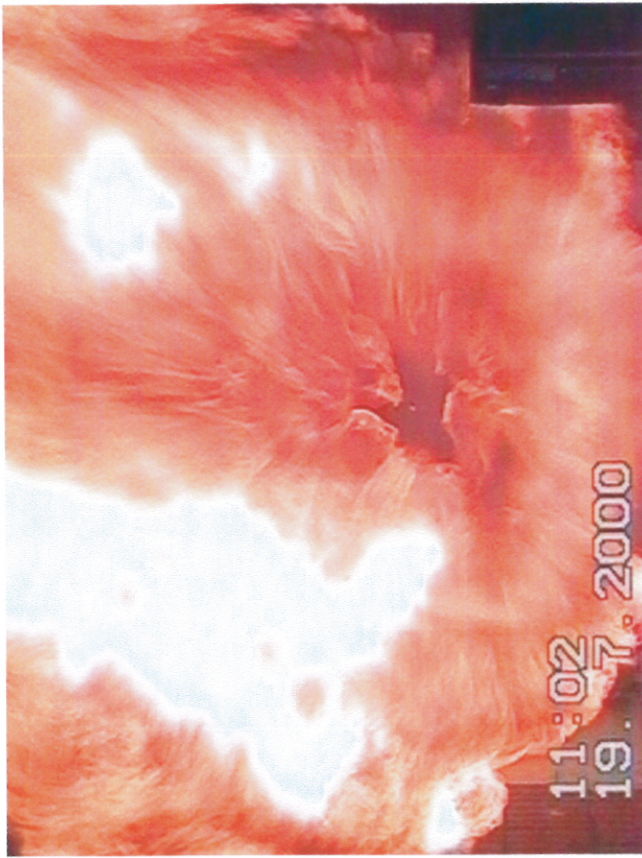
Bild 8.1: Wirkungsweise des Fog Nails (1).



Löscheinsatz mit Fog Nail bei einem Wohnzimmerbrand an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durch die Berufsfeuerwehr Karlsruhe

Quelle: Pulm, M.: Fog Nail - Der Sprinkler für danach.
Brandhilfe 10/1999, S. 345 - 352

Bild 8.2: Wirkungsweise des Fog Nails (2) - Prinzipskizze eines Löscheinsatzes bei einem Wohnzimmerbrand an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik.



Brand in einem Wohnzimmer (Brandraum: 25 m²)

Löschbeginn mit Druckluftschaum

Bildung eines Feuerballs am Brandraumfenster nach Sprühen an die aufgeheizte Decke beim vollentwickelten Brand
(„Decke kühlen“ => „Dampfexplosion“)

Bild 9: Brand in einem Wohnzimmer (Brandraum: 25 m²), Löschbeginn mit Druckluftschaum und Bildung eines Feuerballs am Brandraumfenster nach Sprühen an die aufgeheizte Decke („Decke kühlen“).