

BAFU

suisse **plan**

AARAU · LUZERN · WIL · WOHLLEN · ZÜRICH

Objektschutzmassnahmen: Grundlagen zum Bauen neben Störfallanlagen

Grundlagenbericht

Bericht Nr. Z17717-1

Zürich, 15. März 2019

suisseplan Ingenieure AG Zürich

Thurgauerstrasse 60 · 8050 Zürich · Telefon +41 (0)58 310 57 00 · www.suisseplan.ch · zuerich@suisseplan.ch

Inhaltsverzeichnis

Management Summary

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Grundlagen	1
1.3	Zielsetzung	2
1.4	Begleitung durch die Begleitgruppe	2
1.5	Vorgehen	3
2	"Störfall-Betriebe und Störfall-Anlagen": Relevanz bezüglich Objektschutzmassnahmen	4
2.1	Netzförmige Anlagen	4
2.2	Stationäre Betriebe	5
3	Störfall-Szenarien: Relevanz bezüglich Objektschutzmassnahmen	6
3.1	Brandszenarien	6
3.1.1	Länger andauernde Brandszenarien ohne ausgeprägte Druckwelle	6
3.1.2	Dynamische Brandszenarien mit Druckwelle	7
3.2	Ausbreitung toxischer Gase	10
3.3	Druckwellen	11
4	Übersicht Objektschutzmassnahmen	12
4.1	Vorgehen vorliegendes Forschungsprojekt	12
5	Tests zur Schutzwirkung Brandschutzfenster gegen Hitzestrahlung	13
5.1	Einleitung	13
5.2	Technische Eigenschaften von Fenstern	13
5.2.1	Standardfenster	13
5.2.2	Brandschutzfenster	13
5.3	Ziel der Tests	14
5.4	Lastfall durch Störfall-Lachenbrandszenarium	14
5.5	Testanordnung	16
5.5.1	Situation "Fenster in Flammennähe" (Test durch Glas Trösch)	16
5.5.2	Situation "Fenster ausserhalb Flamme" (Test durch Vetrotech)	16
5.6	Ergebnisse	16
5.6.1	Situation "Fenster in Flammennähe" (Test durch Glas Trösch)	16
5.6.2	Szenarium "Fenster ausserhalb Flamme" (Test durch Vetrotech)	25
5.7	Interpretation der Testergebnisse	30
5.7.1	Situation "Fenster in unmittelbarer Flammennähe" (Test durch Glas Trösch)	30
5.7.2	Situation "Fenster ausserhalb Flamme" (Test durch Vetrotech)	33

6	Objektbezogenes Risiko: Grundlage für die Beurteilung der Verhältnismässigkeit von Objektschutzmassnahmen	38
6.1	Aufgabenstellung und Arbeitshypothese Kriterien	38
6.2	Massgebliches Risiko (objektbezogenes Risiko)	39
6.2.1	Definition	39
6.2.2	Methodik zur Bestimmung des massgeblichen Risikos	39
6.2.3	Massgebliches objektbezogenes Risiko: Resultate	39
7	Bestimmung der Risikoreduktion durch Objektschutzmassnahmen: Fenster	46
7.1	Mustergebäude.....	46
7.1.1	Situation	47
7.1.2	Nutzung	49
7.1.3	Letalitätswahrscheinlichkeiten.....	50
7.2	Letalitätskriterien Hitzestrahlung	54
7.3	Störfallszenarium Lachenbrand	54
7.3.1	Lachenbrand auf Transportroute entlang Gebäuden.....	54
7.3.2	Bassinbrand Tanklager	63
7.4	Dynamisches Brandszenarium mit Druckwelle.....	63
7.5	Brandszenarien Erdgashochdruckleitung: Objektbezogenes Risiko	64
7.5.1	Fackelbrand.....	64
7.5.2	Feuerball.....	65
8	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	66

Anhang

A	Brandkurven
B	Störfallszenarien
C	Transmission Normalglas und EI60 Brandschutzglas
D	Testdesign
E	Grundlagen und Literatur

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Bestimmung der Risikorelevanz Berechnungsannahmen für die Bahnlinie	40
Tab. 2	Bestimmung der Risikorelevanz Berechnungsannahmen für die Bahnlinie	41
Tab. 3	Max. Personenaufkommen im repräsentativen durchschnittlichen Gebäude mit einem Grundriss von 40 x 70 m quer und von <i>70 x 30 m parallel zur Transportroute</i> (objektspezifisches Risiko) im Abstand von 10 m bzw. 20 m zur Transportroute (Bahnlinie) Gefahrgut mit einer Summenkurve für alle Leitstoffe in der Mitte Übergangsbereich	42
Tab. 4	Max. Personenaufkommen im repräsentativen durchschnittlichen Gebäude mit einem Grundriss von 40 x 70 m quer und von <i>70 x 30 m parallel zur Transportroute</i> (objektspezifisches Risiko) im Abstand von 10 m bzw. 20 m zur Transportroute (kreuzungsfreie Hauptstrasse) Gefahrgut (Transportanteil Benzin: 60%, Propan: 1%, Chlor: 0.05%) mit einer Summenkurve für alle Leitstoffe in der Mitte Übergangsbereich	44
Tab. 5	Präsenzfactoren Arbeitsbevölkerung	49
Tab. 6	Dosis-Letalitäts-Beziehung gemäss Erläuterungspapier "Letalitäten bei Brandszenarien" zum Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen	54
Tab. 7	Bestimmung der Risikorelevanz Berechnungsannahmen für die Bahnlinie	59
Tab. 8	Wahrscheinlichkeiten Lachenbrand Durchgangsstrassen (Freisetzung mit Zündung).....	60

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Beispiel Summenkurven der einzelnen Leitstoffe auf Durchgangsstrasse	7
Abb. 2	Beispiel Summenkurven der einzelnen Leitstoffe auf Schienen (jährliche Transportmenge von 1 Mio t Benzin, 30'000 t Propan und 1'000 t Chlor).....	8
Abb. 3	Temperaturverlauf der Brandgase im Ofenraum gemessen an drei Positionen 15 cm vor dem Prüfkörper (siehe Messstellenplan in Beilage) beim Test mit dem EI30 Brandschutzglas (Test Glas Trösch).....	17
Abb. 4	Temperaturverlauf der Brandgase im Ofenraum gemessen an drei Positionen 15 cm vor dem Prüfkörper (siehe Messstellenplan in Beilage) beim Test mit dem 3- fach Isolierglas (Test Glas Trösch)	18
Abb. 5	Brennerleistung (bei beiden Tests von Glas Trösch (EI30 und 3-Fach-Isolierglas) vergleichbar)	18
Abb. 6	Aufsicht auf die Versuchsanordnung bei Glas Trösch mit eingesetztem Brandschutzglas als Prüfkörper.....	19
Abb. 7	Aufsicht auf die Versuchsanordnung bei Glas Trösch mit eingesetztem Brandschutzglas als Prüfkörper	20
Abb. 8	Temperatur auf der Kaltseite EI30 Brandschutzglas, gemessen an 5 Messpunkten (Test Glas Trösch)	21
Abb. 9	Hitzestrahlungsintensität auf der Kaltseite EI30 Brandschutzglas (Test Glas Trösch)	22
Abb. 10	Aufsicht auf die Versuchsanordnung bei Glas Trösch mit eingesetztem 3-fach Isolierglas als Prüfkörper.....	23
Abb. 11	Temperatur auf der Kaltseite 3-fach Isolierglas, gemessen an 5 Messpunkten (Test Glas Trösch).....	24
Abb. 12	Hitzestrahlungsintensität auf der Kaltseite 3-fach Isolierglas (Test Glas Trösch).....	24
Abb. 13	Temperaturverlauf ETK-Test während der ersten 5 min (Test Vetrotech)	26
Abb. 14	Gesamtwärmefluss und Strahlungsintensität ETK-Test während der ersten 5 min (Test Vetrotech)	26
Abb. 15	Temperaturverlauf, Gesamtwärmefluss und Strahlungsintensität ETK-Test während des ganzen Testes (Test Vetrotech)	27
Abb. 16	Temperaturverlauf im HC-Test während der ersten 5 min (Test Vetrotech)	28
Abb. 17	Gesamtwärmefluss (konvektiv und Strahlung) im HC-Test während der ersten 5 min (Test Vetrotech)	29
Abb. 18	Temperaturverlauf und Gesamtwärmefluss HC-Test während dem ganzen Test (Test Vetrotech)	29
Abb. 19	Durch Vetrotech aufgezeichnete Daten einer HC-Kurve und Einteilung derjenigen in die Phase "rot" (1 bis ca. 70 kW/m ² Gesamtwärmefluss in 1 min), die Phase	

	"orange" (grösser 70 kW/m ² Gesamtwärmefluss über 9 Minuten) und die Phase "gelb" (Gesamtwärmefluss von grösser 170 kW/m ² über 20 Minuten).	31
Abb. 20	Temperaturverlauf, Gesamtwärmefluss und Strahlungsintensität ETK-Test während des ganzen Testes (Test Vetrotech)	36
Abb. 21	Mustergebäude (40 x 70 m) quer zur Transportroute von Gefahrgut (Beispiel: Abstand von 10 m)	47
Abb. 22	Mustergebäude (30 x 70 m) parallel zur Transportroute von Gefahrgut (Beispiel: Abstand von 10 m)	48
Abb. 23	Ereignisbaum Brand mit längerer Abbranddauer (mehrere Minuten): Schutzwirkung Gebäude	51
Abb. 24	Dimensionen Lachenbrand in Nähe Mustergebäude entlang Durchgangsstrasse.....	56
Abb. 25	Schwellenwerte und Hitzestrahlung in verschiedener Höhe über Boden in Abhängigkeit der Distanz zu einem Lachenbrand von 200 m ² Grösse (Gefahrguttransporte auf der Bahn: Kesselwagen mit 60 t Benzin), HSE Zweizonenmodell (Berechnung BAFU mit TNO Effects 10.1)	57
Abb. 26	W-A Diagramm Lachenbrand Bahn Variante 1:	61
Abb. 27	W-A Diagramm Lachenbrand Bahn Variante 2:	61
Abb. 28	Übersicht normierte Brandkurven für verschiedene Brandereignisse	A-1
Abb. 29	Hitzestrahlung in verschiedener Höhe über Boden in Abhängigkeit der Distanz zu einem Lachenbrand von 200 m ² Grösse (Gefahrguttransporte auf der Bahn: Kesselwagen mit 60 t Benzin) (Berechnung BAFU mit TNO Effects 10.1)	B-2
Abb. 30	Hitzestrahlung in verschiedener Höhe über Boden in Abhängigkeit der Distanz zu einem Bassinbrand von 5'000 m ² Grösse	B-4
Abb. 31	Hitzestrahlung in verschiedener Höhe über Boden in Abhängigkeit der Distanz zu einem BLEVE mit 45 t Propan	B-6
Abb. 32	Hitzestrahlung des Feuerballs infolge eines Totalversagens einer 16"/70 bar Erdgashochdruckleitung in 8 m Höhe über Boden in Abhängigkeit der Distanz gemäss Erläuterung	B-8

Projektleitung

Michael Hösli, Bundesamt für Umwelt

Daniel Bonomi, Bundesamt für Umwelt

Begleitgruppe

Thomas Christen, Kantonales Laboratorium Kanton Basel-Stadt

Daniel Egli-Tedesco, Sicherheitsinspektorat Kanton Basel-Land

Jesper Hansen, Sektion Betrieblicher Umweltschutz und Störfallvorsorge, Kanton Zürich

Laszlo Koller, Vereinigung Kantonalen Gebäudeversicherungen

Philippe Marti, SBB Immobilien

Peter Massny, SWISSGAS

Martin Rahn, CARBURA

Sabine Villabruna, Ports of Switzerland

Matthias Wegmann, sia

Dank

Ein grosser Dank gilt den beiden Firmen Glas Trösch AG und Vetrotech Saint-Gobain International AG, welche diese Arbeit unterstützt und die Realisierung von Versuchen ermöglicht haben. Damit haben sie den Grundstein für ein besseres Verständnis der Schutzwirkung von Brandschutzfenstern im Umfeld der Störfallvorsorge gelegt.

Management Summary

(Verfasst durch Sektion "Störfall- und Erdbebenvorsorge" des BAFU)

Werden Gebäude im Wirkungsbereich von ausserordentlichen Ereignissen (Störfällen) ausgehend von der Störfallverordnung unterstellten Betrieben, Verkehrswegen oder Rohrleitungsanlagen erstellt, so drängt sich die Frage auf, ob aus Sicht der Störfallvorsorge die Umsetzung von Schutzmassnahmen am Gebäude, sogenannten Objektschutzmassnahmen, sinnvoll wäre. Das Thema Objektschutz gewinnt in der kleinräumigen Schweiz, mit seiner hohen Nutzungsdichte, zusehends an Relevanz. Dies insbesondere bei bestehenden Bauzonen neben Störfallanlagen, welche noch nicht rechtskräftig ausgeschöpft sind. Solche Bauzonen dürfen grundsätzlich zonenkonform überbaut werden. Im Rahmen einer Erhöhung der Ausnutzung und damit der Anzahl exponierten Personen, welche sich im Wirkungsbereich von Störfällen befinden ist es möglich, dass die Risiken der Anlage stark ansteigen und im schlimmsten Fall gemäss den Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung als nicht akzeptabel beurteilt werden. Im Sinne des Vorsorgeprinzips ist es anzustreben, einen starken Anstieg der Risiken, wenn immer möglich zu vermeiden. Vorausgesetzt der Inhaber der StFV unterstellten Anlage hat alle geeigneten Sicherheitsmassnahmen bereits getroffen, verbleibt als weitere Möglichkeit die Realisierung von Objektschutzmassnahmen. Durch effektive Objektschutzmassnahmen ist es möglich, den Schutzbedürfnissen der Bevölkerung in den exponierten Gebäuden gerecht zu werden. Dabei ist auch dem Verhältnismässigkeitsprinzip, d.h. der Effizienz der Massnahmen, die notwendige Beachtung zu schenken.

Die Ansichten zum Thema Objektschutz, das heisst zum Sinn und Unsinn von Objektschutzmassnahmen, differieren bei den betroffenen Stakeholdern heute teilweise erheblich. Unser Ziel ist es folglich, objektive Kriterien dafür zu schaffen, wo und mit welchen Massnahmen ein aus gesellschaftlicher Sicht verhältnismässiger Objektschutz realisiert werden kann. Aufgrund der hohen Interdisziplinarität der Thematik wurden die Arbeiten von Beginn weg durch eine breit abgestützte Arbeitsgruppe bestehend aus Experten von Störfallfachstellen, Branchenvertretern von Störfallanlagen sowie Bau- und Brandschutzfachstellen begleitet.

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt wurde im Frühjahr 2015 unter Mitwirkung der genannten Arbeitsgruppe ein erstes Forschungsprojekt zum Thema Objektschutz initiiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Objektschutzmassnahmen aufgelistet und in ihrer Schutzwirkung gegenüber verschiedensten Einwirkungen durch Störfälle qualitativ bewertet. Zudem wurden Ereignisbäume hergeleitet welche es ermöglichen, die Schutzwirkung (Effektivität) von ausgewählten Objektschutzmassnahmen quantitativ auszuweisen. Mit dem aktuellen, zweiten Forschungsprojekt, an welchem im Zeitraum zwischen Sommer 2017 und Dezember 2018 gearbeitet wurde, sollten Kriterien erarbeitet werden welche ermöglichen zu ent-

scheiden, bei welchen Gebäuden im Wirkungsbereich von durch Störfällen ausgelösten Brandereignissen die Prüfung von Objektschutzmassnahmen sinnvoll (effizient) ist. Als Grundlage dazu dienten Szenarien ausgehend von Gefahrguttransporten mit brennbaren Stoffen bei der Bahn und auf der Strasse. Als Beurteilungsmassstab wurde entschieden, das durch die Szenarien verursachte "objektbezogene Risiko" zu verwenden. Dabei handelt es sich um das Risiko bezogen auf die Gesamtheit der sich in einem Gebäude befindlichen Personen. Für die Herleitung der Kriterien wurde das "objektbezogene Risiko" für verschiedene Personenbelegungen in verschiedenen Abständen zu Bahn und Strasse mit den gängigen validierten Methoden berechnet. Dabei wurde dasjenige "objektbezogene Risiko" berechnet, welches gerade die Mitte des Übergangsbereichs gemäss den Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung erreicht. Als weitere Aufgabe wurde mittels Praxisversuchen das Verhalten von Brandschutzfenstern bei Exposition gegenüber extremen Hitzeeinwirkung untersucht.

Die mittels des «objektbezogenen Risikos» hergeleiteten Kriterien welche im Bericht präsentierten werden, basieren auf der These, dass die Umsetzung von Objektschutzmassnahmen erst verhältnismässig ist, wenn durch die Massnahmen eine genügend grosse Anzahl Personen geschützt wird. Unter dieser Voraussetzung kann durch die Umsetzung von Massnahmen das "objektbezogene Risiko" sowie das Kollektivrisiko im Sinne der StFV merklich gesenkt werden. Die Arbeitsgruppe empfiehlt in der Folge Objektschutzmassnahmen nur bei Gebäuden, wo sich grosse Personengruppen aufhalten können, zu prüfen. Solch grosse Gebäude ermöglichen den Nutzern die Flucht in einen dem Ereignis abgewandten Gebäudeteil, wo sie für längere Zeit Schutz finden können. Diese inhärente Schutzwirkung grosser Gebäude ist ein wesentlicher Faktor, welcher es ermöglicht, verhältnismässige Objektschutzmassnahmen zu realisieren. Durch die Praxisversuche an Brandschutzfenstern konnten neue Erkenntnisse zu deren Einfluss auf die Schutzwirkung eines Gebäudes gewonnen werden. Die Resultate zeigen, dass der Einbau von Brandschutzfenstern nicht als in jedem Fall sinnvolle Massnahme beurteilt werden kann. Ein entsprechender Entscheid benötigt eine eingehende Untersuchung der baulichen und lokalen Gegebenheiten und die Einbettung der Objektschutzmassnahme «Brandschutzfenster» in ein darauf abgestimmtes Massnahmenkonzept (z.B. mit Brandabschnittsbildung und Fluchtwegen). Diese Erkenntnisse sind eine wichtige Grundlage für praxistaugliche Objektschutzkonzepte.

Um ein vollständiges Bild zum Thema Objektschutz zu erlangen werden in einem nächsten Schritt weitere Grundlagenarbeiten zu Fragen wie z.B. den Auswirkungen von Überdruck durch Explosionsereignisse zu klären sein. Um die Erkenntnisse zum Thema Objektschutz in der Praxis verankern zu können, d.h. den Stakeholdern zugänglich zu machen, ist mittelfristig die Realisierung verschiedener Arbeitsmittel anzustreben. So wäre es wünschenswert, wenn ein SIA-Merkblatt zum Thema «Objektschutzmassnahmen» sowie ein entsprechendes Faktenblatt für interessierte Kreise erarbeitet werden könnte. Das Faktenblatt könnte auf den elektronischen Plattformen der Kantone und Bundesbehörden, eventuell zusammen mit den Konsultationsbereichen gemäss StFV, zur Verfügung gestellt werden. Auch die Erarbeitung eines Musters für ein Baugesuchsformular wäre wünschenswert.

Mit dem SIA-Merkblatt und dem Faktenblatt wäre es möglich die Bauherren frühzeitig über sinnvolle Massnahmen und deren Umsetzungsmöglichkeiten zu informieren. Das Baugesuchformular würde als Rückfalleben dienen, um die Bauherren vor Realisierung des Projekts auf die Thematik aufmerksam zu machen. Als flankierende Massnahme wäre auch eine Sensibilisierungskampagne für Architekten und Bauingenieure im Rahmen von Aus- und Weiterbildungen sinnvoll.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Das Pflichtenheft zum Forschungsprojekt Objektschutz (BAFU, Juni 2017) sieht die Bearbeitung folgender Kernfragen vor:

- Bei welchen Bauten im Umfeld von welchen Störfallanlagen (bzgl. Leitstoffen) machen welche Objektschutzmassnahmen (Nutzungsart, baulich, technisch – am Objekt und in der Umgebung) Sinn (hinsichtlich Effektivität und Verhältnismässigkeit)?
- Anhand welcher Kriterien, soll die Verhältnismässigkeit von Objektschutzmassnahmen beurteilt werden (Letalitätsradien, kollektives Risiko, lokales Todesfallrisiko, Kosten etc.)?
- Wie ist der Einfluss von Objektschutzmassnahmen auf das Kollektivrisiko in der Praxis abzuschätzen?

1.2 Grundlagen

Als wichtigste Grundlagen für die vorliegende Studie Objektschutz- Grundlagen zum Bauen neben Störfallbetrieben dienen die bisherigen Studien zum Objektschutz:

- "Studie zur Bewertung von Schutzmassnahmen ausserhalb der Quelle zur Reduktion von Störfallrisiken (2015)", im Folgenden kurz "Objektschutz I" genannt mit:
 - Auflistung und Klassierung möglicher risikomindernder Massnahmen (zusammengestellt aus verschiedensten Fallbeispielen aus Risikoanalysen mit risikomindernden Massnahmen, Merkblätter anderer europäischer Länder zu risikomindernden Massnahmen)
 - Quantifizierung der Wirksamkeit von risikomindernden Massnahmen gegen Brandereignisse für Mustergebäude
 - Qualitative Beurteilung der Wirksamkeit und Effizienz
- "Beschreibung der Effektivität von Brandschutzfenstern hinsichtlich der Schutzwirkung vor Einwirkungen durch Störfallereignisse", CAS ETH, Schlussarbeit 2015, Michael Hösli
- "Wirkungen von Störfallszenarien bei der Bahn und bauliche Schutzmassnahmen an Gebäuden", Ernst Basler + Partner, 13. Januar 2009
- "Anforderungen an hitzeresistente Fassaden zum Schutz von Personen in Gebäuden", Roos + Partner, 30.7.2014

1.3 Zielsetzung

Zusammen mit der Begleitgruppe sollen die Entscheidungsgrundlagen für eine praxisgerechte und möglichst einfache Abklärung zur Notwendigkeit, Dimensionierung und Beurteilung von Objektschutzmassnahmen erarbeitet werden.

Die vorliegende Studie soll als Ziel eine Empfehlungs- und Entscheidungsmatrix als Grundlage für eine SIA Dokumentation, Vollzugshilfe BAFU etc. enthalten.

1.4 Begleitung durch die Begleitgruppe

An der ersten Sitzung der Begleitgruppe Objektschutzmassnahmen wurde festgehalten, dass der Grossteil der Arbeit in diesem Forschungsprojekt der Entwicklung eines Ansatzes zur Beurteilung der Verhältnismässigkeit von Objektschutzmassnahmen gegenüber Brandszenarien gewidmet werden soll (siehe Protokoll der Sitzung vom 5.12.2017).

Es wurde an dieser ersten Sitzung der Begleitgruppe Objektschutzmassnahmen ebenfalls beschlossen, dass künftig für die immissionsseitige Betrachtung eines Risikos für die in einem Objekt betroffene Gruppe von Personen nicht der Ausdruck "Kollektivrisiko" sondern der Begriff "Objektbezogenes Risiko" verwendet wird. Das "objektbezogene Risiko" beschreibt das Risiko bezogen auf den durch ein Projekt beeinflussten Raum und die sich darin befindlichen Personen. An der zweiten Sitzung der Begleitgruppe vom 20.4.2018 wurde in Bezug auf die Beurteilung des objektbezogenen Risikos beschlossen, dass nur einzelne Gebäude betrachtet werden sollen und nicht Zonen (bzw. Flächen) mit mehreren Häusern, d.h., dass das objektbezogene Risiko immer pro Gebäude ausgewiesen werden muss.

Zur Beurteilung der Verhältnismässigkeit ist es denkbar, dass das objektbezogene Risiko die zentrale Grundlage zur Beurteilung des Nutzens einer Massnahme liefert. Um die Verhältnismässigkeit zu beurteilen, könnte z.B. der ausgewiesene Nutzen den Kosten der Massnahmen gegenüber gestellt werden.

Am Workshop vom 5.3.2018 mit der Projektleitung des BAFU und mit suisseplan wurde zur Bestimmung der Verhältnismässigkeit beschlossen, die Wirkung von Objektschutzmassnahmen auf ein objektbezogenes Risiko anhand eines repräsentativen Mustergebäudes zu berechnen (siehe Studie zur Bewertung von Schutzmassnahmen ausserhalb der Quelle zur Reduktion von Störfallrisiken, suisseplan, Bericht Nr. Z15706-1 vom 10.12.2015).

An der zweiten Sitzung der Begleitgruppe Objektschutzmassnahmen vom 20.4.2018 wurde der Grundsatz beschlossen, dass sich das vorliegende Forschungsprojekt primär auf Brandschutzfenster als Objektschutzmassnahme fokussiert.

An der dritten Sitzung der Begleitgruppe Objektschutzmassnahmen vom 31.10.2018 wurde der Grundsatz bestätigt, dass die massgeblichen objektbezogenen Risiken sinnvollerweise mit den bestehenden anerkannten Risikermittlungsmethoden (Screening-Methodik, Rahmenbericht etc.) berechnet und bestimmt werden. Dabei wird in den vorliegenden einfachen Abschätzungen von massgeblichen objektbezogenen Risiken nicht zwischen Wohn- und Arbeitsbevölkerung unterschieden, obwohl sich diese beiden Bevölkerungsgruppen in

der Aufenthaltszeit während der Transportzeiten und im Selbstrettungspotential durchaus unterscheiden können.

1.5 Vorgehen

Für den Grundlagenbericht werden folgende Hauptthemen behandelt:

- Auswahl der zu betrachtenden Betriebe und Anlagen
- Auswahl der zu betrachtenden Szenarien
- Beurteilung der Wirkungen von Objektschutzmassnahmen

Dazu wurde in der Begleitgruppe beschlossen, das objektbezogene Risiko als ein Kriterium für die Verhältnismässigkeit von Objektschutzmassnahmen zu definieren.

Für die vorliegende Studie "Objektschutz – Grundlagen zum Bauen neben Störfallanlagen" werden die bestehenden Aufzählungen von risikomindernden Massnahmen aus der Studie Objektschutz I verwendet. Es werden im Rahmen der vorliegenden Studie Objektschutz-Grundlagen zum Bauen neben Störfallbetrieben keine umfassenden weiteren Recherchen zu möglichen weiteren risikomindernden Massnahmen vorgenommen. Der Schwerpunkt bei den Objektschutzmassnahmen wird im vorliegenden Forschungsprojekt auf Untersuchungen zur Wirkung von Brandschutzfenstern gelegt.

2 "Störfall-Betriebe und Störfall-Anlagen": Relevanz bezüglich Objektschutzmassnahmen

Der Störfallverordnung sind teilweise grundverschiedene Anlagentypen unterstellt (im vorliegenden Text kurz "Störfallanlagen" genannt). Die Wahl von Objektschutzmassnahmen und deren Wirkung auf das Störfallrisiko einer Anlage ist abhängig von den bei einer Anlage zu erwartenden Störfallszenarien.

Daher wurde im Rahmen der ersten Sitzung der Begleitgruppe vom 5.12.2017 beschlossen, sich in der vorliegenden Studie auf die nachfolgend beschriebenen Anlagentypen zu beschränken.

2.1 Netzförmige Anlagen

Im vorliegenden Grundlagenbericht Objektschutz-Grundlagen zum Bauen neben Störfallbetrieben sollen Massnahmen gegen die Einwirkungen von Störfallereignissen auf dem störfallrelevanten Schienen- und Strassennetz ("Gefahrguttransportrouten"), sowie bei Rohrleitungen aufgezeigt und diskutiert werden.

Die rasche Siedlungsentwicklung rund um netzförmige Anlagen hat in den vergangenen Jahren vermehrt zu Interessenskonflikten und steigenden Risiken bei bestehenden Anlagen geführt.

⇒ *Im Rahmen der vorliegenden Studie werden Transporte von Gefahrgütern auf Eisenbahnanlagen und auf Strassen sowie der Transport von Erdgas und Erdöl mittels Rohrleitungen betrachtet.*

2.2 Stationäre Betriebe

Untersucht werden Einwirkungen von Störfällen bei stationären Betrieben, welche die Mengenschwelle für Stoffe, Zubereitungen oder Sonderabfälle überschreiten, oder die per Verfügung der Störfallverordnung unterstellt wurden.

Betriebe mit gentechnisch veränderten, pathogenen oder einschliessungspflichtigen gebietsfremden Organismen ("B-Betriebe") werden im vorliegenden Forschungsprojekt nicht betrachtet.

Eine Auswertung der Daten des ERKAS 2013 hat ergeben, dass bei Berücksichtigung der Mengenschwellenliste von 2015 folgende Anlagentypen dominieren:

- Anlagen mit brennbaren Flüssigkeiten (v.a. Heizöl, Diesel, Benzin), z.B. Stehtankanlagen, etc.
- Anlagen mit leichtbrennbaren Gasen (v.a. Propan), z.B. Propantankanlagen
- Anlagen mit toxischen Gasen (v.a. Ammoniak, Chlorgas), z.B. Kälteanlagen

Dabei überwiegen Anlagen mit brennbaren Flüssigkeiten und leichtbrennbaren Gasen anzahlmässig.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wird auf die Betrachtung von störfallrelevanten stationären Anlagen mit toxischen Gasen aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Anzahl in der Schweiz verzichtet.

⇒ *In der Begleitgruppe wurde entschieden, im Rahmen des Forschungsprojektes stationäre Anlagen mit brennbaren Flüssigkeiten und brennbaren Gasen zu untersuchen.*

3 Störfall-Szenarien: Relevanz bezüglich Objektschutzmassnahmen

Um Objektschutzmassnahmen zu evaluieren, gilt es zunächst, die Störfallszenarien festzulegen, für welche die Objektschutzmassnahmen auszulegen sind. Als Basis für die Zusammenstellung der Szenarien dienen die in der Schweiz gültigen Rahmen- und Methodikberichte zur Störfallvorsorge. Es sind dies vor allem folgende:

- Screeningmethodik für Durchgangsstrassen (2010) und Fachapplikation MISTRA STR des ASTRA (2013)
- Methodikbericht Screening Personenrisiken 2014 beim Transport gefährlicher Güter auf der Bahn
- Rahmenbericht Erdgas, 2010
- Rahmenbericht Stehtankanlagen, 2005
- Rahmenbericht Flüssigastankanlagen (1992)

Gemäss diesen Rahmen- und Methodikberichten werden hauptsächlich folgende Störfallszenarien behandelt:

- Brandszenarien
- Ausbreitung toxischer Gase
- Druckwellen

3.1 Brandszenarien

3.1.1 Länger andauernde Brandszenarien ohne ausgeprägte Druckwelle

(siehe Anhang B 1)

Länger andauernde Brandszenarien ohne ausgeprägte Druckwelle sind:

- Lachenbrand, Bassinbrand
- Fackelbrand

⇒ *Da der Leitstoff Benzin im Vergleich zu den anderen Leitstoffen auf der Strasse und auf der Bahn schweizweit am häufigsten transportiert wird und bei Störfällen mit Benzintransporten ein Lachenbrand das häufigste Störfallszenario ist, werden im vorliegenden Grundlagenbericht länger andauernde Brandszenarien ohne ausgeprägte Druckwelle weiterverfolgt.*

3.1.2 Dynamische Brandszenarien mit Druckwelle

(Siehe Anhang B 2 und Anhang B 3)

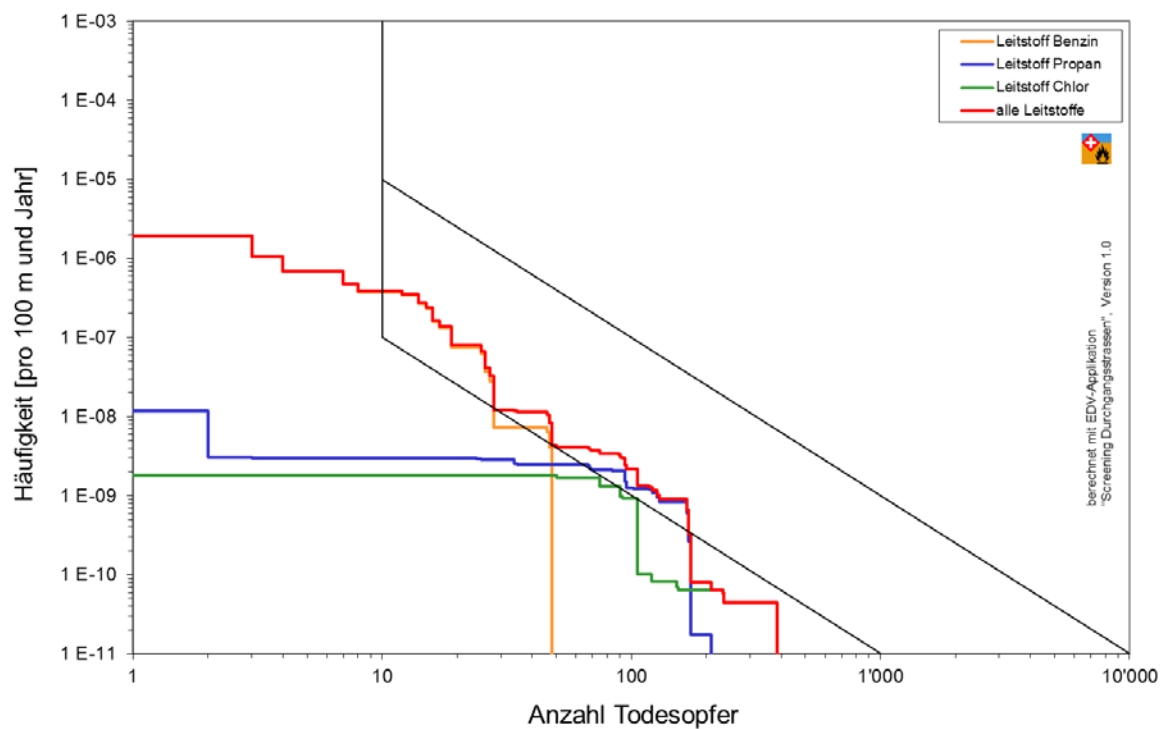
3.1.2.1 BLEVE (LPG)

Flüssiggas (LPG) wird sowohl in stationären Betrieben gelagert als auch auf dem Strassen- und Schienennetz transportiert.

3.1.2.2 BLEVE bei Gefahrguttransporten

Der Anteil leichtbrennbarer Gase (Leitstoff LPG) am gesamten Gefahrguttransport beträgt in der Fachapplikation STR des ASTRA und gemäss Methodik Durchgangsstrassen 1%, der Anteil brennbarer Flüssigkeiten (Leitstoff Benzin) beträgt 60%. Dies führt dazu, dass in aller Regel bei Risikoanalysen für Verkehrswege aufgrund der relativ hohen Eintretenshäufigkeit die Szenarien mit brennbaren Flüssigkeiten das Risiko dominieren, auch wenn bei brennbaren Gasen grössere Radien angenommen werden.

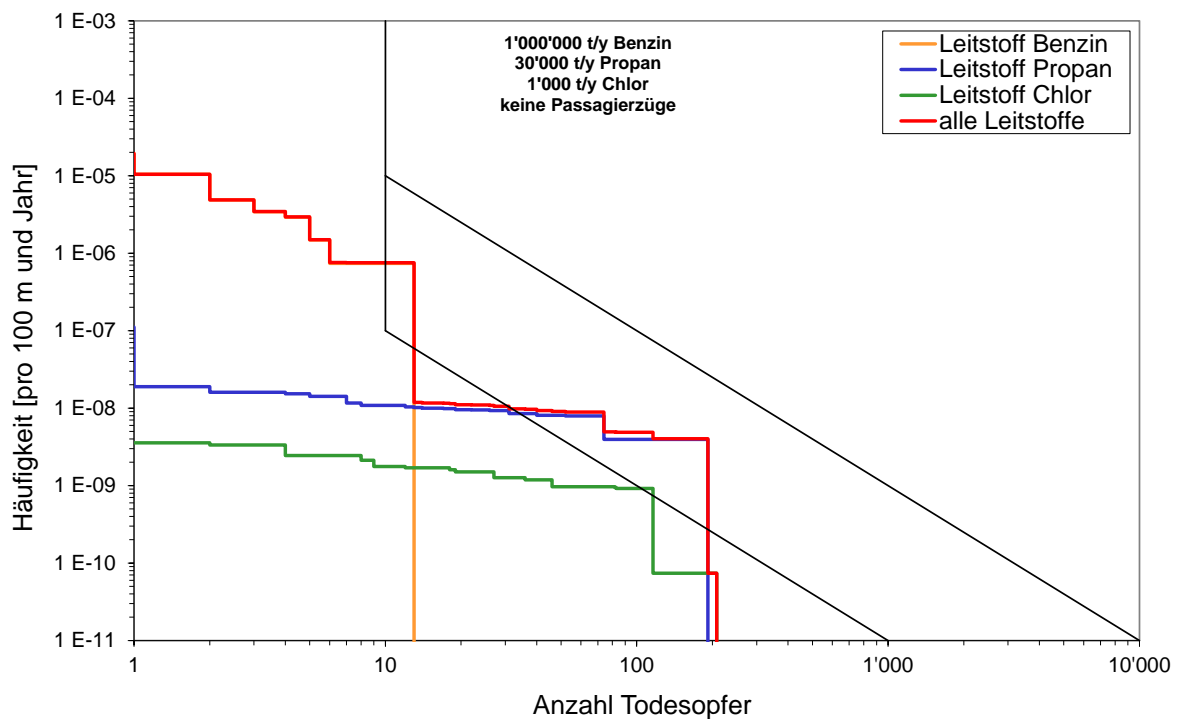
Abb. 1 Beispiel Summenkurven der einzelnen Leitstoffe auf Durchgangsstrasse



⇒ Für die Betrachtung von Objektschutzmassnahmen im Einflussbereich von Störfällen an Nationalstrassen und Durchgangsstrassen werden BLEVE-Szenarien nicht weiterverfolgt.

Bei Gefahrguttransporten auf Schienen ist der jeweilige Transportanteil der Leitstoffe stark variabel, so dass auch Szenarien mit brennbaren oder toxischen Gasen das Risiko für Personen in der Umgebung ausserhalb der Bahnanlage dominieren können.

Abb. 2 Beispiel Summenkurven der einzelnen Leitstoffe auf Schienen
(jährliche Transportmenge von 1 Mio t Benzin, 30'000 t Propan und 1'000 t Chlor)



⇒ Für die Betrachtung von Objektschutzmassnahmen im Einflussbereich von Störfällen an Schienen müssen je nach Anteil Leitstoffe an den Transportmengen auch BLEVE-Szenarien berücksichtigt werden.

3.1.2.3 BLEVE bei stationären Anlagen

Für stationäre LPG-Anlagen (Propantankanlagen, etc.) ist die Betrachtung der BLEVE Szenarien für Objektschutzmassnahmen sinnvoll, da diese in der Regel das Risiko bestimmen.

⇒ *Die Begleitgruppe hat beschlossen, BLEVE-Szenarien bei stationären Propantankanlagen grundsätzlich zu berücksichtigen.*

3.1.2.4 Feuerball

Gemäss Fehler – und Ereignisbaum im Rahmenbericht Erdgashochdruckleitungen tritt in 25% aller Totalversagen ein Feuerball auf. Der Feuerball bei sofortiger Zündung des Gasaustritts hat somit eine höhere Eintretenswahrscheinlichkeiten als der Fackelbrand bei verzögerter Zündung des Gasaustritts (18.75%). Aufgrund der Branddimensionen gemäss standardisiertem Störfallszenarium hat der Feuerball auch grössere Letalitätsradien und somit in der Regel auch höhere Ausmasswerte zur Folge. Der Feuerball (mit anschliessendem Fackelbrand) dominiert somit häufig die Summenkurve.

⇒ *Für die Betrachtung der Wirkung von Objektschutzmassnahmen im Einflussbereich von Störfällen an Erdgashochdruckanlagen wird das Szenarium Feuerball weiterverfolgt.*

3.2 Ausbreitung toxischer Gase

Toxische Gase werden sowohl in stationären Betrieben gelagert und verbraucht als auch auf dem Strassen- und Schienennetz transportiert. Zur Freisetzung toxischer Gase hat die Begleitgruppe in ihrer Sitzung vom 5.12.2017 Folgendes beschlossen:

3.2.1.1 Ausbreitung toxischer Gase bei Gefahrguttransporten

Auf die Berücksichtigung der Freisetzung toxischer Gase bei Gefahrguttransporten wird aus folgenden Gründen verzichtet.

- Der Anteil toxischer Gase (Leitstoff Chlorgas) am gesamten Gefahrguttransport beträgt in der Fachapplikation STR des ASTRA 0.05 %, im Gegensatz dazu liegt der Anteil brennbarer Flüssigkeiten (Leitstoff Benzin) bei 60%. Dies führt dazu, dass in aller Regel bei Risikoanalyse für Verkehrswege aufgrund der Häufigkeit Szenarien für brennbare Stoffe das Risiko dominieren, auch wenn bei toxischen Gasen grössere Radian angenommen werden.
- Massnahmen am Gebäude gegen Chlor wurden bereits in der Arbeitsgruppe zur gemeinsamen Erklärung II als nicht verhältnismässig eingestuft.
- Mögliche Massnahmen (z.B. Luftansaugung über Dach) sind in der "Studie zur Bewertung von Schutzmassnahmen ausserhalb der Quelle zur Reduktion von Störfallrisiken" vom 10. Dezember 2015 aufgeführt.

⇒ *Im vorliegenden Forschungsprojekt werden Szenarien mit der Ausbreitung von toxischen Gasen nicht weiterverfolgt.*

Der Ansatz zur Beurteilung der Verhältnismässigkeit von Objektschutzmassnahmen, der im Rahmen der vorliegenden Studie erarbeitet wurde (siehe Kap. 6 des vorliegenden Grundlagenberichtes), kann prinzipiell auch auf nicht weiter vertiefte Störfallszenarien mit Ausbreitung toxischer Gase angewendet werden.

3.2.1.2 Ausbreitung toxischer Gase bei stationären Betrieben

Auf die Berücksichtigung stationärer Anlagen mit toxischen Gasen wird verzichtet.

3.3 Druckwellen

3.3.1.1 Explosion

Druckwellen aufgrund einer Explosion eines zündfähigen Gas-Luft-Gemischs in verdämmer Umgebung können in spezifischen Situationen auftreten. Es handelt sich jedoch nicht um ein Szenarium, das standardmässig in den Risikoanalysen berücksichtigt wird. Im Vergleich zu den Standard-Brandszenarien sind Explosionsszenarien, bei denen die Druckwirkung gegenüber den thermischen Auswirkungen überwiegt, weniger häufig.

Eine Druckeinwirkung auf Gebäude wird deshalb nur berücksichtigt, wenn sie vor oder während eines Brandszenariums auftritt und somit Gebäudeelemente, welche einen Schutz gegen Brandeinwirkung gewährleisten sollten, beschädigen und damit deren Schutzwirkung beeinträchtigen kann.

3.3.1.2 Druckwelle

Störfallszenarien mit brennbaren Gasen oder Flüssigkeiten, bei denen die Gase oder Flüssigkeiten nicht zünden, werden im vorliegenden Forschungsprojekt nicht untersucht.

Dazu gehören z.B. Druckwellen allein aufgrund des Innendrucks des Behälters oder Transportmittels (z.B. Bersten eines Behälters oder einer Rohrleitung). Bei diesen Szenarien wird in den Vollzugshilfen üblicherweise von einem untergeordneten Risikobeitrag ausgegangen, so dass sie in den Vollzugshilfen nicht berücksichtigt werden.

Beim BLEVE z.B. wird von einem Behälterbersten mit Zündung ausgegangen, so dass der BLEVE inkl. Druckwelle berücksichtigt wird.

3.3.1.3 Schlussfolgerungen für Untersuchungen Objektschutzmassnahmen

⇒ *Die Arbeitsgruppe hat beschlossen, im vorliegenden Forschungsprojekt auf die weitere Untersuchung von Objektschutzmassnahmen gegen Störfallszenarien mit Druckwirkung zu verzichten, da dieses Szenarium ohne Zündung der brennbaren Stoffe in Risikoanalysen quantitativ untergeordnet ist und da die Ausbreitung einer Druckwelle stark von den örtlichen Gegebenheiten (Verdämmung) abhängt.*

4 Übersicht Objektschutzmassnahmen

Objektschutzmassnahmen können eine Reduktion der Ausbreitung (z.B. Ausbreitung von brennbaren Flüssigkeiten, welche bei Zündung zu Lachenbrand führt) und eine abschirmende Wirkung der Störfallauswirkungen (z.B. Hitzestrahlung bei Brandszenarien) bewirken.

Bauliche Massnahmen an Gebäuden z.B. zielen auf einen möglichst *grossen Schutz vor Hitzestrahlung auf Personen im Gebäudeinneren während der Abbranddauer* und auf gute Fluchtwege, welche den Schutz und die Chancen für eine Selbstrettung der Personen bei einem Sekundärbrand (Zündung des Gebäudeinneren) erhöhen. Die Effektivität dieser Massnahmen, d.h. eine Reduktion der Letalität der Personen in Gebäuden, ergibt sich somit in der Regel aus der Kombination solcher Massnahmen.

Eine ausführliche Liste möglicher Objektschutzmassnahmen findet sich in der "Studie zur Bewertung von Schutzmassnahmen ausserhalb der Quelle zur Reduktion von Störfallrisiken (2015)".

4.1 Vorgehen vorliegendes Forschungsprojekt

An der zweiten Sitzung der Begleitgruppe Objektschutzmassnahmen wurde der Grundsatz beschossen, dass sich das vorliegende Forschungsprojekt primär auf Brandschutzfenster als Objektschutzmassnahme fokussiert, weil insbesondere bei dieser Objektschutzmassnahme, welche im Vollzug der Störfallvorsorge oft diskutiert wird, die für eine Abschätzung der Wirkung wichtigen Parameter noch nicht genau bekannt sind.

Im Weiteren sind Fenster in der Gebäudehülle meist der Schwachpunkt bezüglich der zu erwartenden Einwirkungen (wie Wärmestrahlung und Druck) durch einen Störfall. Durch den Einbau von Brandschutzfenstern in Kombination mit einer Fassade mit entsprechendem Feuerwiderstand soll die Schutzwirkung des Gebäudes gegenüber Wärmestrahlung erhöht werden.

5 Tests zur Schutzwirkung Brandschutzfenster gegen Hitzeabstrahlung

5.1 Einleitung

Fenster sind in der Gebäudestruktur meist als Schwachpunkt bezüglich der zu erwartenden Einwirkungen durch einen Störfall (wie Wärmeabstrahlung und Druckwelle) zu betrachten.

Durch eine Verstärkung der Gebäudefassaden mittels Brandschutzfenster kann die Schutzwirkung eines Gebäudes gegenüber Wärmeabstrahlung für die Personen im Innern theoretisch erhöht werden. Es stellt sich jedoch die Frage, ob solche Brandschutzfenster im Störfall auch wirksam und in der Praxis tauglich sind.

5.2 Technische Eigenschaften von Fenstern

5.2.1 Standardfenster

Im Rahmenbericht für Erdgashochdruckanlagen und den Erläuterungen "Letalitäten bei Brandszenarien" wird davon ausgegangen, dass Standardfenster (Doppelverglasung) bei einfallenden Wärmestromdichten grösser $30\text{--}35\text{ kW/m}^2$ in den ersten Minuten Löcher aufweisen.

Für Standardfenster wird im Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen mit einem Transmissionskoeffizienten von 0.5 gerechnet. Gemäss Bericht Laboratoire Efectis 2006 ¹ haben einfach verglaste Fenster einen Transmissionskoeffizienten von 0.54.

5.2.2 Brandschutzfenster

Die Fenster bestehen aus mindestens zwei Glasscheiben. Dabei handelt es sich meist um thermisch vorgespanntes Glas welches z.B. mit wärmeabstrahlungsreflektierenden Schichten (EW-Gläser) oder thermisch isolierend wirkenden Schichten (EI-Gläser) kombiniert werden. Als thermisch isolierend wirkende Schichten können z.B. Alkali-Silikat-Gels (Thermo-Transformations-Schicht TTS) eingesetzt werden. Erreicht die Temperatur an der Fensterscheibe über 120°C , zerplatzt die Scheibe und das Gel beginnt aufzuschäumen, wodurch ein undurchsichtiger Schaum entsteht.

Geprüft werden die Brandschutzfenster üblicherweise mit der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK, ISO-Kurve (ISO 834)). Prüfungen mit der Hydrocarbon Curve (HC) stellen einen Sonderfall dar. Gemäss Angabe von Vetrotech vom 18.9.2018 ist kein HC-geprüftes System für eine Gebäudehülle bekannt. (Brandkurven siehe Anhang A)

¹ Caractérisation et réduction de la vulnérabilité du bâti face à un phénomène dangereux technologique thermique, Seiten 57, 58 und 74, Efectis France, 13 décembre 2006

Auf Basis des Berichts Laboratoire Efectis 2006 kann für Brandschutzfenster ein konservativ abgeschätzter Transmissionskoeffizient von ca. 0.2 angenommen werden.

5.3 Ziel der Tests

Belastungen durch Brandszenarien wie z.B. Lachenbrand, können sehr hohe Hitzeabstrahlung auf Gebäude in unmittelbarer Nähe verursachen (siehe Kap 3.1 und Anhang A des vorliegenden Grundlagenberichtes). Prüfnachweise (Normen) für eine so grosse Belastung von Brandschutzfenstern durch ein Brandszenarium bei einem Störfall sind keine bekannt.

Für die Beurteilung der Schutzwirkung von Brandschutzfenstern im Störfall müssen deshalb verlässliche Daten bezüglich deren maximalen thermischen Belastbarkeit sowie bezüglich deren Transmissionsverhalten (vor und nach Aktivierung von allenfalls vorhandenen TTS) ermittelt werden. Diese Daten sollen durch Praxisversuche mit repräsentativen Brandschutzprodukten ermittelt werden.

Eine allfällige Druckwelle infolge eines Störfallereignisses wird in den Tests nicht berücksichtigt.

5.4 Lastfall durch Störfall-Lachenbrandszenarium

Bei den Brandszenarien, wie sie bei einem worst case Störfall auftreten können, handelt es sich um sehr grosse Brände. Bei einem Benzin-Lachenbrand mit einer Fläche von 200 m², wie er beispielsweise bei einem Bahnkesselwagen auftreten kann, beträgt die Flammhöhe gemäss Modellrechnung mit dem HSE-Zweizonenmodell von TNO Effects mehr als 20 m (Berechnung BAFU 27.3.2018). Je nach Brennstoff und Temperaturverhältnissen breitet sich die Flamme nach einer Zündung sehr rasch über die Lachenoberfläche aus. Bei Benzin beispielsweise ist damit zu rechnen, dass eine Lache von 200 m² innert einiger Sekunden voll in Brand steht. Bei Benzinlachenbränden ist deshalb eine Fassade eines Gebäudes in der Nähe eines Störfallereignisses rasch sehr hohen thermischen Lasten ausgesetzt. Bei turbulenten Gas-Brandszenarien wie Feuerball, Fackelbrand, BLEVE, Jet-Fire etc. ist mit einer noch rascheren Brandentwicklung zu rechnen.

Vereinfachend können grundsätzlich zwei Situationen unterschieden werden:

- Die Fassade befindet sich innerhalb der Flamme bzw. es besteht Flammenkontakt.
- Die Fassade befindet sich ausserhalb der Flamme, ist aber der von der Flamme ausgehenden Wärmestrahlung ausgesetzt.

Bei Flammenkontakt steht die Fassade mit den Fenstern im Kontakt mit den heissen Reaktionsprodukten. Die Wärmeübertragung auf die Fassade erfolgt somit über Moleküle wie CO₂, H₂O, CO etc. und Russpartikel auf konvektivem Weg in Abhängigkeit der Temperatur- und Strömungsverhältnisse und der spezifischen Wärmeübergangskoeffizienten. Ein Teil der Wärmeübertragung erfolgt wahrscheinlich auch in Form von Wärmestrahlung (Photonen).

Im Bereich ausserhalb der Flamme ist die Fassade der von der Flamme ausgehenden Wärmestrahlung ausgesetzt. Die Wärmeübertragung erfolgt in diesem Bereich grösstenteils in Form von Strahlung (d.h. elektromagnetische Wellen bzw. Photonen), ev. ausgenommen die Fassade befindet sich gerade in der heissen Brandgasfahne des Lachenbrands. Die Strahlungsintensität nimmt mit zunehmender Distanz der Fassade zur Flamme ab.

Zwischen der Wärmeübertragung auf konvektivem Weg und der Wärmeübertragung durch elektromagnetische Strahlung gibt es wichtige Unterschiede: Bei der Strahlung spielen Reflexion, Absorption und Transmission eine wichtige Rolle. Die Transmission gibt an, welcher Strahlungsanteil durch das Fenster hindurchtritt und allenfalls hinter dem intakten Fenster noch eine Schädigung entfalten kann. Das materialspezifische Absorptionsverhalten bestimmt, wie stark und an welchen Stellen sich das Fenster infolge der Bestrahlung erwärmt. Reflexion, Absorption und Transmission sind von den Materialeigenschaften des Fensters und dem Strahlungsspektrum (Wellenlängenverteilung) der Hitzestrahlung abhängig.

Bei der konvektiven Wärmeübertragung spielen spezifische Materialeigenschaften sowie Temperatur und Strömungsverhältnisse der Reaktionsprodukte eine wichtige Rolle. Effekte wie Reflexion, Absorption und Transmission der Strahlung sind bei der konvektiven Wärmeübertragung nicht vorhanden. Somit besteht die Möglichkeit, dass sich das Erwärmungsverhalten und die Schutzwirkung eines Fensters unterscheiden, je nachdem, ob die Wärmeenergie in Form von Strahlung oder auf konvektivem Weg übertragen wird. Möglicherweise führt die Wärmestrahlung unterschiedlich stark und an anderen Stellen im Glaskörper zur Erwärmung, als dies bei konvektiver Wärmeübertragung der Fall ist, je nachdem, an welchen Stellen im Glaskörper die Strahlung absorbiert wird. Dies ist insbesondere von Bedeutung, da Brandschutzfenster aus verschiedenen Schichten mit allenfalls unterschiedlichen optischen Eigenschaften bestehen.

Die Flammentemperaturen bei Lachenbränden mit Heptan, Kerosin und Rohöl und einem Lachendurchmesser von 20 bis 50 m erreichen gemäss Versuchen des japanischen National Research Institute of Fire and Disaster 1'100 bis >1'400 °C. Das SFPE Handbook of fire protection engineering gibt aufgrund verschiedener Quellen für Lachenbrände von 0.1 bis 50 m Durchmesser mit nicht näher spezifizierten Kohlenwasserstoffen zeitlich gemittelte Maximalwerte von 900 bis 1'100°C an. Für turbulenterer Störfall-Brandzenarien wie BLEVE, Feuerball, Fackelbrand und Jet Fire liegen die Temperaturen möglicherweise höher. Diese Werte geben einen Anhaltspunkt für den Fall "Flammenkontakt".

Für die Oberflächenabstrahlung von Lachenbrandflammen gibt die britische Behörde HSE maximale Strahlungsintensitäten von 130 kW/m² für Benzin- und Diesel- und 250 kW/m² für Propanlachenbrände an. Für Öl Jetfires gibt HSE eine Oberflächenabstrahlung von 200 bis 400 kW/m² an. Für Erdgas-Feuerbälle und Fackelbrände wird im Rahmenbericht eine Oberflächenabstrahlung von 210 kW/m² angenommen. Diese Werte geben einen Anhaltspunkt für den Fall "ausserhalb der Flamme", wobei es sich um die Strahlungsintensität in unmittelbarer Nähe der Flammenoberfläche handelt. Britische Versuchsreihen zeigen, dass sich das Strahlungsspektrum bei grossen Kohlenwasserstoff-Lachenbränden in grober Näherung einem planckschen Strahler annähert. Bei kleineren Kohlenwasserstoffbränden, insbesondere auch Jet Fires weicht das Strahlungsspektrum deutlich von einem planckschen Strahler ab.

5.5 Testanordnung

Aus den im vorangehenden Kapitel beschriebenen zwei unterschiedlichen Situationen, "Flammenkontakt" und "ausserhalb Flamme" ergeben sich zwei verschiedene Testanordnungen:

5.5.1 Situation "Fenster in Flammennähe" (Test durch Glas Trösch)

(Siehe auch Dokument Testdesign: Maximalbelastungstest an Brandschutzfenstern)

Mit dem Test sollte geprüft werden, wie lange ein Brandschutzfenster EI30 einer direkten Beflammung standhält. Der Fall "Flammenkontakt" sollte abgebildet werden, in dem eine Brennerflamme direkt auf das Brandschutzfenster auftrifft.

Direkter Flammenkontakt (ursprüngliches Ziel des Tests) war in der Versuchsanordnung jedoch nicht möglich: Konstruktionsbedingt konnte beim Test kein Flammenkontakt mit dem Prüfkörper erreicht werden. Die Belastung des Prüfkörpers beim Test liegt somit unterhalb derjenigen beim Flammenkontakt bei einem Störfall-Lachenbrand.

Ebenfalls wurde zum Vergleich ein Standard Isolierglas getestet.

5.5.2 Situation "Fenster ausserhalb Flamme" (Test durch Vetrotech)

Mit dem Test wurde gemessen, welche Wärmestromdichten bei einem Prüfverfahren gemäss Einheitstemperaturkurve ETK und Hydrocarbonkurve HC auftreten.

Siehe Dokument Testdesign: Maximalbelastungstest an Brandschutzfenstern

5.6 Ergebnisse

5.6.1 Situation "Fenster in Flammennähe" (Test durch Glas Trösch)

Die Brennerleistung wurde während der ersten Minute kontinuierlich erhöht. Nach ca. 1 Minute erreichte sie 100%.

Die Temperatur der Brandgase im Ofenraum, gemessen 15 cm vor dem Prüfkörper, erreichte 500°C nach ca. 10 s. Nach ca. 1 min erreichte sie 900°C und stieg dann beim Test mit dem Brandschutzfenster kontinuierlich auf über 1'100°C am Ende des Tests nach 15 min an bzw. auf knapp 950°C nach 2.5 min beim Test mit dem 3-fach Isolierglas.

Abb. 3 Temperaturverlauf der Brandgase im Ofenraum gemessen an drei Positionen 15 cm vor dem Prüfkörper (siehe Messstellenplan in Beilage) beim Test mit dem EI30 Brandschutzglas (Test Glas Trösch)

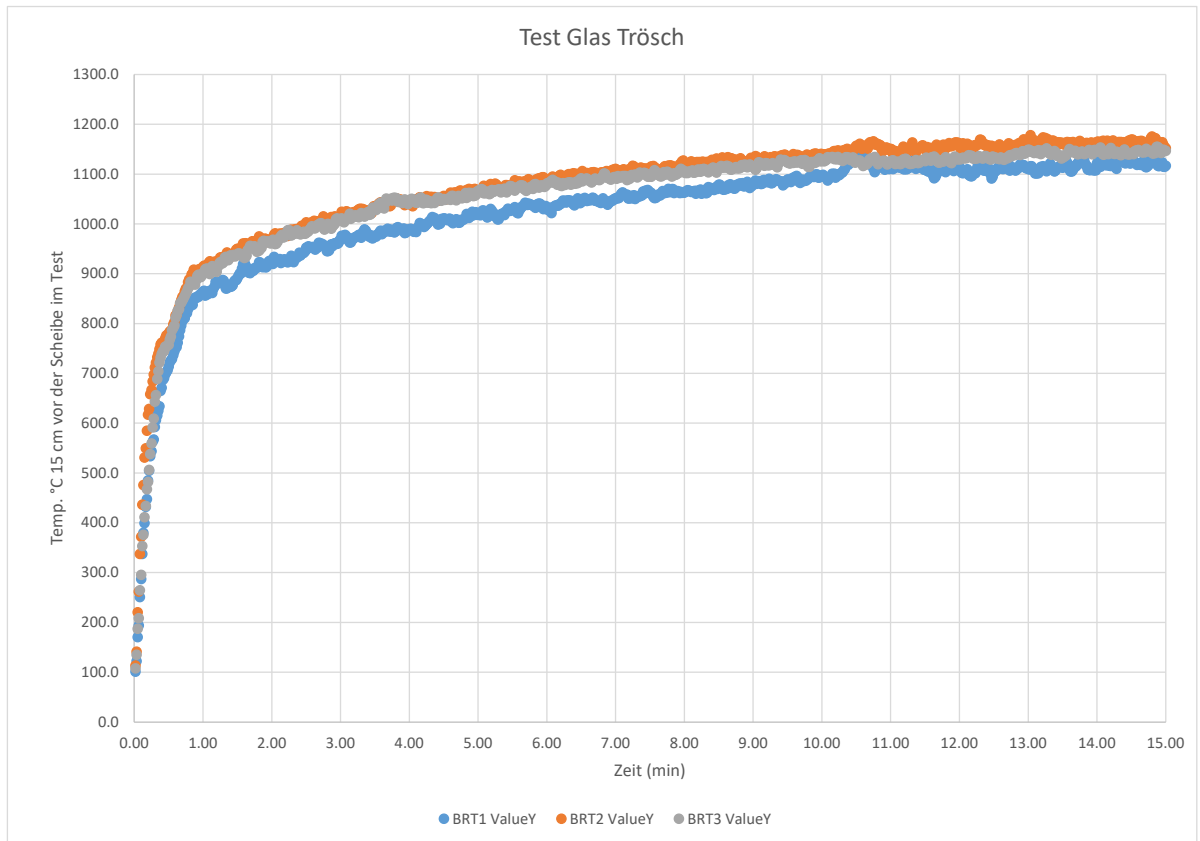


Abb. 4 Temperaturverlauf der Brandgase im Ofenraum gemessen an drei Positionen 15 cm vor dem Prüfkörper (siehe Messstellenplan in Beilage) beim Test mit dem 3-fach Isolierglas (Test Glas Trösch)

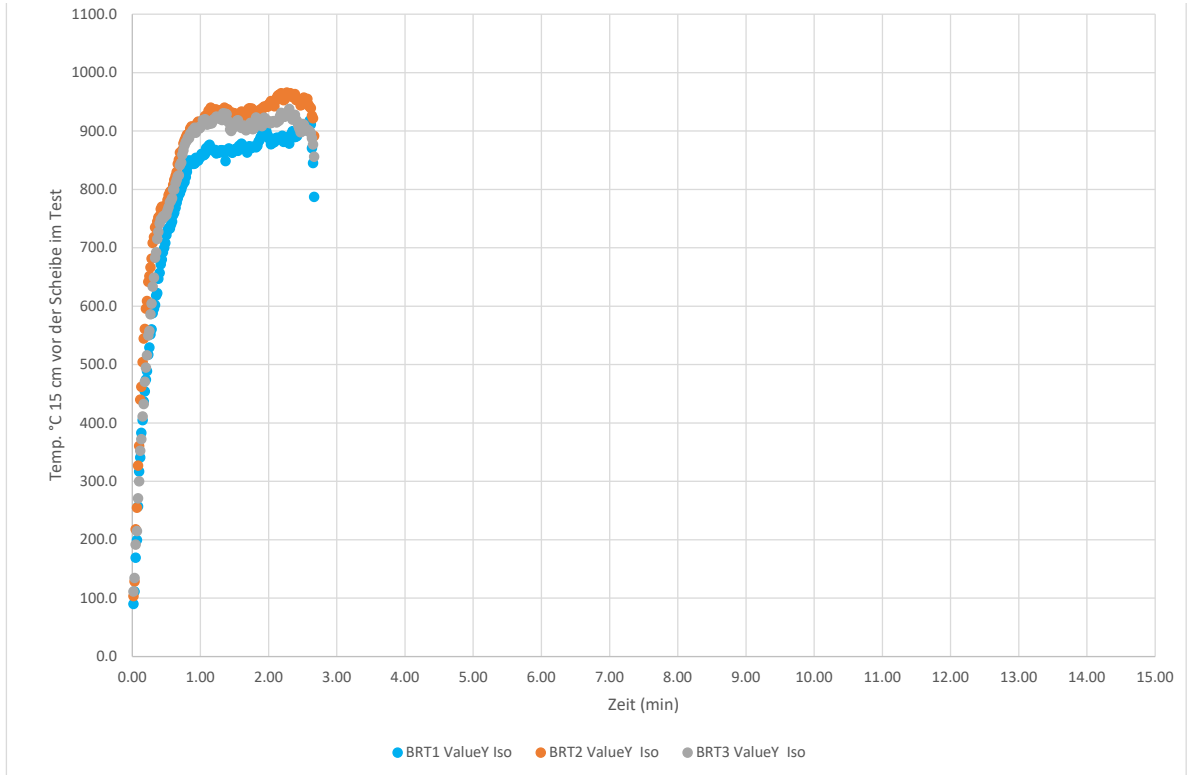
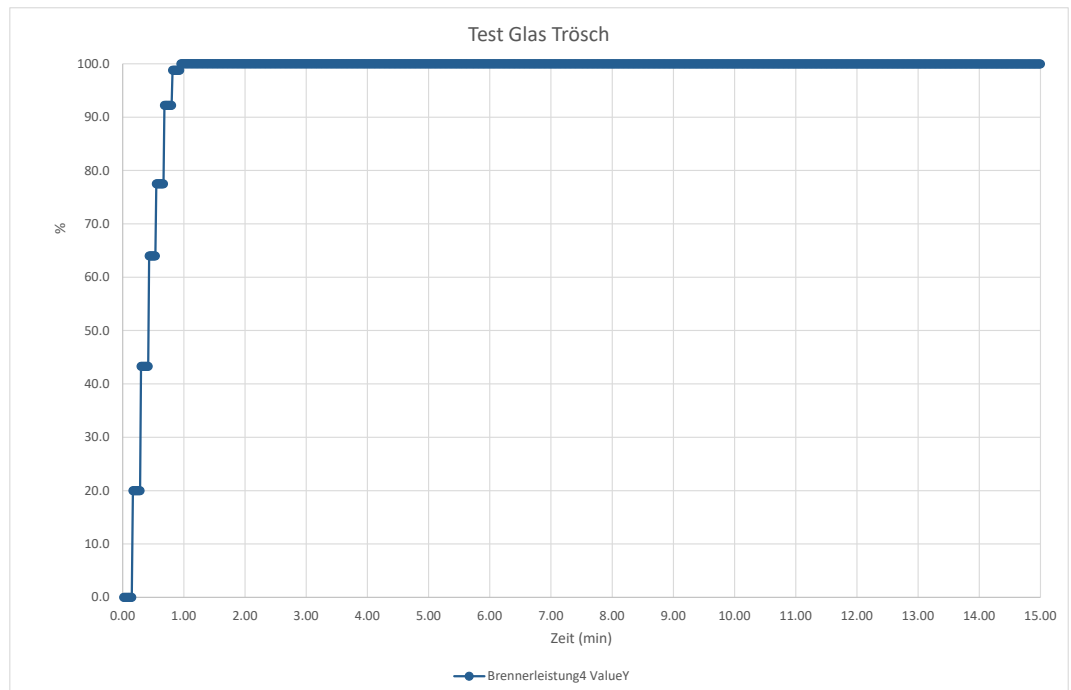


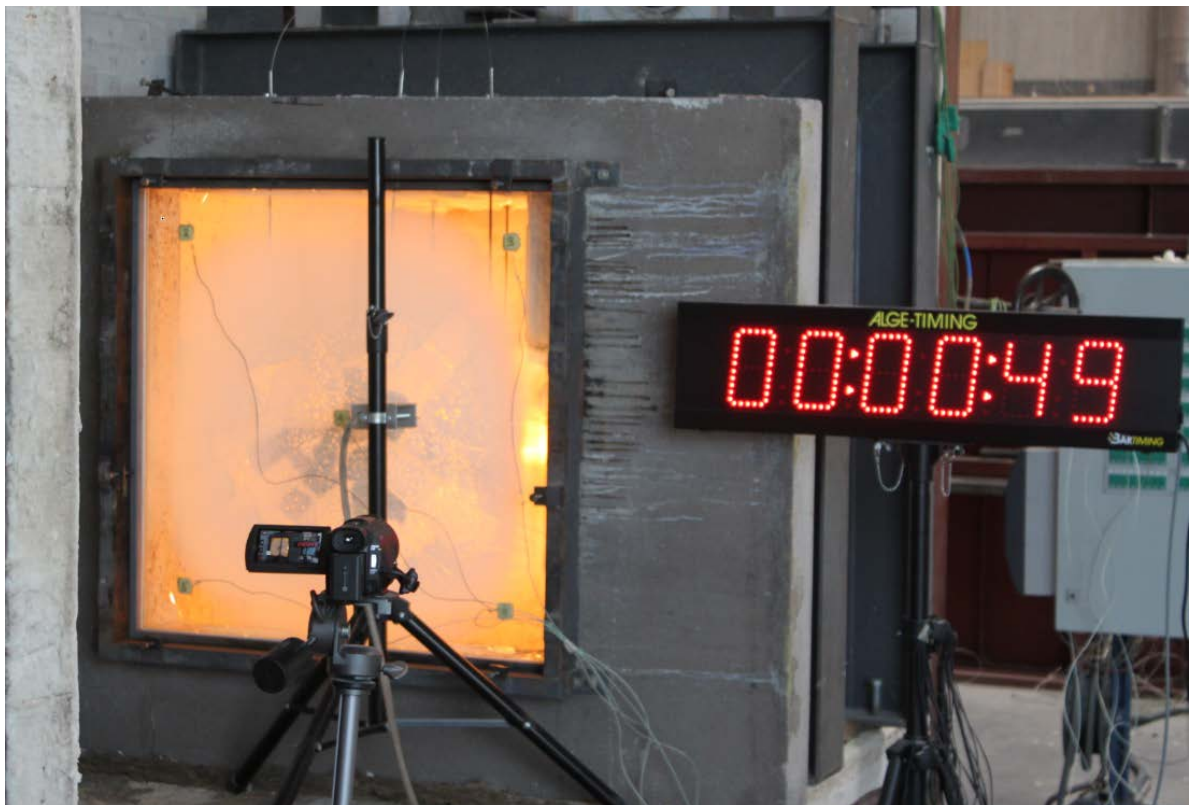
Abb. 5 Brennerleistung (bei beiden Tests von Glas Trösch (EI30 und 3-Fach-Isolierglas) vergleichbar)



5.6.1.1 EI30 Brandschutzglas im Test Glas Trösch

In der Mitte des Brandschutzglases ist bereits nach ca. 1 Minute das Aufschäumen der Thermo-Transformations-Schicht (TTS) zu beobachten. An den Rändern ist der Glaskörper aber noch kühler, weshalb dort die TTS noch nicht aktiviert wird (Aktivierung der TTS ab ca. 120°C).

Abb. 6 Aufsicht auf die Versuchsanordnung bei Glas Trösch mit eingesetztem Brandschutzglas als Prüfkörper.



Nach ca. 11 min zeigte sich beim E130 Glas eine starke Rauchentwicklung auf der Kaltseite. Nach ca. 13 min trat auf der Kaltseite eine Flamme auf, und nach ca. 14.5 min war eine Öffnung im Fenster feststellbar.

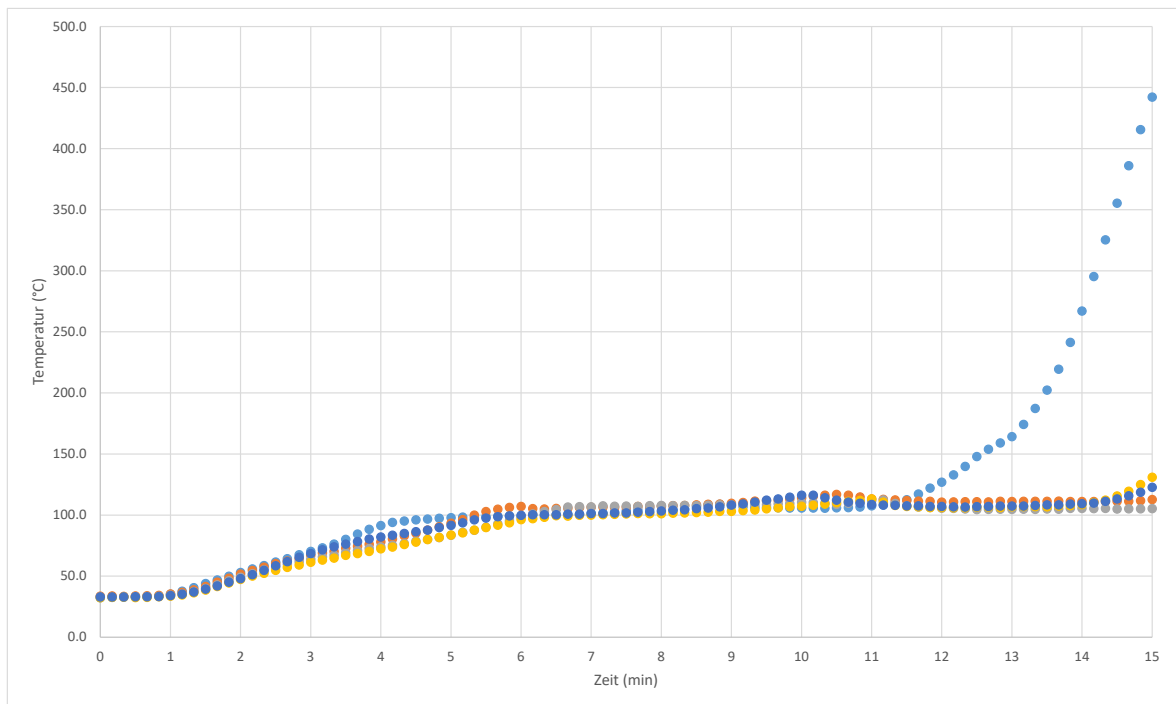
Abb. 7 Aufsicht auf die Versuchsanordnung bei Glas Trösch mit eingesetztem Brandschutzglas als Prüfkörper



In der Mitte des Brandschutzglases ist die sich langsam bildende Öffnung nach 13 Minuten Testzeit als heller Punkt erkennbar.

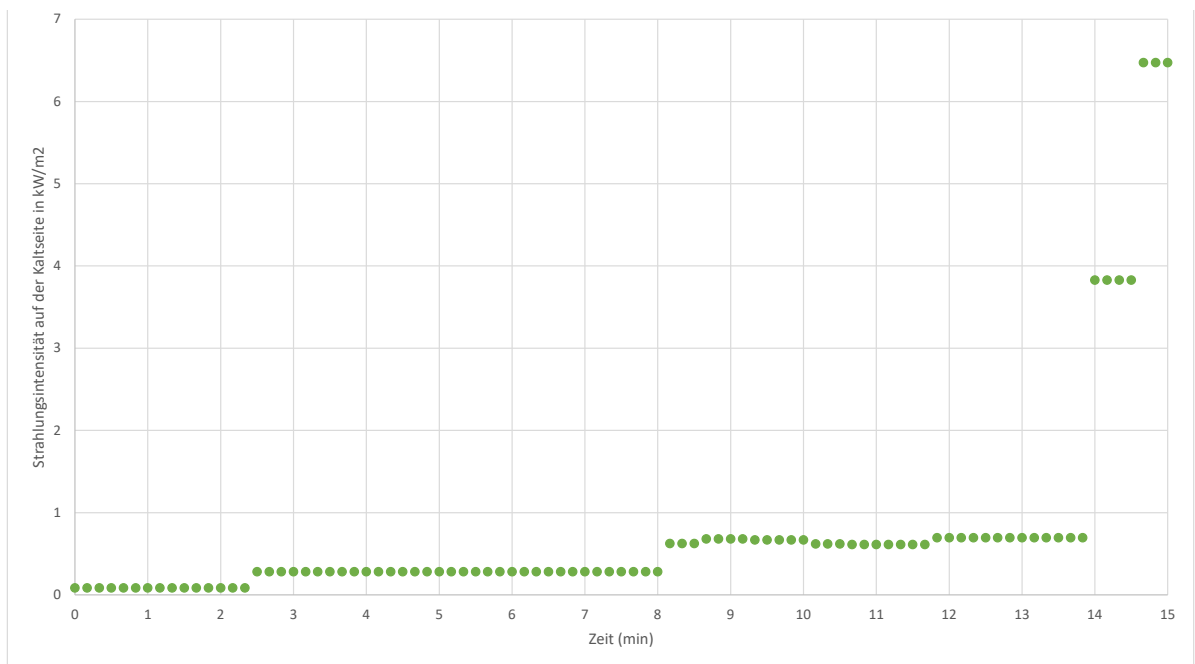
Nach 13 min erreichte die Temperatur beim E130 Glas auf der Kaltseite 200°C. Am Ende des Tests nach 15 min lag sie bei über 400°C.

Abb. 8 Temperatur auf der Kaltseite E130 Brandschutzglas, gemessen an 5 Messpunkten (Test Glas Trösch)



Die Wärmestrahlung auf der Kaltseite lag nach 13 min bei tiefen 0.7 kW/m^2 , wurde allerdings nicht an der heissesten Stelle gemessen. Nach Verschieben des Sensors stieg sie auf über 6 kW/m^2 am Ende des Tests an, ev. reichte die Zeit bis zum Ende des Test aber nicht mehr, damit der Messwert auf den effektiven Wert ansteigen konnte, da der Sensor gemäss Angabe von Glas Trösch träge reagiert. Die Resultate der Messung der Hitzeabstrahlungsintensität in Abb. 9 sind deshalb ev. wenig aussagekräftig.

Abb. 9 Hitzeabstrahlungsintensität auf der Kaltseite EI30 Brandschutzglas (Test Glas Trösch)



5.6.1.2 3-fach Isolierglas im Test Glas Trösch

Das letzte Glas des Isolierglasverbunds brach nach ca. 2.5 min, so dass eine durchgehende Öffnung entstand.

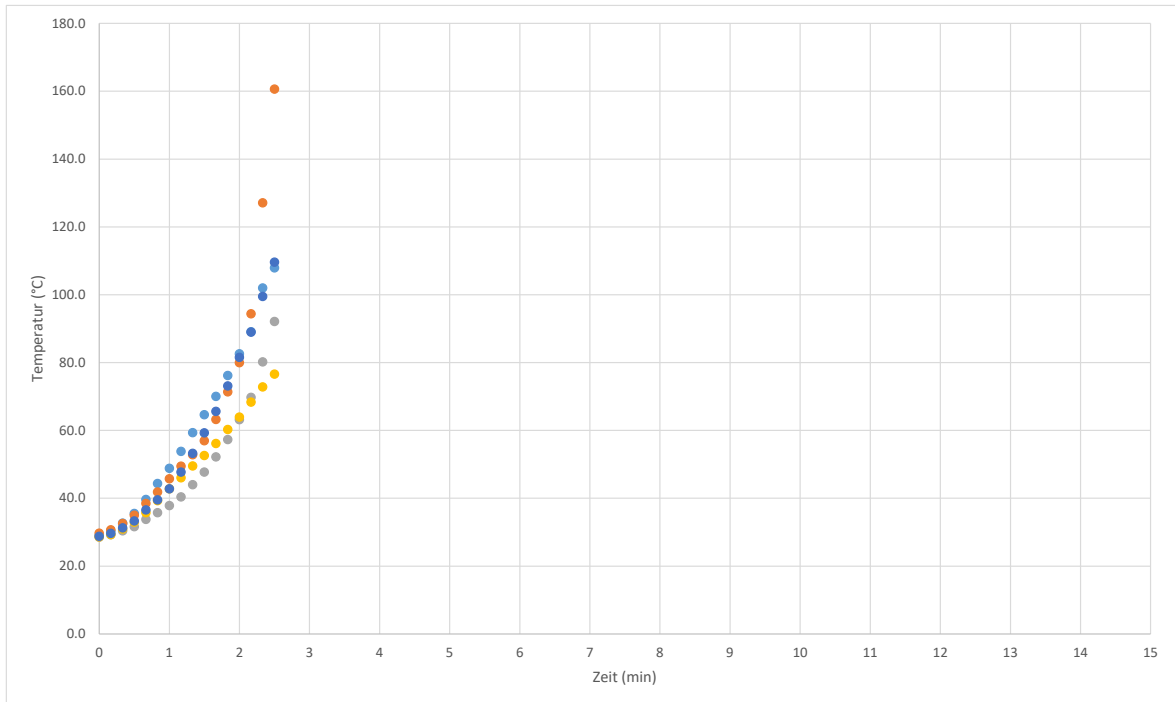
Abb. 10 Aufsicht auf die Versuchsanordnung bei Glas Trösch mit eingesetztem 3-fach Isolierglas als Prüfkörper.



Nach ca. 2.5 Minuten waren alle drei Scheiben der Verglasung zersprungen.

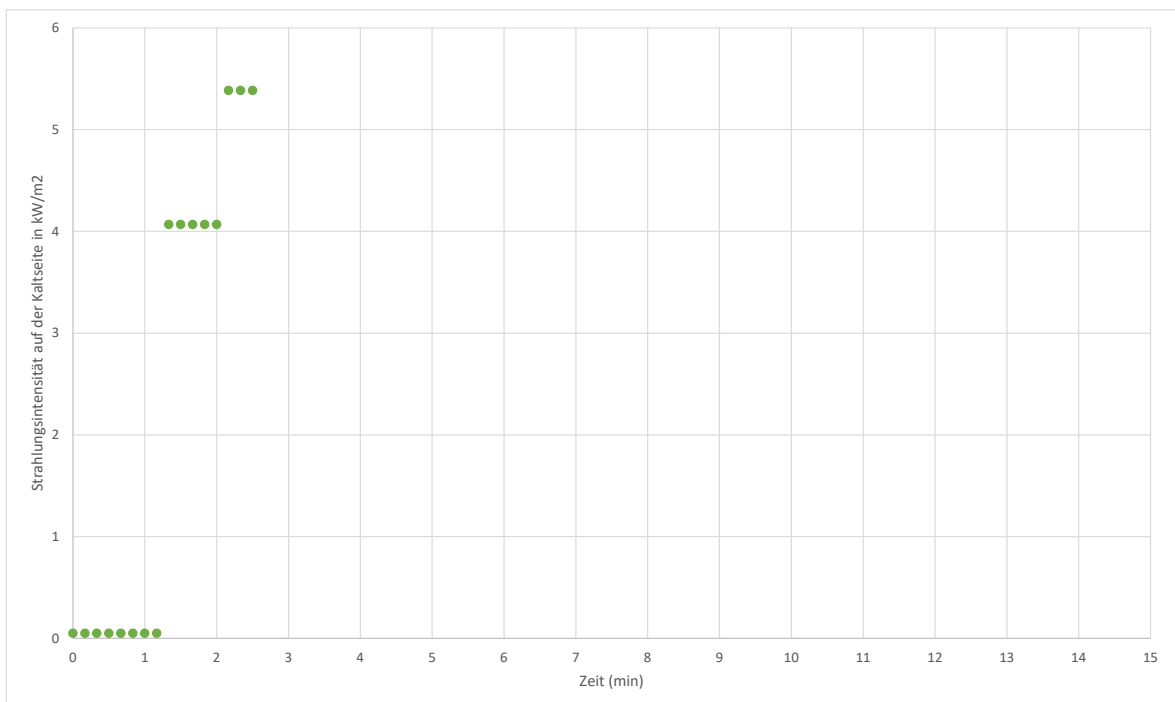
Am Ende des Tests nach 2.5 min erreichte die Temperatur auf der Kaltseite 160°C.

Abb. 11 Temperatur auf der Kaltseite 3-fach Isolierglas, gemessen an 5 Messpunkten (Test Glas Trösch)



Die Wärmestrahlung auf der Kaltseite lag dann bei 5 kW/m² (siehe Bemerkung in Kap. 5.6.1.1).

Abb. 12 Hitzestrahlungsintensität auf der Kaltseite 3-fach Isolierglas (Test Glas Trösch)



5.6.2 Szenarium "Fenster ausserhalb Flamme" (Test durch Vetrotech)

5.6.2.1 Einheitstemperaturzeitkurve (ETK, ISO-Kurve (ISO 834))

Gemessen wurden insbesondere:

- Temperaturverlauf im Ofen mit "Plate-Thermometern" (träge) 15 cm vor dem "Prüfkörper", welche gemäss Norm zur Temperaturregelung verwendet werden, und zusätzlich mittels "Wire Thermocouples (TC)" 10 cm vor dem "Prüfkörper" welche aufgrund ihrer geringeren Masse wesentlich empfindlicher auf Temperaturdifferenzen reagieren als Plate-Thermometer.
- Gesamtwärmefluss (Konvektiv + Strahlung) und
- Strahlungsintensität (nur Strahlung).

Der beim Test mit den Wire TC aufgezeichnete Temperaturverlauf folgt nicht streng der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK), sondern es zeigte sich ein gewisses Einpendeln des Ofens. Da der Ofen gemäss Norm mit den trägen Plate-Thermometern geregelt werden muss, ist dieses Übersteuern zwangsläufig Teil einer normkonformen Prüfung.

Die Temperatur, gemessen mit den empfindlicheren Wire TC, steigt innert ca. 1 min auf ca. 750°C an, sinkt zwischenzeitlich wieder auf 450°C ab und liegt nach 5 min bei 675°C. Dann steigt die Temperatur relativ kontinuierlich an und erreicht 870°C nach 30 min.

Der Gesamtwärmefluss steigt innert ca. 1 min auf ca. 70 kW/m² an, sinkt nach ca. 2 min auf unter 20 kW/m² ab und steigt wieder bis auf über 40 kW/m² nach 5 min an. Nachher steigt der Gesamtwärmefluss relativ kontinuierlich an und erreicht ca. 90 kW/m² nach 30 min.

Die Strahlungsintensität steigt innert ca. 1 min auf knapp 30 kW/m² an, sinkt nach ca. 2 min auf unter 10 kW/m² ab und steigt wieder bis auf knapp 20 kW/m² nach 5 min an. Nachher steigt der Strahlungsintensität relativ kontinuierlich an und erreicht gut 50 kW/m² nach 30 min.

Abb. 13 Temperaturverlauf ETK-Test während der ersten 5 min (Test Vetrotech)

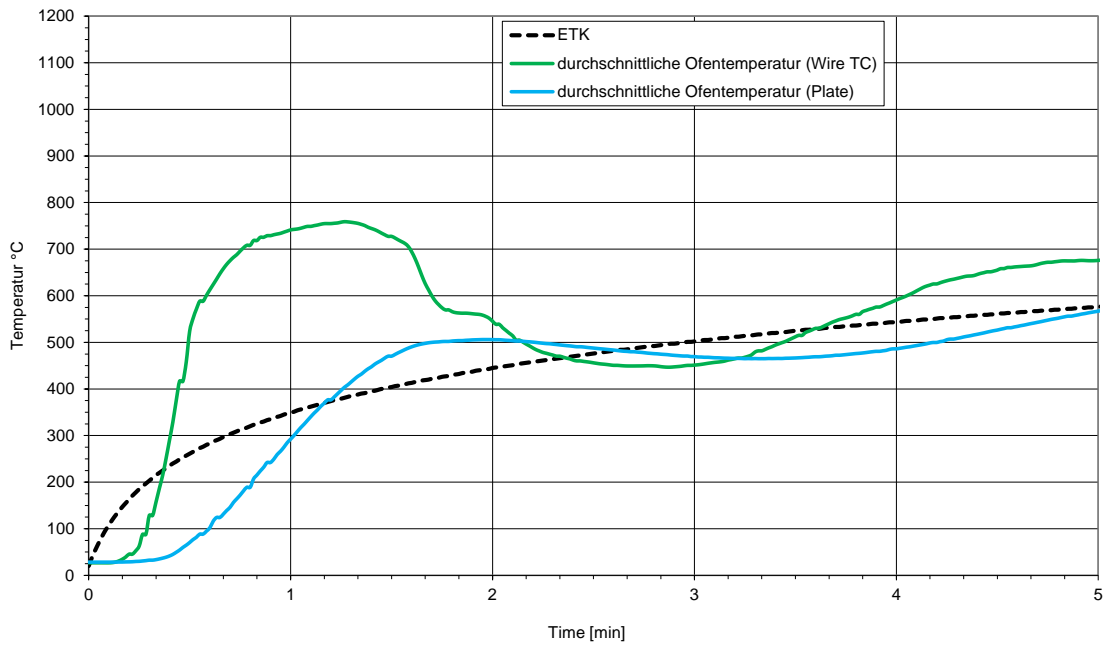


Abb. 14 Gesamtwärmefluss und Strahlungsintensität ETK-Test während der ersten 5 min (Test Vetrotech)

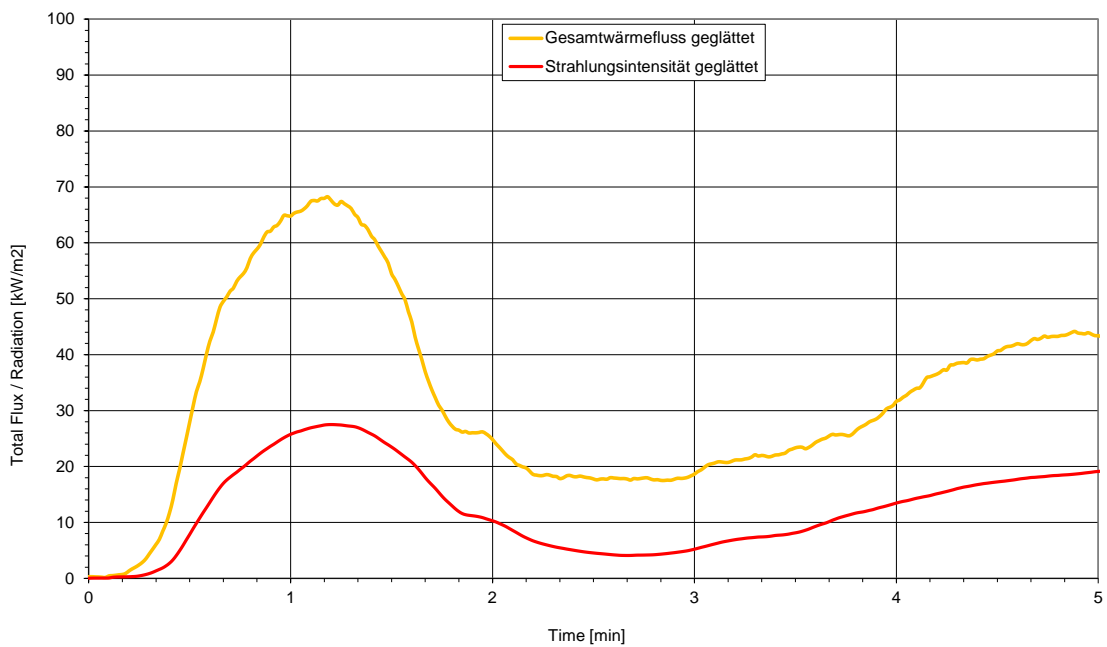
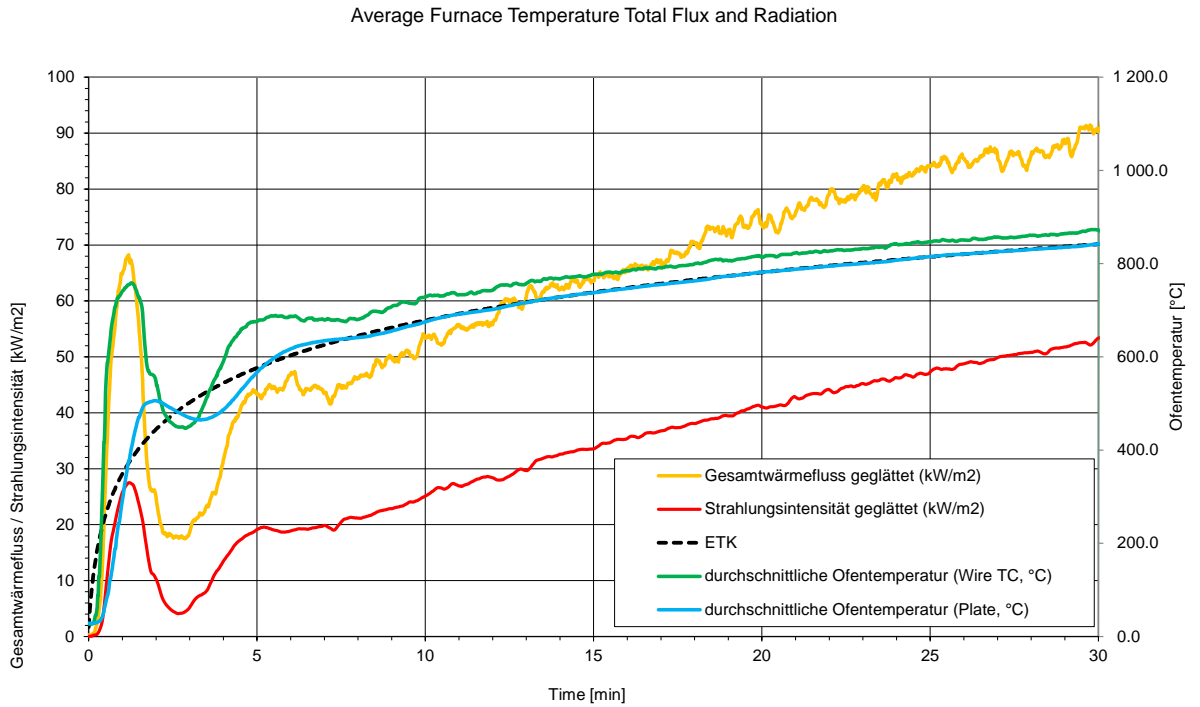


Abb. 15 Temperaturverlauf, Gesamtwärmefluss und Strahlungsintensität ETK-Test während des ganzen Testes (Test Vetrotech)



5.6.2.2 Hydrocarbon-Kurve (HC Kurve, Kohlenwasserstoff-Kurve)

Gemessen wurden insbesondere:

- Temperaturverlauf im Ofen mit Plate-Thermometern (träge) 15 cm vor dem "Prüfkörper" und Wire TC (empfindlicher) 10 cm vor dem "Prüfkörper" und
- der Gesamtwärmefluss (Konvektiv + Strahlung).

Die Strahlungsintensität wurde nicht gemessen.

Auch hier folgt der mittels Wire TC gemessene Temperaturverlauf nicht streng der Normkurve, es zeigen sich aber keine Pendelbewegungen wie bei der ETK.

Die Temperatur, gemessen mit den empfindlicheren Wire TC, steigt innert ca. ½ min auf über 700°C an. Dann steigt die Temperatur relativ kontinuierlich an, erreicht knapp 1000°C nach 5 min und ca. 1100°C nach 30 min.

Der Gesamtwärmefluss steigt innert der ersten knappen halben Minute am steilsten an auf ca. 50 kW/m². Nach 5 min liegt der Messwert bei ca. 140 kW/m². Und nach 30 min bei ca. 190 kW/m².

Abb. 16 Temperaturverlauf im HC-Test während der ersten 5 min (Test Vetrotech)

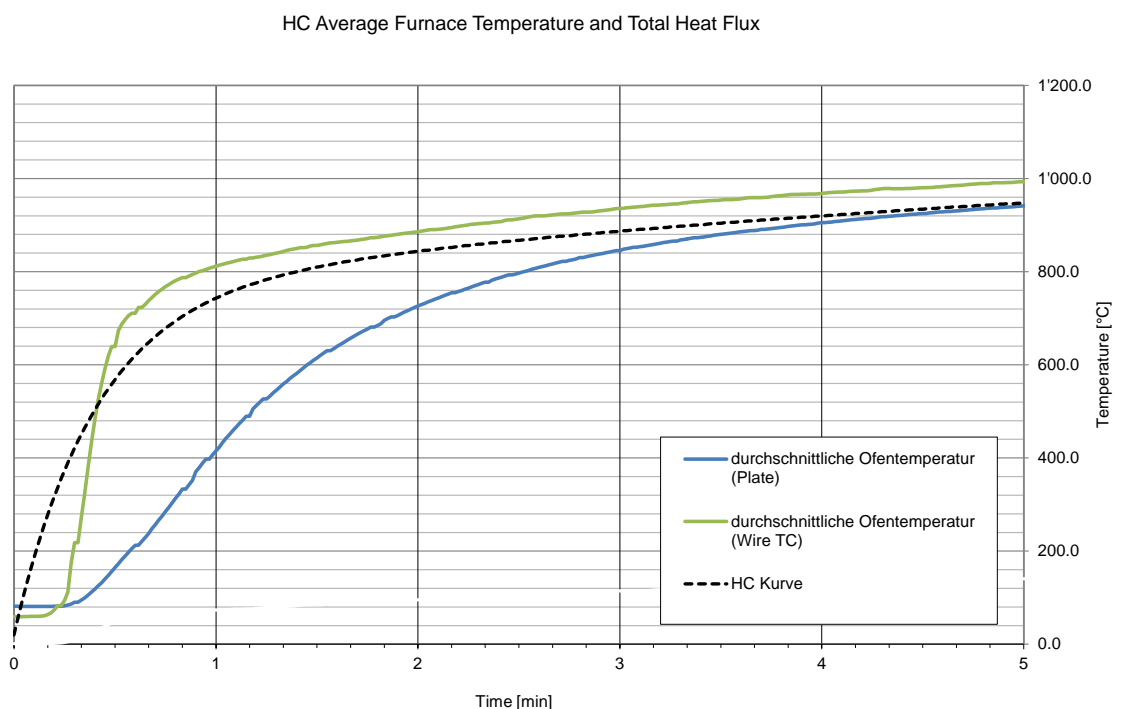


Abb. 17 Gesamtwärmefluss (konvektiv und Strahlung) im HC-Test während der ersten 5 min (Test Vetrotech)

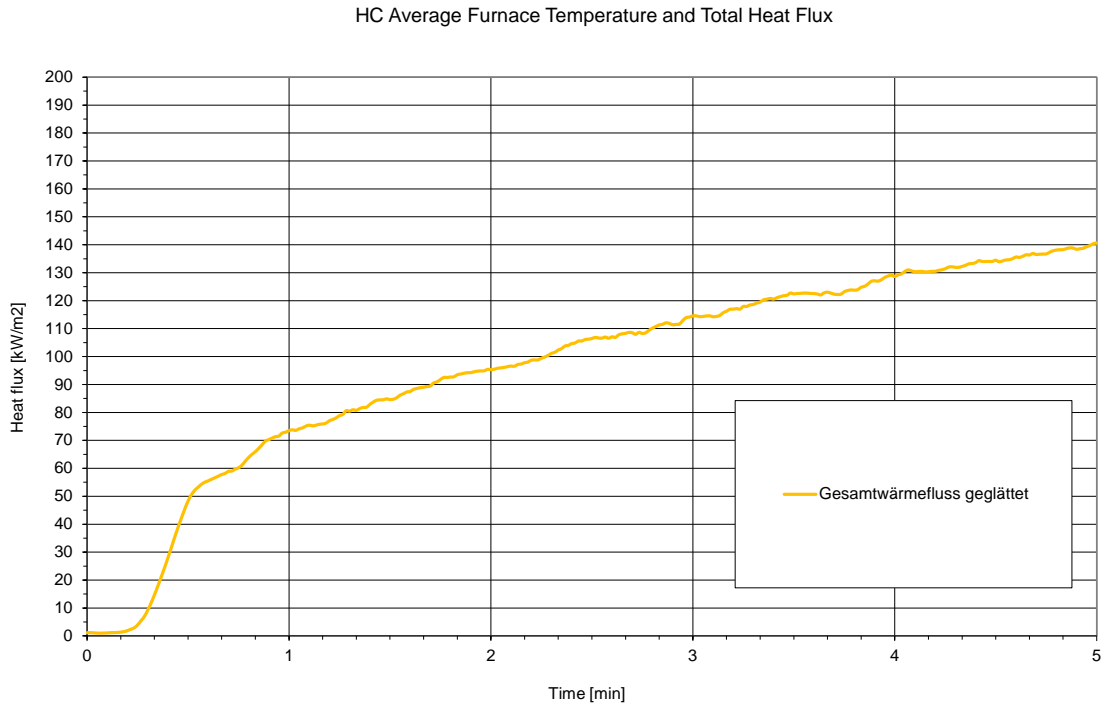
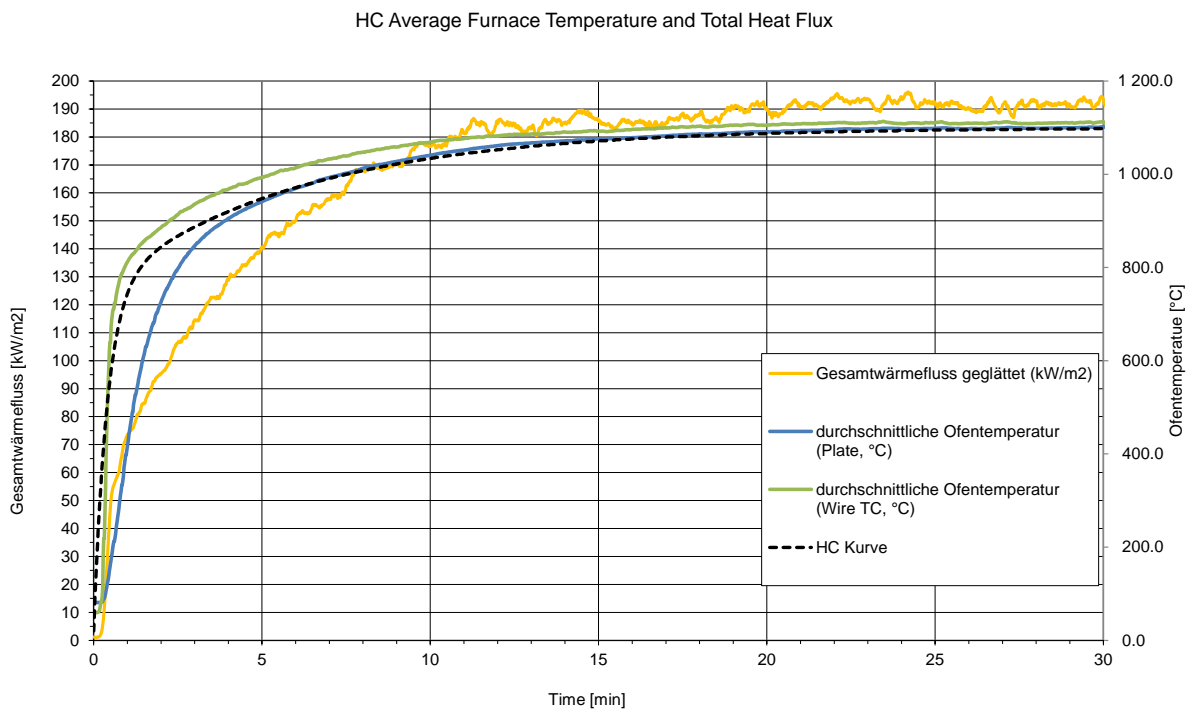


Abb. 18 Temperaturverlauf und Gesamtwärmefluss HC-Test während dem ganzen Test (Test Vetrotech)



5.7 Interpretation der Testergebnisse

5.7.1 Situation "Fenster in unmittelbarer Flammennähe" (Test durch Glas Trösch)

Die Tests zeigen, dass das Brandschutzglas deutlich länger standhält als ein normales 3-fach Isolierglas. Somit weist das Brandschutzglas eine höhere Schutzwirkung auf als ein normales 3-fach Isolierglas.

Beim Test durch Glas Trösch (siehe Testdesign) bildete sich nach ca. 10 Minuten bei Ofentemperaturen um 1'000°C (der Prüfkörper war mindestens 5 Minuten Temperaturen grösser 1'000°C ausgesetzt) eine erste Öffnung in der Mitte des EI30 Brandschutzglases.

Beim 3-fach Isolierglas waren nach 2.5 Minuten des Tests bei Ofentemperaturen um 900°C bereits alle drei Scheiben zersprungen.

Die mit der Testanordnung beabsichtigten Bedingungen, die bei einem Störfallbrand mit Flammenkontakt auftreten, konnten im Test nicht realisiert werden. Es konnte kein Flammenkontakt hergestellt werden. Es wurden zwar hohe Temperaturen erreicht, der Temperaturanstieg verlief jedoch langsamer, als dies bei einem Störfall mit Flammenkontakt zu erwarten wäre. Die Temperaturwechselbeständigkeit eines Fensters ist ein entscheidender Faktor dafür, wie gut ein Fenster der Hitzeeinwirkung standhält. Es ist deshalb denkbar, dass es bei einem rascheren Temperaturanstieg, z.B. durch eine direkte Beflammung, zu einem rascheren Versagen des Fensters kommen könnte.

Es ist deshalb davon auszugehen, dass bei einem Störfall mit Flammenkontakt die Dauer bis zum Auftreten von starkem Rauch, Flammen und schliesslich Öffnungen in einem EI30 Brandschutzfenster kürzer ist als die im Test beobachteten 10-15 min. Eine Extrapolation der Testergebnisse für einen Störfall mit Flammenkontakt ist auf Basis der vorliegenden Daten nicht möglich.

5.7.1.1 Ergänzende Überlegungen anhand Vergleich mit Vetrotech-Test mit der HC-Kurve

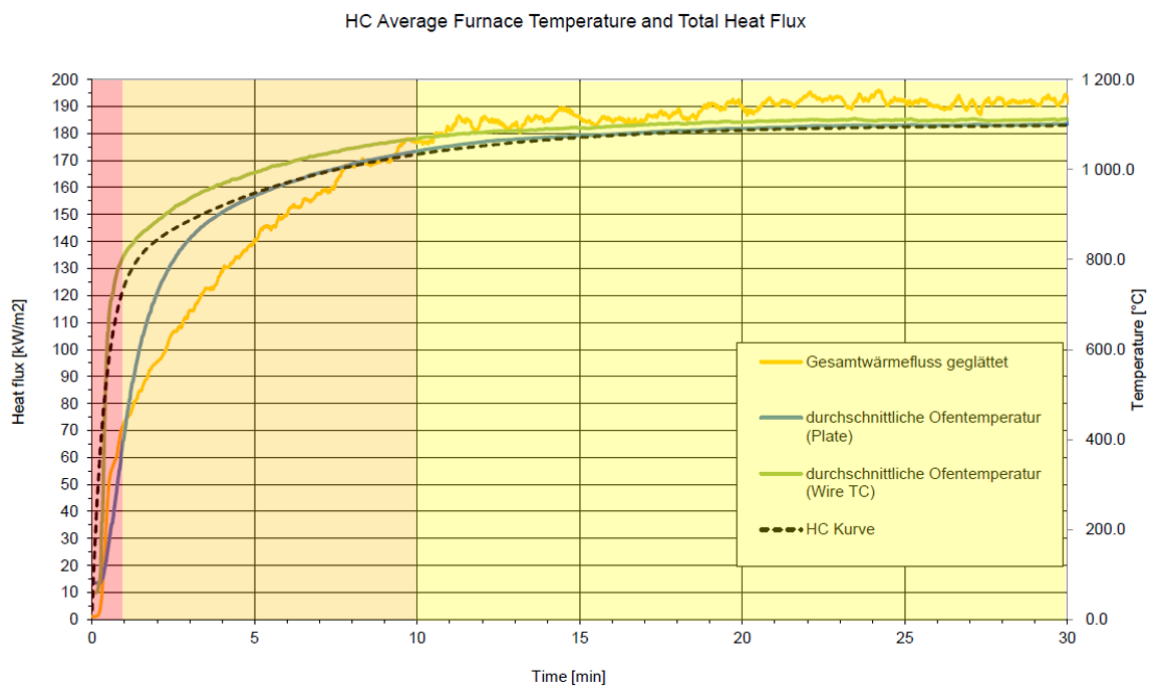
Nachfolgend ist ein Versuch beschrieben, die Bedingungen, die beim Test durch Glas Trösch erzeugt wurden, grob einzuordnen:

Der Ansatz basiert auf einem Vergleich des gemessenen Temperaturverlaufs beim "Glas-Trösch-Test" mit den Messwerten der rasch reagierenden Wire TC aus dem im Kapitel 5.6.2.2 beschriebenen Test gemäss der HC Kurve bei Vetrotech (siehe Testdesign). Wird bei den Temperaturwerten des HC-Tests (gemessen 10 cm vor dem "Prüfkörper") die anfängliche Verzögerung von ca. 15 s korrigiert, ist der Temperaturverlauf sehr ähnlich mit den im Abstand von 15 cm vor dem Prüfkörper beim "Glas-Trösch-Test" gemessenen Temperaturwerten. Somit könnte der Test bei Glas Trösch von den einwirkenden Lasten her gesehen ähnlich sein wie ein Test mit der HC Kurve. Beim Test mit der HC Kurve wird eine hohe Einwirkung auf den Prüfkörper erzeugt. Die Brenner sind beim Test mit der HC Kurve parallel zum Prüfkörper ausgerichtet, so dass wie beim Glas Trösch Test kein Flammenkontakt stattfindet.

Aus dem Test der HC-Kurve bei Vetrotech lässt sich folgender Sachverhalt herleiten:

Die HC-Kurve kann grob in drei Phasen unterteilt werden. Die Phase "rot" in welcher die Temperatur im Prüfofen innerhalb einer Minute stark ansteigt und sich der Gesamtwärme-
fluss am Prüfkörper zwischen 1 bis ca. 70 kW/m² bewegt. Die Phase "orange" mit einem
Gesamtwärmefluss von grösser 70 kW/m² über 9 Minuten und die Phase "gelb" mit einem
Gesamtwärmefluss von grösser 170 kW/m² über 20 Minuten.

Abb. 19 Durch Vetrotech aufgezeichnete Daten einer HC-Kurve und Einteilung derjenigen in die
Phase "rot" (1 bis ca. 70 kW/m² Gesamtwärmefluss in 1 min), die Phase "orange" (grös-
ser 70 kW/m² Gesamtwärmefluss über 9 Minuten) und die Phase "gelb" (Gesamtwärme-
fluss von grösser 170 kW/m² über 20 Minuten).



Unter konservativer Betrachtung der am Testverlauf einer HC-Kurve auftretenden Gesamt-
wärmeflüsse (Phasen "rot" bis "gelb") und dem Temperaturverlauf des Tests bei Glas
Trösch kann die Hypothese erstellt werden, dass ein EI30 Brandschutzfenster für
ca. 10 Minuten Temperaturen zwischen 800 bis 1'000°C und mindestens Gesamtwärme-
strömen um 70 kW/m² standhalten kann, allerdings bei deutlich langsamerem Ansteigen
der Einwirkungen, als dies bei einem Störfall zu erwarten wäre. Ebenfalls ist dabei zu be-
achten, dass die Vergleichbarkeit der Einwirkungen beim Test mit den Einwirkungen eines
Störfalls nicht gesichert ist (Vergleichbarkeit konvektiver Wärmefluss und Hitzeabstrahlung,
Spektrum der Hitzeabstrahlung, siehe Kapitel 5.7.2.1)

Ein 3-fach Isolierglas versagt bei den obengenannten Bedingungen nach ca. 2 Minuten.

5.7.1.2 Homogenität der Erwärmung des Prüfkörpers beim Glas-Trösch Test

Beim Test von Glas Trösch war sichtbar, dass die Erwärmung des Prüfkörpers über die Fensterfläche betrachtet nicht homogen erfolgte, was eine zusätzliche Belastung des Prüfkörpers darstellt:

In der Mitte des Brandschutzglases ist beim Test "Glas Trösch" bereits nach ca. 1 Minute das Aufschäumen der TTS zu beobachten, während die TTS an den Rändern des Glaskörpers noch nicht aktiviert wurde. Somit war der Prüfkörper an den Rändern des Glaskörpers kühler als in der Mitte (Aktivierung der TTS ab ca. 120°C).

Bei einem Störfall ist aufgrund der sehr raschen Einwirkung hoher Lasten auf der Heisseite mit sehr hohen Temperaturdifferenzen *über den Querschnitt* des Glaskörpers (d.h. senkrecht zur Fensterfläche) und auf sehr kurzen Distanzen innerhalb des Glaskörpers zu rechnen, was zu entsprechend hohen Spannungen im Glaskörper beim Störfall führt.

Hingegen ist es beim Störfall stark von der örtlichen Situation abhängig, ob und in welchem Ausmass bei der Hitzeeinwirkung Inhomogenitäten *über die Fläche des Fensters* betrachtet auftreten.

Sind beispielsweise die Fenster im Rahmen eingelassen, wird der Randbereich des Glaskörpers durch den Rahmen abgedeckt und vor der Hitzeeinwirkung geschützt, so dass eine inhomogene Erwärmung erfolgt. Im Fall der Hitzeabstrahlung führen alle abschattenden Elemente dazu, dass auf die abgeschatteten Bereiche der Fensterfläche keine oder weniger Strahlung auftrifft. Bei Fenstern beispielsweise, die von der Fassadenoberfläche zurückversetzt sind, wird bei nicht-senkrechtem Auftreffen der Strahlung zwangsläufig ein Teil des Glaskörpers durch die vorspringende Fassade abgeschattet. Auch in diesen Fällen erfolgt die Hitzeeinwirkung inhomogen.

Bei Verglasungen hingegen, die nicht teilweise durch Rahmen, Fassadenelemente etc. abgedeckt oder abgeschattet werden, ist insbesondere im Strahlungsbereich ausserhalb der Störfallflamme, bedingt durch die grosse Oberfläche des Strahlers (z.B. Lachenbrand) im Vergleich zur Projektionsfläche (Fenster) über die Glasfläche betrachtet mit einer relativ homogenen Einwirkung zu rechnen. Im Vergleich zu diesen Situationen waren die Bedingungen im Test bezüglich der Temperaturverteilung über die Fensterfläche ungünstig.

5.7.2 Situation "Fenster ausserhalb Flamme" (Test durch Vetrotech)

5.7.2.1 Übertragbarkeit auf Störfallsituation

Für die Übertragbarkeit der beim Vetrotech-Test ermittelten Messergebnisse zur Hitzestrahlung und zum Gesamtwärmefluss auf eine Störfallsituation sind vor allem die folgenden drei Punkte relevant:

5.7.2.1.1 *Rascher Anstieg der thermischen Lasten*

Hitzestrahlung:

In der Phase des stärksten Anstiegs der Messwerte für die Hitzestrahlung zu Beginn des ETK-Tests steigen die Messwerte innert ca. 1 min auf Werte unter 30 kW/m^2 an. Nachher sinken die Werte vorübergehend wieder ab. Der weitere Anstieg verläuft dann deutlich langsamer.

Bei einem Störfallbrand ist mit einem deutlich rascheren Anstieg der Hitzestrahlung zu rechnen.

Gesamtwärmefluss (Konvektion und Strahlung):

Sowohl beim ETK-Test wie auch beim HC-Test steigen die Messwerte für den Gesamtwärmefluss in der Phase des stärksten Anstiegs zu Beginn des Tests innert ca. 20 s auf Werte um die 50 kW/m^2 an. Der weitere Anstieg des Gesamtwärmeflusses verläuft beim ETK-Test und beim HC-Test langsamer. Beim ETK-Test sinkt der Gesamtwärmefluss vorübergehend wieder auf Werte unter 20 kW/m^2 ab.

Wird nur der Verlauf der Messwerte betrachtet, d.h. wird vernachlässigt, dass es sich bei Konvektion und Strahlung um unterschiedliche Prozesse handelt, kommt der Anstieg des Wärmeflusses in der Anfangsphase näher an die Situation bei einem Störfall heran. Für einen Benzinlachenbrand scheint der Anstieg aber immer noch eher langsam, und bei Gas-Szenarien ist mit einem deutlich rascheren Anstieg zu rechnen.

5.7.2.1.2 *Vergleichbarkeit konvektiver Wärmefluss und Hitzestrahlung*

Im Bereich ausserhalb der Flamme geschieht bei Störfallbränden die Wärmeübertragung hauptsächlich durch Wärmestrahlung.

Beim ETK-Test und beim HC-Test wirkt hingegen ein Gesamtwärmefluss bestehend aus konvektiven und Strahlungsanteilen auf einen Prüfkörper ein. Beim ETK-Test und beim HC-Test wurden der Gesamtwärmefluss und beim ETK-Test zusätzlich der Strahlungsanteil gemessen.

Bei Konvektion und Hitzestrahlung handelt es sich um zwei verschiedene Prozesse (siehe Kapitel 5.4). Die Unterschiede können das Erwärmungsverhalten und damit die Wider-

standsfähigkeit des Fensters sowie den Verlauf der Reststrahlung auf der Kaltseite betreffen. Wie sich diese Unterschiede auswirken, lässt sich aufgrund der vorliegenden Informationen aus dem Test und den physikalischen Grundlagen nicht quantifizieren.

Die nachfolgende Übertragung der Messungen des Gesamtwärmefflusses auf durch Hitzestrahlung geprägte Situationen ist deshalb mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, weshalb auch hier, wie beim Test bei Glas Trösch, die Interpretation der Testergebnisse nach einer konservativen Betrachtung verlangt.

5.7.2.1.3 Spektrum der Hitzestrahlung

Britische Messreihen zeigen, dass bei grossen Kohlenwasserstoffbränden das Strahlungsspektrum aufgrund der Russpartikel in grober Näherung einem planckschen Strahler entspricht. Bei kleineren Bränden, v.a. bei kleineren Jet Fires weicht das Spektrum hingegen deutlich von einem planckschen Strahler ab.

Das Strahlungsspektrum beim ETK-Test und beim HC-Test ist nicht bekannt. Es können jedoch folgende Überlegungen dazu angestellt werden:

Die Flamme eines Ölbrenners entspricht wahrscheinlich am ehesten derjenigen eines kleineren Jet Fires. Somit weicht das Strahlungsspektrum der Brennerflamme von demjenigen eines grossen Kohlenwasserstoffbrandes, wie er bei Störfällen vorkommt, wahrscheinlich ab. Mit zunehmender Dauer des Tests kommt gemäss Angabe von Vetrotech zur Strahlung der Brennerflamme ein zunehmender Anteil der Strahlung aus dem Ofenraum hinzu. Das Spektrum dieser Strahlung ist unbekannt. Insgesamt erscheint es wahrscheinlich, dass das Strahlungsspektrum bei den Ofentests von demjenigen eines Störfallbrandes abweicht.

Das Strahlungsspektrum ist eine entscheidende Grösse für das Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsverhalten des Probekörpers, d.h. es hat einen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit des Fensters sowie auf die Reststrahlung auf der Kaltseite des Fensters. Wie stark sich ein allenfalls von einem Störfallbrand abweichendes Strahlungsspektrum bei den Ofentests auf die Widerstandsfähigkeit des Fensters und die Reststrahlung auf der Kaltseite auswirkt, kann mit den vorliegenden Informationen aus dem Test und den physikalischen Grundlagen nicht quantifiziert werden.

5.7.2.2 Test Einheitstemperaturzeitkurve (ETK, ISO-Kurve (ISO 834))

5.7.2.2.1 Gesamtwärmefluss

Der Gesamtwärmefluss (Konvektion und Strahlung) liegt in den ersten 5 min des Tests zeitweilig deutlich über dem Bereich von 30 bis 35 kW/m², sinkt aber auch deutlich unter diesen Bereich. Der Mittelwert des Gesamtwärmeflusses über die ersten 5 min dürfte gerade etwa im Bereich von 30 bis 35 kW/m² liegen, auf einem Niveau also, für das gemäss Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagenbereits für normale Doppelverglasung eine Schutzwirkung angenommen wird.

Der Mittelwert des Gesamtwärmeflusses über die gesamte Testdauer liegt bei ca. 60 kW/m².

Nach ca. 10 min übersteigt der Gesamtwärmefluss 50 kW/m² und liegt somit in einem höheren Bereich als die Strahlungswerte, für die gemäss Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagenbereits für normale Doppelverglasung eine Schutzwirkung angenommen wird.

Folgende Punkte machen eine Aussage, welcher Hitzeabstrahlungseinwirkung bei einem Störfall ein ETK-Test etwa entsprechen könnte, sehr schwierig:

Der Anstieg der Hitzeeinwirkung verläuft langsamer als bei einem Störfall. Zwar ist ein anfänglicher Peak feststellbar, nachher fällt der Wärmefluss aber wieder auf tiefe Werte und steigt dann nur allmählich an (unkonservativ, siehe Kapitel 5.7.2.1.1).

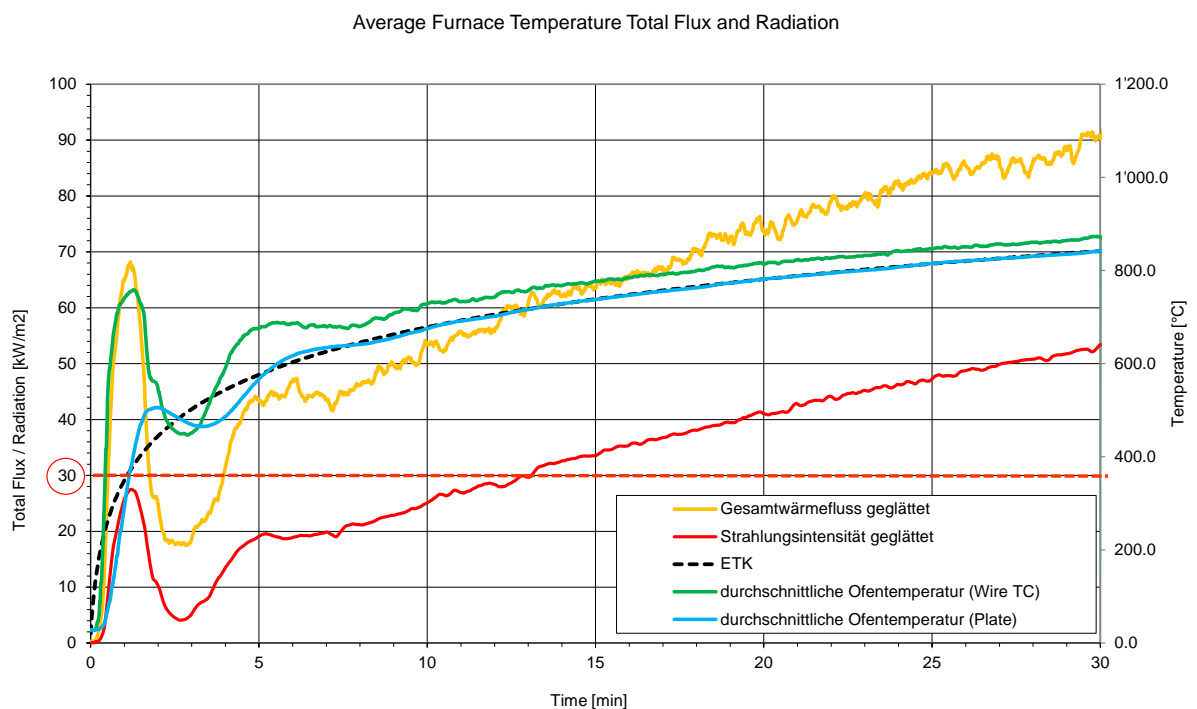
Die Vergleichbarkeit des konvektiven Wärmeflusses mit der Hitzeabstrahlungseinwirkung beim Störfallbrand ist unsicher (siehe Kapitel 5.7.2.1.2).

Beim Strahlungsanteil des Gesamtwärmeflusses weicht das Spektrum wahrscheinlich vom Störfallbrand ab (siehe Kapitel 5.7.2.1.3).

Nachfolgende Hypothese wurde unter Berücksichtigung der oben genannten Unsicherheiten erstellt:

Der auf einen Prüfkörper einfallende Gesamtwärmefluss während eines Tests mit der ETK für 30 min überschreitet in 90% der Zeit einen Wert von 30 kW/m² deutlich und liegt somit für 27 Minuten zwischen 30 – 90 kW/m² (Mittelwert von 60 kW/m²).

Abb. 20 Temperaturverlauf, Gesamtwärmefluss und Strahlungsintensität ETK-Test während des ganzen Testes (Test Vetrotech)



Ein gemäss Norm als EI30 spezifiziertes Brandschutzfenster darf unter diesen Belastungen weder seine Funktion als Raumabschluss verlieren, noch auf der Ofen abgewandten Seite des Prüfkörpers eine Temperaturerhöhung > 180 Kelvin aufweisen. Auf Basis dieser Feststellung wird postuliert, dass ein Brandschutzfenster ab Brandbeginn während 30 min sicher einem Gesamtwärmefluss von 30 kW/m² (siehe Mittelwert Hitzeabstrahlung ETK-Test gemäss Kapitel 5.7.2.2.2) und maximal einem Gesamtwärmefluss von 50-60 kW/m² standhält, allerdings bei langsamerem Anstieg der Einwirkung, als dies bei einem Störfallbrand zu erwarten wäre. Während dieser Zeit ist der Innenraum eines exponierten Gebäudes vor einer Zündung des Gebäudeinnern geschützt.

Der Vorteil von Brandschutzfenstern gegenüber 3-fach Isolierverglasung ist primär derjenige, dass 3-fach Isolierverglasungen bei einem Wärmefluss von 30 kW/m² innert weniger Minuten versagen und somit rasch mit einer Zündung des Gebäudeinnern gerechnet werden muss. Brandschutzfenster verlängern die Zeit bis zur Entstehung eines Gebäudebrandes merklich. Ein Brandschutzfenster EI30 ermöglicht in einer Situation mit einem einfal-

lenden Wärmefluss um 30 kW/m^2 einen längeren Schutz und gewährleistet somit bei einem entsprechenden Gebäudedesign eine Evakuierung der Gebäudenutzer in einen dem Ereignis abgewandten Brandabschnitt (ebenfalls mindestens EI30). Durch die hintereinander angeordneten Brandabschnitte ergibt sich im vom Ereignis abgewandten Brandabschnitt eine längere Dauer der Schutzwirkung als im dem Ereignis zugewandten Brandabschnitt, so dass zusätzliche Zeit für die Evakuierung aus dem Gebäude, die Intervention der Feuerwehr und eine allfällige Abnahme der Intensität des Störfallbrandes gewonnen werden kann.

Die Wirkung der intakten Brandschutzfenster als Schutz der Personen vor Wärmestrahlung und als Schutz des Gebäudes vor Entzündung des Gebäudeinneren ist nur bei geschlossenen Fenstern gegeben. Geöffnete Fenster in einer störfall-exponierten Fassade reduzieren diesen Schutzeffekt, indem einzelne Personen wie Personen im Freien direkt der Wärmestrahlung ausgesetzt sind und indem das Gebäudeinnere innert kurzer Zeit entzündet werden kann bei Wärmestrahlungen $>18 \text{ kW/m}^2$.

5.7.2.2.2 *Hitzeabstrahlung*

Im Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen wird davon ausgegangen, dass eine normale Doppelverglasung Strahlungsintensitäten von 30 bis 35 kW/m^2 während ca. 5 min standhält, so dass die Personen im betreffenden Gebäude mindestens teilweise geschützt sind.

Die Messwerte für die Hitzeabstrahlung beim ETK-Test steigen erst nach ca. 15 min auf Werte über den 30 bis 35 kW/m^2 an. Wird nur die Hitzeabstrahlung betrachtet, wird ein Fenster bei einem ETK-Test in den ersten 15 min lediglich denjenigen Belastungen ausgesetzt, für die im Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen bereits für normale Doppelverglasung eine Schutzwirkung angenommen wird.

Auch der Mittelwert der Hitzeabstrahlung beim ETK-Test über die gesamte Testdauer von 30 min übersteigt den Bereich von 30 bis 35 kW/m^2 kaum.

Erst in den letzten 10 min des ETK-Tests liegt die Hitzeabstrahlung mit 40 bis gut 50 kW/m^2 in einem etwas höheren Bereich. Der Anstieg der Strahlungseinwirkung bis auf diese Werte verläuft im ETK-Test jedoch viel langsamer als dies bei einem Störfall zu erwarten wäre. In Bezug auf die Temperaturwechselbeständigkeit ist diese letzte Phase des Tests deshalb nicht mit einem Störfall vergleichbar.

Allein aufgrund der Hitzeabstrahlungsmessungen kann deshalb nicht belegt werden, dass die Belastungen, die im ETK-Test auf einen Prüfkörper einwirken, wesentlich über den Strahlungseinwirkungen liegt, denen gemäss Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen bereits eine normale Doppelverglasung standhalten sollte.

5.7.2.3 **HC Kurve**

Der Gesamtwärmefluss verläuft bei der HC Kurve in der ersten Minute ähnlich wie bei der ETK, steigt dann aber kontinuierlich auf deutlich höhere Werte an. Die Hitzeabstrahlung wurde nicht gemessen.

Gemäss Angabe von Vetrotech ist kein mit der HC Kurve geprüftes System für eine Gebäudehülle bekannt.

6 Objektbezogenes Risiko: Grundlage für die Beurteilung der Verhältnismässigkeit von Objektschutzmassnahmen

6.1 Aufgabenstellung und Arbeitshypothese Kriterien

Im vorliegenden "Forschungsprojekt Objektschutz – Grundlagen zum Bauen neben Störfallanlagen" sollen gemäss Pflichtenheft (BAFU, Juni 2017) u.a. folgende Kernfragen geklärt werden:

- Anhand welcher Kriterien, soll die Verhältnismässigkeit von Objektschutzmassnahmen beurteilt werden (Letalitätsradien, kollektives Risiko, lokales Todesfallrisiko, Kosten etc.)?
- Wie ist der Einfluss von Objektschutzmassnahmen auf das Kollektivrisiko in der Praxis abzuschätzen?

Die Verhältnismässigkeit von Schutzmassnahmen ergibt sich grundsätzlich aus der

- Eignung, d.h. der Wirksamkeit einzelner oder kombinierter Schutzmassnahmen
- Notwendigkeit solcher Massnahmen und
- Zumutbarkeit dieser Massnahmen.

In der Begleitgruppe wurden folgende Kriterien zur Beurteilung der Risikorelevanz eines Objektes und zur Beurteilung der Wirksamkeit von Objektschutzmassnahmen festgelegt:

- In Anlehnung an die Ausschlusskriterien Screening Erdgashochdruckleitungen wird folgender Ansatz zur Risikorelevanz betrachtet:

Objektschutzmassnahmen werden geprüft, wenn das objektbezogene Risiko, d.h. das alleine durch das Objekt (Gebäude) gegebene kollektive Risiko die Mitte des Übergangsbereichs gemäss den Beurteilungskriterien des BAFU übersteigt.

- Für die Verhältnismässigkeit einer Massnahme gelten folgende Kriterien:

Verhältnismässig sind Objektschutzmassnahmen dann, wenn sie eine massgebende Reduktion des objektbezogenen kollektiven Risikos (Reduktion der Summenkurve im W-A-Diagramm) bewirken und die Massnahmen zumutbar sind (Kosten, etc.).

6.2 Massgebliches Risiko (objektbezogenes Risiko)

6.2.1 Definition

An der ersten Sitzung der Begleitgruppe Objektschutzmassnahmen vom 5.12.2017 wurde das objektspezifische Risiko folgendermassen definiert:

Das "objektbezogene Risiko" beschreibt das kollektive Risiko bezogen auf den durch ein Projekt beeinflussten Raum und die sich darin befindlichen Personen.

An der zweiten Sitzung der Begleitgruppe Objektschutzmassnahmen vom 20.4.2018 wurde festgehalten, dass in Bezug auf die Beurteilung des objektbezogenen Risikos nur einzelne Gebäude betrachtet werden und nicht Zonen (bzw. Flächen) mit mehreren Häusern d.h. dass das objektbezogene Risiko immer pro Gebäude bzw. eine Gemeinschaft von Personen, die ein Gebäude nutzt, ausgewiesen werden muss.

6.2.2 Methodik zur Bestimmung des massgeblichen Risikos

An der zweiten Sitzung der Begleitgruppe Objektschutzmassnahmen vom 20.4.2018 wurde beschlossen, dass zur Berechnung des "Objektbezogenen Risikos" auf die "worst-case" Szenarien gemäss den anerkannten Methodik-, Rahmenberichten und Risikoermittlungsmethoden abgestützt werden soll.

Für die Bestimmung der Risikorelevanz eines objektbezogenen Risikos wird die entsprechende Summenkurve für ein repräsentatives durchschnittliches Gebäude (Grundriss von 40 x 70 m bzw. 70 x 30 m) berechnet, d.h. es wird für diese Abschätzung der Gebäudeschutz gemäss den anerkannten Methodik-, Rahmenberichten und Risikoermittlungsmethoden angenommen.

6.2.3 Massgebliches objektbezogenes Risiko: Resultate

Für die Bestimmung der Risikorelevanz von objektspezifischen Risiken wird diejenige Mindest-Personenzahl in einem repräsentativen durchschnittlichen Gebäude (Grundriss von 40 x 70 m bzw. 70 x 30 m) berechnet, dass die resultierende Summenkurve etwa in der Mitte des Übergangsbereiches gemäss den Beurteilungskriterien des BAFU zu liegen kommt (siehe auch Vorgehensvorschlag in Kap. 6.1 der vorliegenden Studie).

6.2.3.1 Gefahrguttransporte auf Schienen

6.2.3.1.1 Variante 1:

ausserhalb Bahnhof, ohne Weichen, typische Parameter

Für die Bestimmung der Risikorelevanz eines Objektes, d.h. der Personenzahl für eine Summenkurve etwa in der Mitte Übergangsbereich, wurde von einer Strecke ausserhalb des Bahnhofbereichs und ohne Weichen mit typischen Parametern, wie sie häufig vorkommen, ausgegangen. Es wurden folgende Berechnungsannahmen für die Bahnlinie angenommen:

Tab. 1 Bestimmung der Risikorelevanz Berechnungsannahmen für die Bahnlinie

Parameter	Annahme	
	Wert	Bemerkung
Streckentyp	0	Normale Strecke, nicht im Bahnhofsbereich
Weichendichte	Null	Keine Weichen
Geschwindigkeit	80 km/h	
HFO Richtung 1	20-40 km	
HFO Richtung 2	20-40 km	
Gefahrgutmenge LS Propan	60'000 t/Jahr	
Gefahrgutmenge LS Chlor	5'000 t/Jahr	
Anteil Chlor in neuen Kesselwagen	1	
Anzahl Reisezüge	150 pro Tag	
Anzahl Reisende pro Reisezug	120	Standardwert
Dichte Reisende Perronbereich	0	Ausserhalb Bahnhofsbereich
Strecke mehrspurig	WAHR	
Perronbereich	FALSCH	Ausserhalb Bahnhofsbereich
Zugänglichkeit Strecke	Mittel	

Für eine Summenkurve Mitte Übergangsbereich wäre auch bei der höchsten betrachteten Transportmenge von 1'000'000 t Benzin/a bei einem Mustergebäude mit 40 x 70 m Ausdehnung rechtwinklig zur Bahnlinie eine Personenbelegung von mehr als 1'400 Personen (Wohnen oder Arbeiten) nötig. Höhere Personenbelegungen können mit dem Bahnscreeningtool nicht berechnet werden.

Dieser Wert für Risikorelevanz von mehr als 1'400 Personen gilt für Strecken ausserhalb des Bahnhofbereichs und ohne Weichen. Für Strecken mit ungünstigeren Werten bei den HFO, höheren Gefahrgutmengen LS Propan und LS Chlor, anderem Anteil an neuen Kesselwagen sowie höherer Anzahl Reisezüge und schlechterer Zugänglichkeit der Strecke sind die 1'400 Personen nicht als Relevanzkriterium geeignet.

6.2.3.1.2 Variante 2:

ausserhalb Bahnhof, mit Weichen, ungünstige Parameter

Für die Bestimmung der Risikorelevanz eines Objektes, d.h. der Personenzahl für eine Summenkurve etwa in der Mitte Übergangsbereich, wurde von einer Strecke ausserhalb des Bahnhofbereichs und mit Weichen mit ungünstigen Parametern ausgegangen. Es wurden folgende technischen Berechnungsannahmen für die Bahnlinie angenommen:

Tab. 2 Bestimmung der Risikorelevanz Berechnungsannahmen für die Bahnlinie

Parameter	Annahme	
	Wert	Bemerkung
Streckentyp	0	Normale Strecke, nicht im Bahnhofsbereich
Weichendichte	>4	Mehr als 4 Weichen, ungünstigster Wert
Geschwindigkeit	80 km/h	
HFO Richtung 1	0-4 / >80 km	ungünstigster Wert
HFO Richtung 2	0-4 / >80 km	ungünstigster Wert
Gefahrgutmenge Leitstoffe Propan	10'000 t/Jahr	
Gefahrgutmenge LS Chlor	2'000 t/Jahr	
Anteil Chlor in neuen Kesselwagen	1	
Anzahl Reisezüge	150 pro Tag	
Anzahl Reisende pro Reisezug	120	Standardwert
Dichte Reisende Perronbereich	0	Ausserhalb Bahnhofsbereich
Strecke mehrspurig	WAHR	Ungünstigster Wert
Perronbereich	FALSCH	Ausserhalb Bahnhofsbereich
Zugänglichkeit Strecke	schlecht	Ungünstigster Wert

Die Personenzahlen in Tab. 3 wurden als Kriterien für Strecken ausserhalb des Bahnhofsbereichs und mit Weichen mit ungünstigen Parametern gemäss Parametern in Tab. 2 für variable Transportmengen des Leitstoffes Benzin mit konstanten Transportmengen des Leitstoffes Propan (10'000 t/Jahr) und Chlor (2'000 t/Jahr) berechnet.

Tab. 3 Max. Personenaufkommen im repräsentativen durchschnittlichen Gebäude mit einem Grundriss von 40 x 70 m quer und von 70 x 30 m parallel zur Transportroute (objektspezifisches Risiko) im Abstand von 10 m bzw. 20 m zur Transportroute (Bahnlinie) Gefahrgut mit einer Summenkurve für alle Leitstoffe in der Mitte Übergangsbereich

Transportmenge [t Benzin / a]	Ab- stand	Arbeitsbevölkerung [Vollzeitäquivalente]		Wohnbevölkerung [Einwohnerzahl]	
Mustergebäude zu Transportroute					
		quer	längs	quer	längs
100'000 t Benzin / a	10 m	(500)	(300)	(700)	(400)
	20 m	(700)	(300)	(900)	(500)
300'000 t Benzin / a	10 m	(500)	(300)	500	300
	20 m	(700)	(300)	700	300
<p>⇒ Kriterium für ein massgebliches objektbezogenes Risiko bei Transportrouten mit 100'000 t bzw. 300'000 t Benzin / a : 300 Personen in einem Objekt (Gebäude) in einem Streifen von je 50 m Breite entlang der Bahnlinie mit Gefahrguttransporten (entspricht dem für Störfälle mit Leitstoff Benzin betrachteten Abstandsbereich gemäss Berechnungsmethodik Screening)</p>					
1'000'000 t Benzin / a	10 m	200	100	300	200
	20 m	400	100	500	200
<p>⇒ Kriterium für ein massgebliches objektbezogenes Risiko bei Transportrouten mit 1'000'000 t Benzin / a: 100 Personen in einem Objekt (Gebäude) in einem Streifen von je 50 m Breite entlang der Bahnlinie mit Gefahrguttransporten (entspricht dem für Störfälle mit Leitstoff Benzin betrachteten Abstandsbereich gemäss Berechnungsmethodik Screening)</p>					

Bei Relevanz-Werten in Klammern sind die Störfallszenarien mit dem Leitstoff Propan und nicht die Szenarien mit dem Leitstoff Benzin risikobestimmend.

Die Kriterien für ein massgebliches objektbezogenes Risiko wurden für die Arbeitsbevölkerung (hauptsächlich anwesend zu den Transportzeiten, leichter evakuierbar) und die Wohnbevölkerung (hauptsächlich anwesend zu den Randzeiten der Transporte, Evakuierung (v.a. nachts) schwieriger) vereinheitlicht.

6.2.3.2 Gefahrguttransporte auf Strasse

Für die Bestimmung der Risikorelevanz, d.h. Personenzahl für eine Summenkurve oberhalb der Mitte Übergangsbereich, wurden folgende Berechnungsannahmen für eine durchschnittliche Situation von Durchgangsstrassen angenommen:

- Durchschnittlicher Anteil Schwertransporte am DTV von 6 % (Handbuch III zur Störfallvorsorge)
- durchschnittlicher Anteil Gefahrguttransporte am Schwerverkehr von 8% (Methodik Screening Durchgangsstrassen)
- durchschnittlicher Anteil Leitstoff Benzin an Gefahrguttransporten von 60% (Methodik Screening Durchgangsstrassen)
- durchschnittlicher Anteil Leitstoff Propan an Gefahrguttransporten von 1% (Methodik Screening Durchgangsstrassen)
- durchschnittlicher Anteil Leitstoff Chlor an Gefahrguttransporten von 0.05% (Methodik Screening Durchgangsstrassen)
- Hauptstrasse kreuzungsfrei, keine seitliche Einschränkungen

Tab. 4 Max. Personenaufkommen im repräsentativen durchschnittlichen Gebäude mit einem Grundriss von 40 x 70 m quer und von 70 x 30 m parallel zur Transportroute (objekt spezifisches Risiko) im Abstand von 10 m bzw. 20 m zur Transportroute (kreuzungsfreie Hauptstrasse) Gefahrgut (Transportanteil Benzin: 60%, Propan: 1%, Chlor: 0.05%) mit einer Summenkurve für alle Leitstoffe in der Mitte Übergangsbereich

DTV	Abstand	Arbeitsbevölkerung [Vollzeitäquivalente]		Wohnbevölkerung [Einwohnerzahl]	
		quer	längs	quer	längs
		Gebäude zur Transportroute			
10'000	10 m	500	300	1'100	500
	20 m	700	300	1'500	600
⇒ Kriterium für ein massgebliches objektbezogenes Risiko bei einem DTV von 10'000: 300 Personen in einem Objekt (Gebäude) in einem Streifen von je 50 m Breite entlang der Strasse mit Gefahrguttransporten (entspricht dem für Störfälle mit Leitstoff Benzin betrach- teten Abstandsbereich gemäss Berechnungsmethodik Screening)					
15'000	10 m	400	300	900	400
	20 m	500	200	1'200	500
20'000	10 m	300	200	800	300
	20 m	400	200	1'000	400
25'000	10 m	300	200	700	300
	20 m	400	200	900	400
⇒ Kriterium für ein massgebliches objektbezogenes Risiko bei einem DTV $\geq 15'000$: 200 Personen in einem Objekt (Gebäude) in einem Streifen von je 50 m Breite entlang der Strasse mit Gefahrguttransporten (entspricht dem für Störfälle mit Leitstoff Benzin betrach- teten Abstandsbereich gemäss Berechnungsmethodik Screening)					

Die Kriterien für ein massgebliches objektbezogenes Risiko wurden für die Arbeitsbevölkerung (hauptsächlich anwesend zu den Transportzeiten, leichter evakuierbar) und die Wohnbevölkerung (hauptsächlich anwesend zu den Randzeiten der Transporte, Evakuierung (v.a. nachts) schwieriger) vereinheitlicht.

6.2.3.3 Erdgashochdruckleitungen

Die Relevanzkriterien für Sonderobjekte, d.h. objektbezogene Risiken für eine Summe in der Mitte Übergangsbereich, sind in der Relevanzmatrix (Ausschlusskriterien) in der Screeningmethodik ("Sicherheit von Erdgashochdruckleitungen - Screening Personenrisiken):

Dokumentation der Methodik, Schweizerische Erdgaswirtschaft und suisseplan, Juni 2014)
festgehalten.

7 Bestimmung der Risikoreduktion durch Objektschutzmassnahmen: Fenster

Als wichtige Massnahme zur möglichen Reduktion der Letalität von Personen in einem Objekt (Gebäude), welches im Einflussbereich eines Störfallbetriebes geplant ist, werden Massnahmen zur Gebäude- bzw. Fassadenverstärkung, z.B. Brandschutzfenster, untersucht. Die aus einer solchen Fassadenverstärkung resultierende Reduktion der Letalität und somit des Risikos wird in vorliegenden "Forschungsprojekt Objektschutz - Grundlagen zum Bauen neben Störfallanlagen" an einem definierten Mustergebäude untersucht.

An der zweiten Sitzung der Begleitgruppe Objektschutzmassnahmen vom 20.4.2018 wurde festgelegt, dass für Betrachtungen zur Risikoreduktion durch eine Gebäudeverstärkung bezüglich des objektbezogenen Risikos nur Personen im Innern des Gebäudes betrachtet werden sollen. Der Anteil der Personen im Freien (in der Umgebung des betrachteten Gebäudes) gemäss den üblichen Präsenzfaktoren wird somit in den nachfolgenden Musterrechnungen zum objektbezogenen Risiko eines Mustergebäudes beim Lachenbrand nicht berücksichtigt.

7.1 Mustergebäude

Da die Schutzwirkung von Gebäuden in den bestehenden Rahmenberichten teilweise stark gemittelt über grössere Abstandsbereiche festgelegt ist, eignen sich diese Vorgaben nicht für eine objektspezifische Aussage zu risikomindernden Massnahmen wie z.B. Fassadenverstärkung an einzelnen Gebäuden. Die Effizienz von solchen Schutzmassnahmen lässt sich nur für repräsentative genauer definierte Gebäude sinnvoll abschätzen. Darum wird in der vorliegenden Untersuchung zur Effizienz von Schutzmassnahmen am Gebäude zuerst eine objektspezifische Betrachtung an einem Mustergebäude vorgenommen.

7.1.1 Situation

Als repräsentatives Gebäude im Einflussbereich eines Lachenbrandes wird ein grösseres Gebäude (Mindestgrösse gewählt wegen Fluchtwegen, Brandabschnitten etc.) folgende einfachen Anordnungen gewählt:

Abb. 21 Mustergebäude (40 x 70 m) quer zur Transportroute von Gefahrgut (Beispiel: Abstand von 10 m)

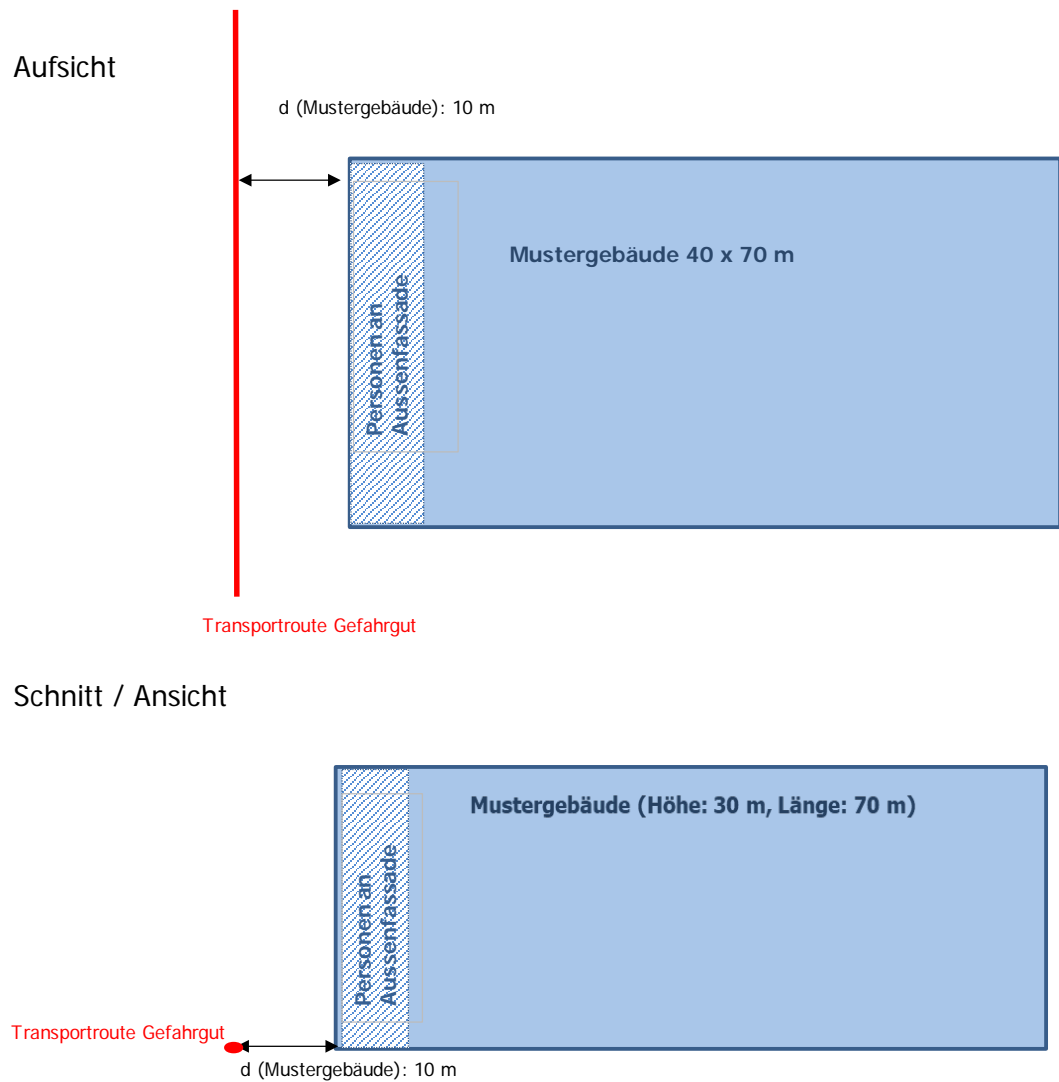
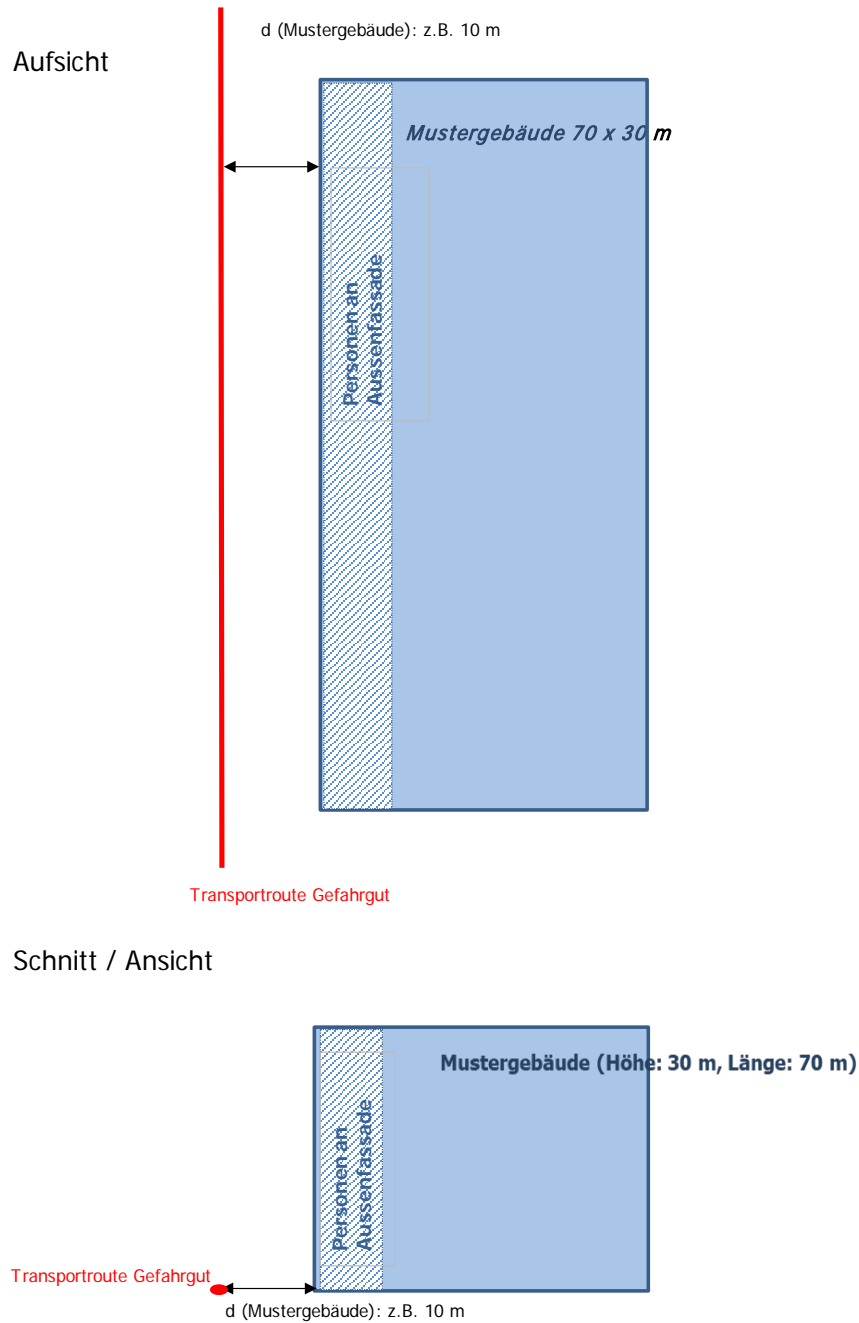


Abb. 22 Mustergebäude (30 x 70 m) parallel zur Transportroute von Gefahrgut (Beispiel: Abstand von 10 m)



7.1.2 Nutzung

Für eine erste Abschätzung der Letalitätswahrscheinlichkeiten für Personen in einem durchschnittlich erbauten Gebäude (basierend auf doppelverglasten Fensterfronten in Anlehnung an die Erläuterungen zum Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen²⁾ und in einem Mustergebäude mit Objektschutzmassnahmen (z.B. mit Brandschutzfenstern) wird in erster Linie eine Nutzung des Gebäudes durch eine normale durchschnittliche Arbeitsbevölkerung angenommen. Damit kann eine relativ hohe Selbstrettung angenommen werden, weil sich die Arbeitsbevölkerung tagsüber im Gebäude aufhält.

Somit werden in den vorliegenden vereinfachten Musterrechnungen nur Nutzungen durch Personen mit durchschnittlichem Fluchtverhalten betrachtet, d.h. keine Nutzungen durch Kleinkinder wie Kinderkrippen, keine Nutzungen durch Patienten, Heiminsassen.

Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Arbeitsbevölkerung wird mit den üblichen Präsenzfaktoren (ohne Berücksichtigung des Anteils Personen im Freien) angenommen:

Tab. 5 Präsenzfaktoren Arbeitsbevölkerung

Wochentag (7 – 19 Uhr)	Nacht während Woche (19 – 7 Uhr)	Wochenendtag (7 – 19 Uhr)	Nacht am Wochenende (19 – 7 Uhr)
80% der Arbeitsbevölkerung anwesend	5% der Arbeitsbevölkerung anwesend	5% der Arbeitsbevölkerung anwesend	0% der Arbeitsbevölkerung anwesend

²⁾ Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen, Letalitäten bei Brandszenarien, Erläuterungen zum "Rahmenbericht zur standardisierten Ausmasseneinschätzung und Risikoermittlung"

7.1.3 Letalitätswahrscheinlichkeiten

Die Herleitung der Letalität von Personen in Gebäuden basiert in der vorliegenden Studie zur Schutzwirkung von Gebäuden hauptsächlich auf den Überlegungen zu einer möglichen Selbstrettung dieser Personen sowohl für durchschnittliche Gebäude als auch in Abhängigkeit der Wirksamkeit von Objektschutzmassnahmen. Ähnliche Überlegungen zur Schutzwirkung von Gebäuden liegen auch dem Rahmenbericht für Erdgashochdruckanlagen zugrunde³.

Für die Selbstrettung von Personen sind die ersten Minuten eines Brandszenariums entscheidend. Die folgenden Überlegungen konzentrieren sich somit auf die ersten Minuten eines Störfallereignisses und gelten nur für Gebäudenutzungen durch Personen mit durchschnittlichem Selbstrettungspotential (Arbeitsplätze, etc).

Für sensitive Nutzungen mit eingeschränktem Selbstrettungspotential (Spitäler, Heime, Schulen, etc.) können die nachfolgenden Überlegungen zur Letalität von betroffenen Personen nicht direkt übertragen werden. In solchen Fällen müssen die Abläufe von Störfallereignissen über einen längeren Zeitraum (Zeitraum Fremdrettung) als ein paar Minuten betrachtet werden, d.h. bis die Leute evakuiert werden können bzw. bis die Ereignisdienste von aussen zu Hilfe leisten können. Die Evakuierung von Personen mit eingeschränkter Selbstrettungsfähigkeit in einen dem Ereignis abgewandten Brandabschnitt bedingt ausgeprägte objektspezifische Betrachtungen (Gebäudedesign), weshalb es nicht möglich ist, an dieser Stelle generische Aussagen zu treffen.

In den Letalitätsbetrachtungen für Personen in Gebäuden sind die Schwellenwerte für das Versagen von Fenstern wichtig, da diese häufig die schwächsten Elemente in der Gebäudehülle gegen Belastungen aus einem Brandereignis bilden. Die meisten personenbelegten Gebäude weisen einen Mindest-Anteil an Fensterfläche auf, damit Nutzungen wie Wohnen bzw. ständige Arbeitsplätze zugelassen sind (Baugesetze, Arbeitsgesetz).

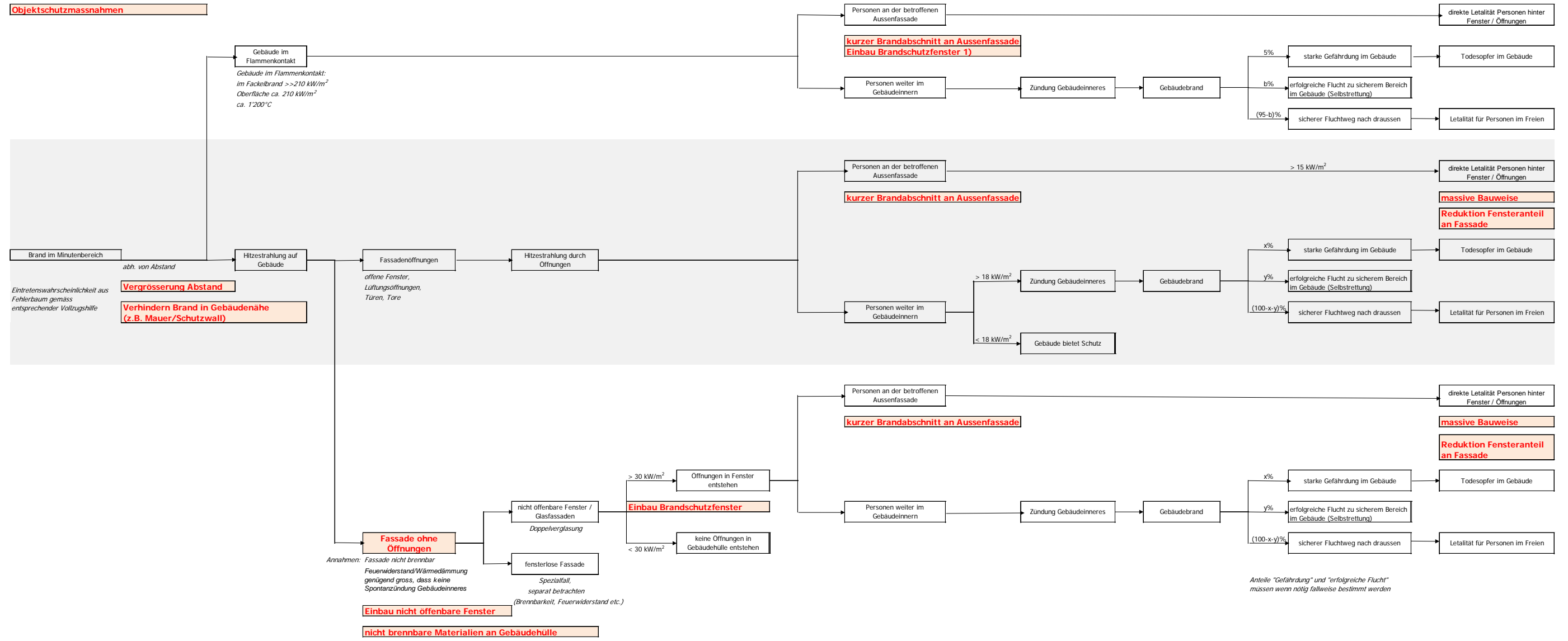
Der Ereignisbaum für das objektbezogene Risiko unterscheidet grundsätzlich, ob bei einer Gebäudefassade Flammenkontakt besteht oder nicht.

³ Siehe Erläuterungen "Letalitäten bei Brandszenarien" zum Rahmenbericht für standardisierte Ausmasseneinschätzung und Risikoermittlungen für Erdgashochdruckanlagen, S. 38ff

Abb. 23 Ereignisbaum Brand mit längerer Abbranddauer (mehrere Minuten): Schutzwirkung Gebäude

Schutzwirkung Gebäude bei Brand von aussen: Brandereignis im Minutenbereich

(Expositionszeit: mehrere Minuten) (z.B. Lachenbrand, Fackelbrand)



7.1.3.1 Gebäude im Flammenkontakt

Bei Gebäuden im Flammenkontakt werden die Letalitätswahrscheinlichkeiten von Personen an der exponierten Fassade und im Gebäudeinneren unterschieden:

Für Personen an der exponierten Aussenfassade wird bei normaler Verglasung bei Flammenkontakt eine Letalitätswahrscheinlichkeit wie Personen im Freien angenommen.

Die Wirksamkeit von Brandschutzfenstern im direkten Flammenkontakt konnte anhand der Tests der Glashersteller nicht abschliessend bestimmt werden.

Personen im Gebäudeinneren haben die Letalitätswahrscheinlichkeit von Personen bei einem Gebäudebrand. Dabei sind die starke Gefährdung von Personen im Gebäude (rasche Brandausbreitung im Gebäude), die Fluchtmöglichkeiten (Selbstrettung) in einen sicheren Bereich innerhalb des Gebäudes (z.B. in nicht betroffenen Brandabschnitt) oder ins Freie zu berücksichtigen.

Bei der Möglichkeit einer Selbstrettung in einen sicheren Bereich innerhalb des Gebäudes oder ins Freie in einen Bereich, wo die Hitzestrahlung keine letale Dosis mehr erreicht, kann eine hohe Schutzwirkung des Gebäudes angenommen werden.

7.1.3.2 Gebäude in starker Hitzestrahlung ohne Flammenkontakt

Wenn das betroffene Gebäude beim Störfallereignis nicht im Flammenkontakt steht, sondern nur der Hitzestrahlung ausgesetzt ist, werden für die Letalität zwei Gebäudetypen unterschieden:

- Gebäude mit Fassadenöffnungen und
- Gebäude ohne Fassadenöffnungen.

Wenn Fassadenöffnungen vorhanden sind, wird davon ausgegangen, dass das Gebäudeinnere zündet, wenn der Wärmestrom auf die Fassade 18 kW/m^2 überschreitet (Schwellenwert für Zündung von Holz bei vorhandenen Zündquellen innert ca. 3.5 min, piloted ignition nach Bilo und Kinsman (1997) / HSE, auch im Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen verwendet. Kunststoffe und Textilien verhalten sich ähnlich).

Es wird beim durch ein Störfallereignis ausgelösten Gebäudebrand (Sekundärbrand) eine Letalitätswahrscheinlichkeit von 1-5% eingesetzt. Brandstatistiken zeigen, dass bei ca. 20'000 jährlichen Bränden in Häusern und Wohnungen bis zu 40 Todesfälle und bis zu 200 teilweise schwere Verletzung auftreten (<http://www.bfb-cipi.ch/Brandverhuetung/Brandstatistiken.htm>). Für ein grosses Störfallereignis mit schneller Brandentwicklung wird mit den 1-5% für die vorliegenden Abschätzungen zur Schutzwirkung von Gebäuden eine grössere Letalität angenommen als sie bei den statistisch erfassten durchschnittlichen Bränden auftritt. Die Letalitätswahrscheinlichkeit durch einen Sekundärbrand des Gebäudes kann durch geeignete Fluchtwege, welche nicht in gegen das Störfallereignis exponierten Gebäudeteilen durchführen, kleine Brandabschnitte in den exponierten Gebäudeteilen und allenfalls durch Schutzräume reduziert werden.

Bei Fassaden mit geschlossenen Standard-Fenstern wird davon ausgegangen, dass ab einer Hitzestrahlungsintensität von 30 kW/m^2 bei den Fenstern in den ersten Minuten Öffnungen in den Fenstern entstehen und das Gebäudeinnere zündet (Schwellenwert für Entstehen von Öffnungen in normalen Fenstern gemäss Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen, Literaturwert aus Versuchen Shield *et al.* 2005⁴). Zur Bestimmung der Letalitätswahrscheinlichkeit der Personen an der betroffenen Aussenfassade, welche sich hinter Fenstern aufhalten, die bei einem Störfallereignis aufgrund der grossen Hitzestrahlung versagen, werden die Letalitätsradien bei direkter Strahlungseinwirkung in 8 m Höhe ab Boden (keine Berücksichtigung der Absorption durch Fensterscheiben) verwendet.

Falls keine Öffnungen in der Gebäudehülle entstehen, werden für die Personen an der exponierten Fassade die Letalitätsradien in 8 m Höhe ab Boden hinter Fensterscheiben (Transmissionsfaktor 0.5 für normale Fenster, Angabe BAFU vom 26.10.2018) verwendet.

Für Brandschutzfenster wird ausgehend von den Tests der Glashersteller als Arbeitshypothese angenommen, dass in einem EI30 Fenster in den ersten 15-30 min des Brandes keine Öffnungen entstehen, wenn die Hitzestrahlungsintensität an der exponierten Fassade $50\text{-}60 \text{ kW/m}^2$ nicht überschreitet.

Falls keine Öffnungen in der Gebäudehülle entstehen, werden für die Personen an der exponierten Fassade die Letalitätsradien in 8 m Höhe ab Boden hinter Fensterscheiben (Transmissionsfaktor 0.2 für Brandschutzfenster) verwendet.

Für Personen im Gebäudeinneren wird eine Letalitätswahrscheinlichkeit infolge des Gebäudebrands (Sekundärbrand) von 1-5% eingesetzt.

⁴ Siehe Erläuterungen "Letalitäten bei Brandszenarien" zum Rahmenbericht für standardisierte Ausmasseneinschätzung und Risikoermittlungen für Erdgashochdruckanlagen, S. 50ff

7.2 Letalitätskriterien Hitzestrahlung

Für die vorliegende Bestimmung des objektbezogenen Risikos wird basierend auf durch das HSE (Health & Safety Executive, GB) verwendeten Werten folgende Korrelation Letalitätswahrscheinlichkeit – Hitzestrahlungsdosis verwendet:

Tab. 6 Dosis-Letalitäts-Beziehung gemäss Erläuterungspapier "Letalitäten bei Brandszenarien" zum Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen

Letalität	Dosis V in TDU
0%	735
25%	1'405
50%	2'075
75%	2'745
100%	3'415

7.3 Störfallszenarium Lachenbrand

7.3.1 Lachenbrand auf Transportroute entlang Gebäuden

7.3.1.1 Dimensionen Lachenbrand bei Gefahrguttransporten

7.3.1.1.1 *Gefahrguttransporte auf Schienen*

Die massgebliche Fläche für einen Lachenbrand von 200 m² für Gefahrguttransporte auf der Bahn, Leitstoff Benzin, wurde aus der Studie "Wirkung von Störfallszenarien bei der Bahn und bauliche Schutzmassnahmen an Gebäuden", Ernst Basler + Partner, 13. Januar 2009, entnommen.

7.3.1.1.2 Gefahrguttransporte auf Strassen

Gemäss der Screening-Methodik "Störfallrisiken auf Durchgangsstrassen" (EBP, 1.4.2010) wird als worst case Störfall eine spontane Freisetzung von rund 20 t Benzin angenommen.

Gemäss Pilotrisikoanalyse für den Transport von gefährlichen Gütern (EBP; Aug. 1999) werden folgende Lachengrössen angenommen:

- Lachengrösse 150 m² bei Freisetzung von 10 kg Benzin/s (Lache im Strassenraum: L=15 m, Breite nicht über Fahrbahnrand; Lache ausserhalb Strassenraum: R=7.5 m) und
- Lachengrösse 300 m² bei Freisetzung von 300 kg Benzin/s (Lache im Strassenraum: L=30 m, Breite nicht über Fahrbahnrand; Lache ausserhalb Strassenraum: R=15 m)

Für die vorliegenden Risikobetrachtungen des objektbezogenen Risikos (Mustergebäude) wird beim Unfall/Versagen eines Benzintankwagens dieselbe Lache von 200 m² mit einem Radius von 8 m angenommen wie beim Unfall/Versagen eines Benzinkesselwagens.

7.3.1.2 HSE Zweizonenmodell

Die Berechnungen mittels HSE Zweizonenmodell zu den Branddimensionen eines Lachenbrand von 200 m² für einen Benzintransport auf einer Durchgangsstrasse haben folgende Resultate ergeben:

- Reichweite Flamme 21 m gemäss HSE Zweizonenmodell

Abb. 24 Dimensionen Lachenbrand in Nähe Mustergebäude entlang Durchgangsstrasse

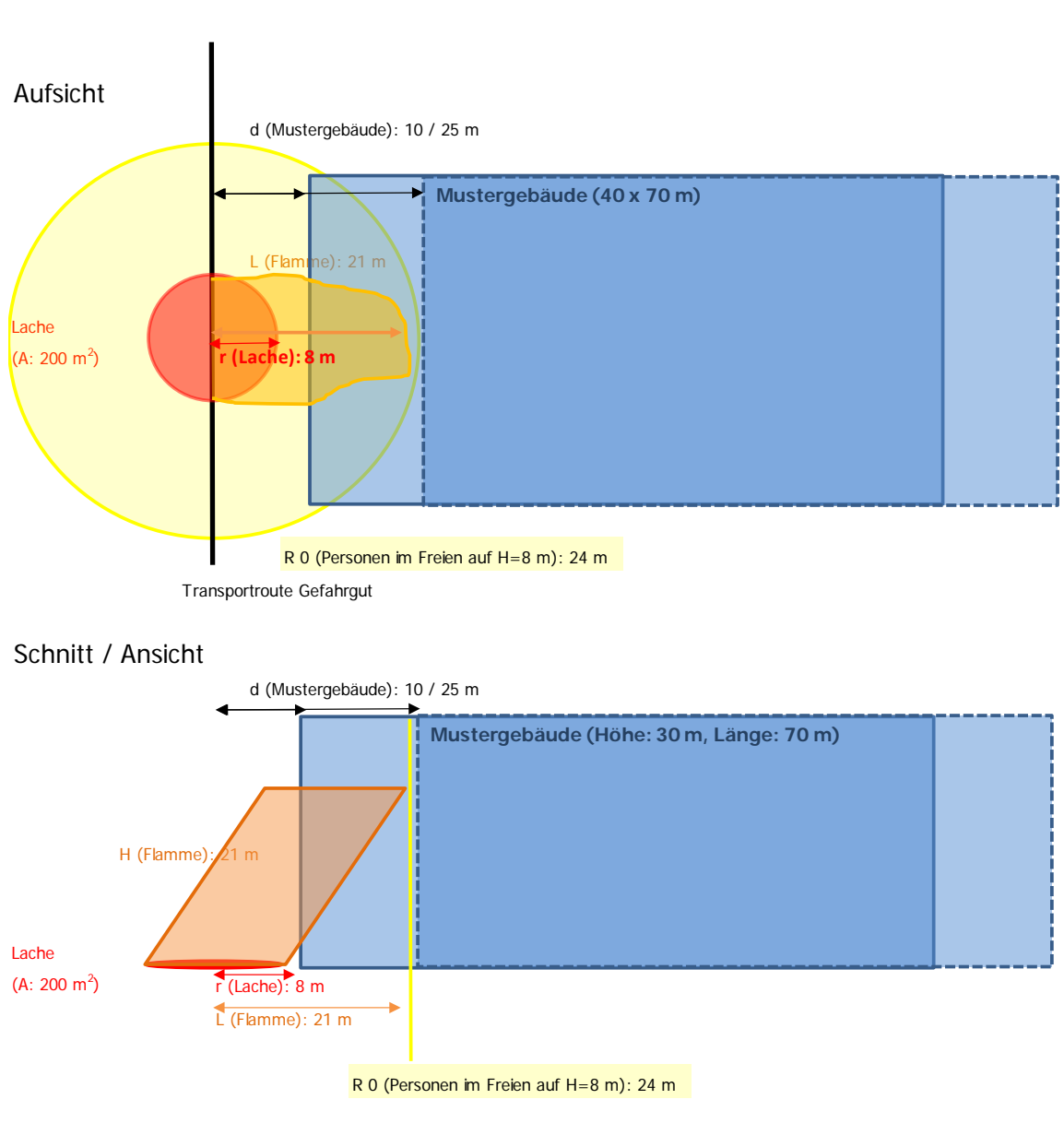
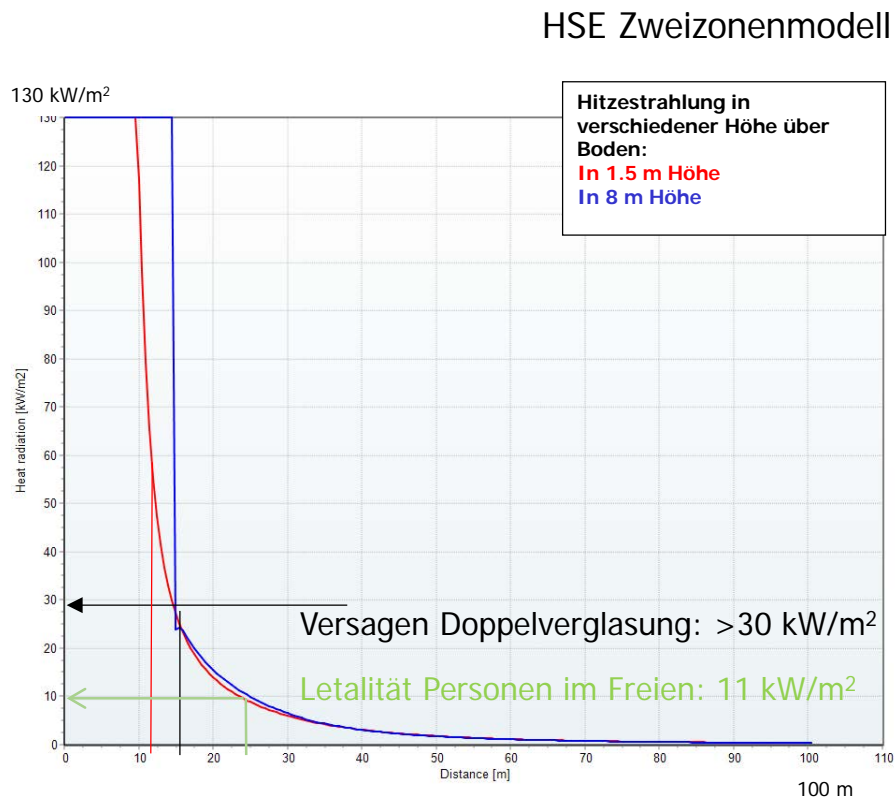


Abb. 25 Schwellenwerte und Hitzestrahlung in verschiedener Höhe über Boden in Abhängigkeit der Distanz zu einem Lachenbrand von 200 m² Grösse (Gefahrguttransporte auf der Bahn: Kesselwagen mit 60 t Benzin), HSE Zweizonenmodell (Berechnung BAFU mit TNO Effects 10.1)



Quelle für Schwellenwerte Versagen Doppelverglasung / Letalität Personen im Freien: Erläuterungen zum Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen "Letalitäten bei Brandszenarien" mit entsprechender Literatur

Als Arbeitshypothese auf Basis der Testergebnisse bei den Glasherstellern wird angenommen, dass in einem EI30 Fenster in den ersten 15-30 min des Brandes keine Öffnungen entstehen, wenn die Hitzestrahlungsintensität ca. 50-60 kW/m² nicht überschreitet.

Der Flammenkontakt konnte nicht getestet werden.

In der obigen Modellrechnung mit dem HSE Zweizonenmodell wird eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s in Richtung des Gebäudes angenommen. D.h. die Flamme ist in Richtung des Gebäudes geneigt, so dass bis in eine Distanz von ca. 21 m zum Lachenmittelpunkt mit Flammenkontakt zu rechnen ist.

Zur Bestimmung der Hitzestrahlung, die in einem bestimmten Abstand vom Lachenbrandzentrum auf eine Fassade trifft, wird mit dem HSE Zweizonenmodell die Hitzestrahlung in 8 m Höhe berechnet (blaue Kurve in obiger Abbildung). Die blaue Kurve steigt im Abstand von ca. 15 m von ca. 25 kW/m² auf 130 kW/m² senkrecht an, d.h. wenn die Fenster statt bei 30-35 kW/m² (normale Doppelverglasung) erst bei 50-60 W/m² (Arbeitshypothese Brandschutzfenster) versagen, ergibt sich rechnerisch kein Unterschied. Beim Verlauf der

blauen Kurve gibt es keinen Distanzbereich, in dem eine normale Doppelverglasung brechen würde, ein Brandschutzfenster jedoch nicht.

Im vorliegenden Fall reicht die Zone mit Flammenkontakt jedoch über die Zone mit dem senkrechten Anstieg der Strahlungswerte bei der blauen Kurve hinaus. Innerhalb der Zone mit Flammenkontakt sind nicht die Strahlungswerte, sondern der Flammenkontakt massgeblich. Da jedoch der Flammenkontakt nicht getestet werden konnte, wird konservativ davon ausgegangen, dass die Brandschutzfenster dem Flammenkontakt nicht genügend lange für eine relevante Schutzwirkung standhalten.

- ⇒ *Eine gegenüber normalen Fenstern grössere Schutzwirkung der Brandschutzfenster ist deshalb allenfalls für kleinere Störfallszenarien als die worst case Szenarien gemäss Screening-Methoden zu erwarten. Auch wenn Brandschutzfenster allenfalls der durch einen Lachenbrand verursachten Hitzestrahlung nicht über längere Zeit widerstehen können, so verlängert sich doch die Zeit für eine erfolgreiche Selbstrettung für die Personen an diesen Gebäuden mit Brandschutzfenstern gegenüber einem Gebäude mit normalen Fenstern.*
- ⇒ *Daher ist für eine wirksame Objektschutzmassnahme eine auch im Störfall geeignete Entfluchtung (Fluchtmöglichkeiten auch bei Sekundärbrand des Gebäudes in einen sicheren Bereich auf der dem Lachenbrand abgewandten Gebäudeseite) in Kombination mit der Verstärkung der exponierten Fassade (Brandschutzfenster) wichtig.*

7.3.1.3 Transport auf Schienen:

Annahme Wahrscheinlichkeit Lachenbrand Benzin

Für die Berechnung des objektbezogenen Risikos wird die Wahrscheinlichkeit eines Lachenbrands grob konservativ auf Basis der folgenden Parameter geschätzt (Freisetzung mit Zündung).

Tab. 7 Bestimmung der Risikorelevanz Berechnungsannahmen für die Bahnlinie

Parameter	Annahme	
	Wert	Bemerkung
Streckentyp	0	Normale Strecke, nicht im Bahnhofsbereich
Weichendichte	Null	Keine Weichen
Geschwindigkeit	80 km/h	
HFO Richtung 1	20-40 km	
HFO Richtung 2	20-40 km	
Gefahrgutmenge LS Benzin	1'000'000 t/Jahr	

Es wird grob konservativ folgende Wahrscheinlichkeit eines Lachenbrandes mit Zündung angenommen: 5×10^{-7} pro 100 m y

Das Mustergebäude ist die einzige Personenbelegung, d.h. es werden keine Passagiere in Reisezügen etc. berücksichtigt.

Annahme: gleichmässige Verteilung der Transporte Tag und Nacht sowie Werktags und Wochenende

7.3.1.4 Lachenbrand Benzin auf der Strasse:

Annahme Wahrscheinlichkeit Lachenbrand

Eintretenswahrscheinlichkeiten spontane Freisetzung Benzin mit Zündung gemäss Screening-Methodik "Störfallrisiken auf Durchgangsstrassen" (EBP, 1.4.2010):

Freisetzungshäufigkeit $H_j =$

h_j (Durchgangsstrassen: 1.5×10^{-9}) * f_{Unfall} (Normalfall: 1) * DTV * Anteil Schwerverkehr (3.5%) * Anteil Gefahrguttransport (8%) * ortsspezifischer Anteil Leitstoff (60%) = $2.52 \times 10^{-12} \times \text{DTV}$

Wahrscheinlichkeit spontane Freisetzung Benzin (10%) mit Zündung (30%):

$7.56 \times 10^{-14} \times \text{DTV}$

Tab. 8 Wahrscheinlichkeiten Lachenbrand Durchgangsstrassen (Freisetzung mit Zündung)

DTV	Wahrscheinlichkeit P(Lachenbrand)
5'000	3.78E-10 pro 100 m und Jahr
10'000	7.56E-10 pro 100 m und Jahr
15'000	1.134E-09 pro 100 m und Jahr
20'000	1.512E-09 pro 100 m und Jahr
30'000	2.268E-09 pro 100 m und Jahr
40'000	3.024E-09 pro 100 m und Jahr

7.3.1.5 Berechnungsergebnisse

Bei den nachfolgenden Berechnungen wird die Wahrscheinlichkeit eines Lachenbrandes mit Zündung von 5×10^{-7} pro 100 m y für Gefahrguttransporte auf der Bahn angenommen.

Für das Störfallszenarium werden folgende Annahmen getroffen:

- Lachenbrand 200m² HSE Zweizonenmodell
- Reichweite Flamme 21 m gemäss HSE Zweizonenmodell

Für das Mustergebäude werden zur Berechnung des objektbezogenen Risikos folgende Annahmen getroffen:

- geschlossene Fenster mit Normalverglasung (Variante 1) und Brandschutzfenster (Variante 2)
- alle anwesenden Personen im Gebäude (kein Anteil der anwesenden Personen im Freien)

Abb. 26 W-A Diagramm Lachenbrand Bahn Variante 1:

Mustergebäude 40 x 70 m mit normalen, geschlossenen Fenstern, 200 Arbeitsplätze (keine Personen im Freien), 15 m Abstand zum Lachenbrandzentrum, Schwellenwert Strahlung Entstehen von Öffnungen in den Fenstern 30 kW/m², Transmissionskoeffizient 0.5

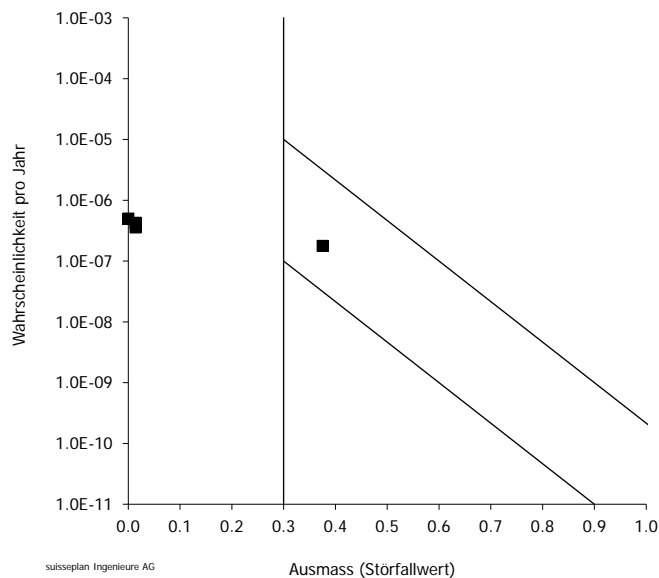
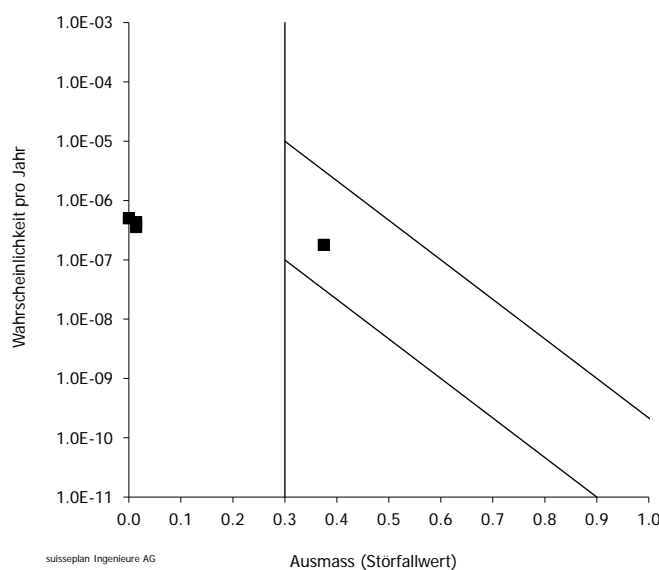


Abb. 27 W-A Diagramm Lachenbrand Bahn Variante 2:

Mustergebäude 40 x 70 m mit Brandschutzfenstern, 200 Arbeitsplätze (keine Personen im Freien), 15 m Abstand zum Lachenbrandzentrum, Schwellenwert Strahlung Entstehen von Öffnungen in den Fenstern 50-60 kW/m², Transmissionskoeffizient 0.2



Die Summenkurven mit geschlossenen, normalen Fenstern und mit Brandschutzfenstern sind identisch.

Der Grund dafür ist, dass in beiden Fällen davon ausgegangen wird, dass bei Flammenkontakt Öffnungen in der Scheibe entstehen. Bei der Modellierung des Lachenbrandes wurde davon ausgegangen, dass der Wind in Richtung des Gebäudes weht. Deshalb ist die Flamme zum Gebäude hin geneigt, so dass bis in eine grössere Distanz zum Brandzentrum Flammenkontakt mit der Gebäudefassade auftritt. Beim Flammenkontakt sind die Fenster einer sehr hohen thermischen Belastung ausgesetzt.

In anderen Situationen mit tieferer thermischer Belastung könnten Brandschutzfenster eine höhere Schutzwirkung haben.

7.3.1.6 Fazit und weiteres Vorgehen

Der entscheidende Parameter zur Beurteilung der Wirksamkeit und Verhältnismässigkeit von Brandschutzfenstern im Nahbereich eines Lachenbrands mit 200 m² Fläche (Kesselwagen Benzin) ist, ob die Brandschutzfenster dem Flammenkontakt standhalten oder nicht:

- Falls die Brandschutzfenster dem Flammenkontakt nicht standhalten, ergeben sich rechnerisch kaum Unterschiede zwischen normalen Fenstern und Brandschutzfenstern bei der Summenkurve.
- Falls die Brandschutzfenster dem Flammenkontakt standhalten, können sich innerhalb der Zone mit Flammenkontakt (bis in 21 m Abstand vom Lachenbrand) rechnerisch Unterschiede zwischen normalen Fenstern und Brandschutzfenstern bei der Summenkurve ergeben.

Bei grösseren Brandszenarien mit einem ausgedehnteren Bereich (z.B. Lachenbrand Ölleitungen, Bassinbrand Tanklager) mit hoher Strahlungsintensität ausserhalb der Flamme können auch Schwellenwerte für das Entstehen von Öffnungen in den Fenstern infolge Hitzeabstrahlung sowie unterschiedliche Transmissionskoeffizienten bei normalen Fenstern und bei Brandschutzfenstern eine Rolle spielen.

Unter den Versuchsbedingungen, welche Glas Trösch im Test erreicht konnte (Brandschutzfenster in unmittelbarer Flammennähe mit Wärmebelastung grösser als ETK) hat sich gezeigt, dass die Brandschutzfenster länger widerstehen können als normale Fenster, bis Öffnungen in den Fenstern entstehen. Dadurch verlängert sich die Zeit für eine erfolgreiche Selbstrettung für die Personen an diesen Gebäuden mit Brandschutzfenstern gegenüber einem Gebäude mit normalen Fenstern.

⇒ *Daher ist für eine wirksame Objektschutzmassnahme nicht nur eine Verstärkung der Fassade durch Einbau von Brandschutzfenstern, sondern eine auch im Störfall geeignete Entfluchtung (Fluchtmöglichkeiten auch bei Sekundärbrand des Gebäudes in einen sicheren Bereich auf der dem Lachenbrand abgewandten Gebäudeseite) in Kombination mit der Verstärkung der exponierten Fassade (Brandschutzfenster) wichtig.*

7.3.2 Bassinbrand Tanklager

Bei grösseren Lachenbrandszenarien wie beispielsweise ein Bassinbrand bei einem Tanklager treten auch im Abstandsbereich ohne Flammenkontakt noch höhere Strahlungswerte auf als bei kleineren Lachenbränden. Hier besteht die Möglichkeit, dass sich bei der Summenkurve des Mustergebäudes ein Unterschied zwischen normalen Fenstern und Brandschutzfenster ergeben würde, wenn für die Brandschutzfenster ein höherer Schwellenwert für das Entstehen von Öffnungen infolge von Hitzestrahlung als bei normalen Fenstern angenommen wird.

7.4 Dynamisches Brandszenarium mit Druckwelle

Bei einem BLEVE berstet ein Druckbehälter mit einer expandierenden siedenden brennbaren flüssigen bzw. verflüssigten Substanz. Dabei gelangt der Behälterinhalt innert kurzer Zeit zum Abbrand. Es handelt sich deshalb um ein sehr heftiges Brandszenarium mit entsprechend hoher Hitzestrahlung, die aber nur für eine kurze Zeitspanne auftritt.

Das Bersten des Behälters sowie der rasche und hochturbulente Abbrand des Behälterinhalts führen zu einer oder mehreren Druckwellen.

Die Fenster werden somit bei einem BLEVE sowohl durch Hitzestrahlung / Flammenkontakt als auch Druckwellen beansprucht.

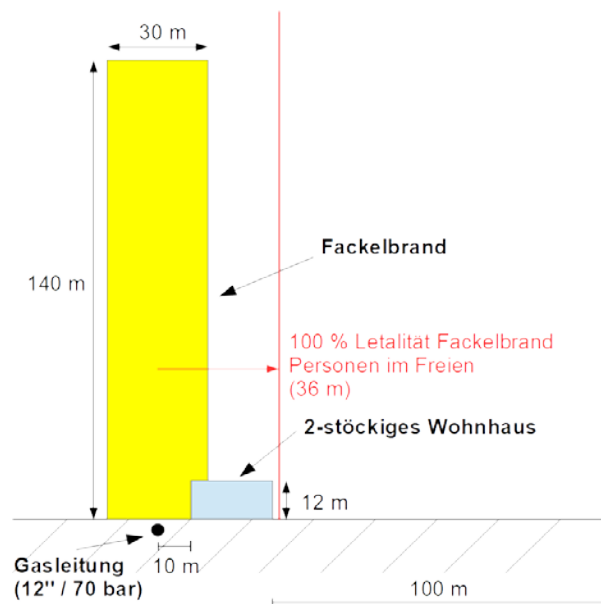
Zurzeit sind keine Nachweise für den Widerstand von Fenstern gegen beide Belastungen, Druckwelle und Hitzestrahlung (BLEVE, Feuerball, etc.) bekannt.

7.5 Brandszenarien Erdgashochdruckleitung: Objektbezogenes Risiko

7.5.1 Fackelbrand

Als Beispiel wird ein Mustergebäude im Konsultationsbereich einer Erdgashochdruckleitung (12"/70 bar) betrachtet:

- Durchmesser Flammengrösse Fackelbrand ca. 30 m
- Höhe Flammengrösse Fackelbrand ca. 140 m



Beim Fackelbrand bei einem Totalversagen einer Erdgashochdruckleitung liegt ein Gebäude in unmittelbarer Nähe des Störfalles vollständig im Bereich einer hohen Hitzestrahlung. Eine Selbstrettung ins Freie ist deshalb auch auf der störfallabgewandten Gebäudeseite nicht möglich. Objektschutzmassnahmen müssen in diesem Fall eine längerdauernde Schutzwirkung (bis zum Erlöschen des Fackelbrandes nach vollständigem Abbrennen des Gasinhaltes des betreffenden Leitungsabschnittes nach Verschluss der Schieber) bieten zur Reduktion der Letalität von Personen im betroffenen Gebäude.

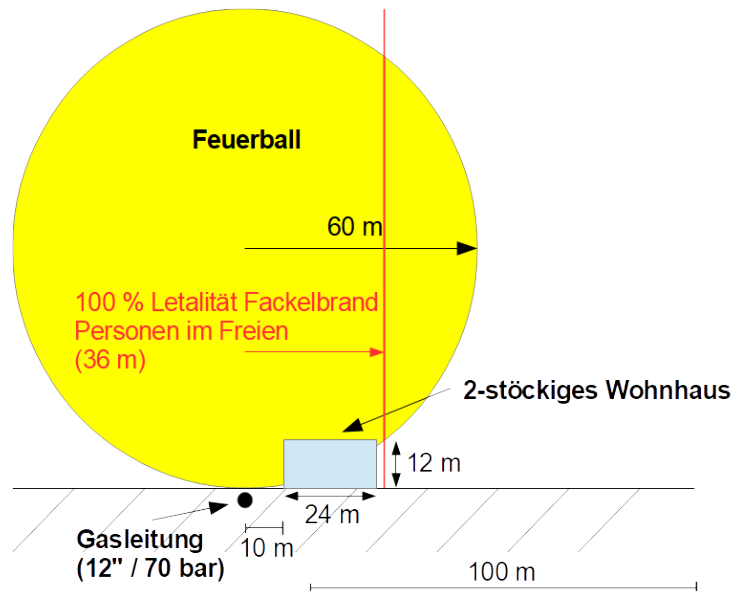
Die im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Tests zeigen zwar einen erhöhten Widerstand von Brandschutzfenstern gegen Hitzestrahlung, ein längerandauernde Schutzwirkung konnten jedoch bisher nicht quantifiziert werden.

Brandschutzfenster können mit den heutigen Kenntnissen bezüglich Brandwiderstand nicht als effiziente Massnahme zur signifikanten Reduktion der Letalität von Personen in Gebäuden bei Totalversagen einer Erdgashochdruckleitung in unmittelbarer Nähe (Mindestabstand gemäss Sicherheitsvorschriften: 10 m) betrachtet werden.

7.5.2 Feuerball

Wohngebäude im Konsultationsbereich einer Erdgashochdruckleitung (12"/70 bar)

- Durchmesser Flammengrösse Feuerball: ca. 120 m



Beim Feuerball bei einem Totalversagen einer Erdgashochdruckleitung liegt ein Gebäude in unmittelbarer Nähe des Störfalles vollständig im Bereich einer sehr hohen Hitzestrahlung. Eine Selbstrettung ins Freie ist auch auf der störfallabgewandten Gebäudeseite nicht möglich, weil nach dem Szenarium Feuerball mit dem anschliessenden Szenarium Fackelbrand zu rechnen ist.

Objektschutzmassnahmen müssen deshalb in diesem Fall sowohl eine Schutzwirkung gegen die mit einem Feuerball einhergehende Druckwelle als auch eine längerdauernde Schutzwirkung (bis zum Erlöschen des Fackelbrandes nach vollständigem Abbrennen des Gasinhaltes des betreffenden Leitungsabschnittes nach Verschluss der Schieber) bieten zur Reduktion der Letalität von Personen im betroffenen Gebäude.

Die im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Tests zeigen zwar einen erhöhten Widerstand von Brandschutzfenstern gegen Hitzestrahlung, eine länger andauernde Schutzwirkung bei Einwirkungen mit Flammenkontakt ist jedoch nicht anzunehmen.

Brandschutzfenster können mit den heutigen Kenntnissen bezüglich Brandwiderstand und Widerstand gegen Druckwellen nicht als effiziente Massnahme zur signifikanten Reduktion der Letalität von Personen in Gebäuden bei Totalversagen einer Erdgashochdruckleitung in unmittelbarer Nähe (Mindestabstand gemäss Sicherheitsvorschriften: 10 m) betrachtet werden.

8 Schussfolgerungen und Empfehlungen

Das Pflichtenheft zum Forschungsprojekt Objektschutz (BAFU, Juni 2017) beinhaltet die Bearbeitung folgender Kernfragen:

- Bei welchen Bauten im Umfeld von welchen Störfallanlagen (bzgl. Leitstoffen) machen welche Objektschutzmassnahmen (Nutzungsart, baulich, technisch – am Objekt und in der Umgebung) Sinn (hinsichtlich Effektivität und Verhältnismässigkeit)?
- Anhand welcher Kriterien soll die Verhältnismässigkeit von Objektschutzmassnahmen beurteilt werden (Letalitätsradien, kollektives Risiko, lokales Todesfallrisiko, Kosten etc.)?
- Wie ist der Einfluss von Objektschutzmassnahmen auf das Kollektivrisiko in der Praxis abzuschätzen?

Bei welchen Bauten im Umfeld von welchen Störfallanlagen (bzgl. Leitstoffen) machen welche Objektschutzmassnahmen (Nutzungsart, baulich, technisch – am Objekt und in der Umgebung) Sinn (hinsichtlich Effektivität und Verhältnismässigkeit)?

Da der Leitstoff Benzin im Vergleich zu den anderen Leitstoffen auf der Strasse und auf der Bahn schweizweit am häufigsten transportiert wird und bei Störfällen mit Benzintransporten ein Lachenbrand das häufigste Störfallszenario ist, wurden im vorliegenden Forschungsprojekt der Fokus auf länger andauernde Brandszenarien ohne ausgeprägte Druckwelle gelegt.

Als wichtigste in der Vollzugspraxis oft diskutierte Objektschutzmassnahme wurde schwerpunktmässig der Einbau von Brandschutzfenstern an störfallexponierten Fassaden untersucht. Zur Ermittlung von verlässlichen Daten bezüglich deren maximalen thermischen Belastbarkeit sowie bezüglich deren Transmissionsverhalten wurden Praxisversuche mit repräsentativen Brandschutzprodukten (EI30) durchgeführt.

Lachenbrand bei Gefahrguttransporten

Eine Versuchsanordnung mit direktem Flammenkontakt konnte in den bestehenden Prüföfen nicht erreicht werden. Es wurde daher eine Anordnung mit grosser Belastung der Prüfkörper gewählt.

Der Versuch von Glas Trösch (Situation "Fenster in unmittelbarer Flammennähe") zeigt, dass Brandschutzfenster den Einwirkungen durch heisse Brandgase und Hitzestrahlung länger standhalten als Standardfenster. Daraus ergibt sich bei einem Lachenbrand ein Zeitgewinn für die Selbstrettung der Personen im Gebäude.

Der Versuch Vetrotech (Situation "Fenster ausserhalb Flamme") zeigt, dass Nachweisverfahren für den Feuerwiderstand der Brandschutzfenster mit der Einheitstemperaturkurve (ETK) nicht die bei Störfällen auftretenden Einwirkungen wiedergeben. Die Ofentests unterscheiden sich von Störfällen mit Kohlenwasserstoffbränden bezüglich Art der Einwirkung

(Wärmetransport durch Brandgase bzw. Wärmetransport durch Strahlung), dem Strahlungsspektrum und dem sehr schnellen Anstieg der Hitzeeinwirkung (Temperaturwechselbeständigkeit Fenster). Zurzeit ist kein Nachweis für den Widerstand von Brandschutzfenstern bei einer HC Kurve (Kohlenwasserstoff Kurve) bekannt.

Der Schutz durch Brandschutzfenster in unmittelbarer Nähe der worst case Störfallszenarien (Schutz vor Hitzestrahlung) konnte somit durch die vorliegenden Untersuchungen nicht quantifiziert werden.

In den Versuchen konnte trotzdem am Beispiel von Brandschutzfenstern der Kategorie EI30 gezeigt werden, dass Brandschutzfenster auch bei höheren Belastungen als in den Nachweisverfahren vorgegeben länger standhalten können als 3-fach Isolierglas. Damit können Brandschutzfenster in vielen Fällen einen höheren Schutz bieten als 3-fach Isolierglas, z.B. bei kleineren Störfallszenarien, bei Fenstern in grösserem Abstand zu worst case Störfallszenarien etc.). Auch bei einer Kombination von Brandschutzfenstern und geeigneten Fluchtwegen in einen sicheren Bereich (z.B. kleine Brandabschnitte hinter exponierten Fassaden, sicherer Bereich im Freien bei Sekundärbrand des Gebäudes) können Brandschutzfenster die Letalität von exponierten Personen reduzieren.

Die Schutzwirkung von Personen in Gebäuden durch Brandschutzfenster (Risikoreduktion) ist nur bei geschlossenen Fenstern gegeben. Brandschutzfenster bieten also nicht in allen Fällen Schutz, es muss die Eintretenswahrscheinlichkeit des Falles "Brandschutzfenster geöffnet" in Risikobetrachtungen berücksichtigt werden.

Gaswolkenbrand / BLEVE bei Gefahrguttransporten

Zurzeit sind keine Nachweise für den Widerstand von Fenstern gegen beide Belastungen, Druckwelle und Hitzestrahlung (BLEVE, Feuerball, etc.) bekannt.

Brandszenarien Erdgashochdruckleitungen

Bei den Worst Case Brandszenarien nach einem Totalversagen von Erdgashochdruckleitungen mit Zündung kann wegen der sehr hohen Hitzestrahlung und den grossen Branddimensionen (Flammensäule bis zu 400 m hoch) mit den heutigen Kenntnissen zu Brandschutzfenstern keine signifikante Schutzwirkung erwartet werden. Der Einbau von Brandschutzfenstern bei Gebäuden nahe von Erdgashochdruckleitungen kann daher nicht als wirksame risikomindernde Massnahmen gegen Worst case Szenarien empfohlen werden.

Anhand welcher Kriterien soll die Verhältnismässigkeit von Objektschutzmassnahmen beurteilt werden (Letalitätsradien, kollektives Risiko, lokales Todesfallrisiko, Kosten etc.)?

Massgebliche Risiken, bei denen Objektschutzmassnahmen geprüft werden sollten, ergeben sich in denjenigen Situationen, wo das durch das Objekt alleine bestimmte Risiko (objektbezogenes Risiko) eine Summenkurve (Schadenindikator "Anzahl Todesopfer") mindestens in der Mitte Übergangsbereich gemäss den Beurteilungskriterien des BAFU erreicht. In Situation mit Summenkurven über der Mitte Übergangsbereich, was in der Regel grössere Objekte, z.B. Gebäude mit grossen Personenzahlen, betrifft, sind aus Sicht der Störfallvorsorge (Katastrophenschutz gemäss Umweltschutzgesetz) wirksame Objektschutzmassnahmen sinnvoll.

In solchen Fällen wird somit eine Überprüfung der Wirkung von Objektschutzmassnahmen zur allfälligen Risikoreduktion empfohlen.

Wie ist der Einfluss von Objektschutzmassnahmen auf das Kollektivrisiko in der Praxis abzuschätzen?

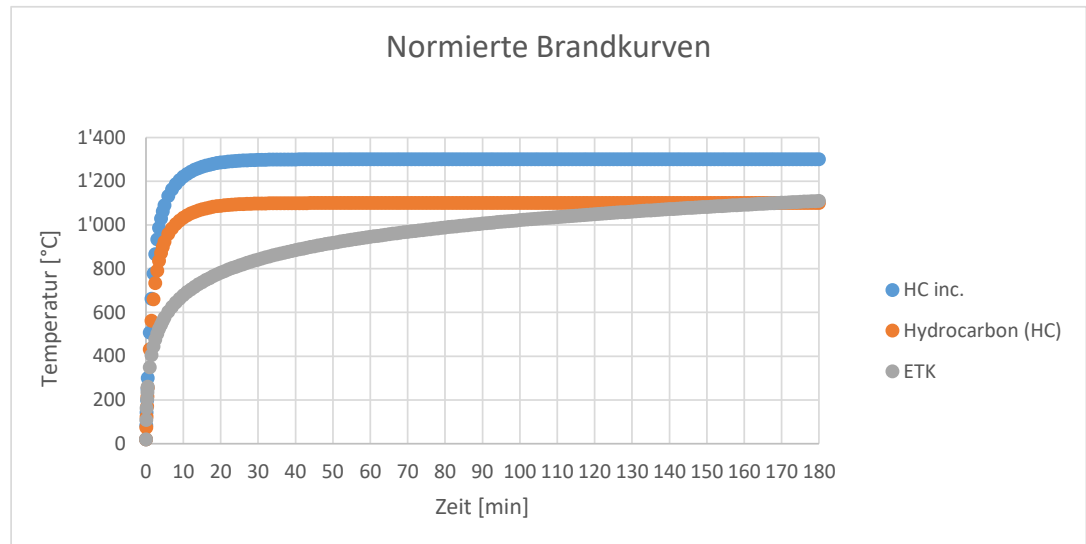
Das nach Realisierung von Objektschutzmassnahmen verbleibende Risiko kann anhand von objektbezogenen Letalitätsbetrachtungen unter Berücksichtigung dieser Massnahmen wie Fassadenverstärkung, Optimierung der Fluchtwege etc. bestimmt werden. Dazu eignet sich eine Risikobetrachtung mithilfe eines genügend detaillierten Fehler- und Ereignisbaums, z.B. des vorgeschlagenen Fehler- und Ereignisbaums für Brandszenarien von einem Gebäude mit Aufenthalt von grösseren Personengruppen.

Anhang

- A Brandkurven
- B Störfallszenarien
- C Transmission Normalglas und EI60 Brandschutzglas
- D Testdesign
- E Grundlagen und Literatur

A Brandkurven

Abb. 28 Übersicht normierte Brandkurven für verschiedene Brandereignisse



Brandkurven für Kohlenwasserstoffe (Hydrocarbon, HC) weisen höhere Temperaturen im betrachteten Zeitverlauf auf als die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK). Analoge Betrachtungen im Tunnelbau zeigen, dass unter Berücksichtigung von erhöhtem Brandlasten, wie sie beim Brand von Tankwagen entstehen können (HC inc.), im betrachteten Zeitraum deutlich höhere Temperaturen erreicht werden (Grundsätzliche Überlegung zur Brandprüfung von Tunnelbetonbauteilen, F. Dehn, S. Hauswald, M. Juknat, Beton und Stahlbetonbau 104, 2009).

B Störfallszenarien

B 1. Länger andauernde Brandszenarien ohne ausgeprägte Druckwelle

- Lachenbrand, Bassinbrand
- Fackelbrand

B 1.1 Gefahrguttransport (Benzin) auf der Bahn

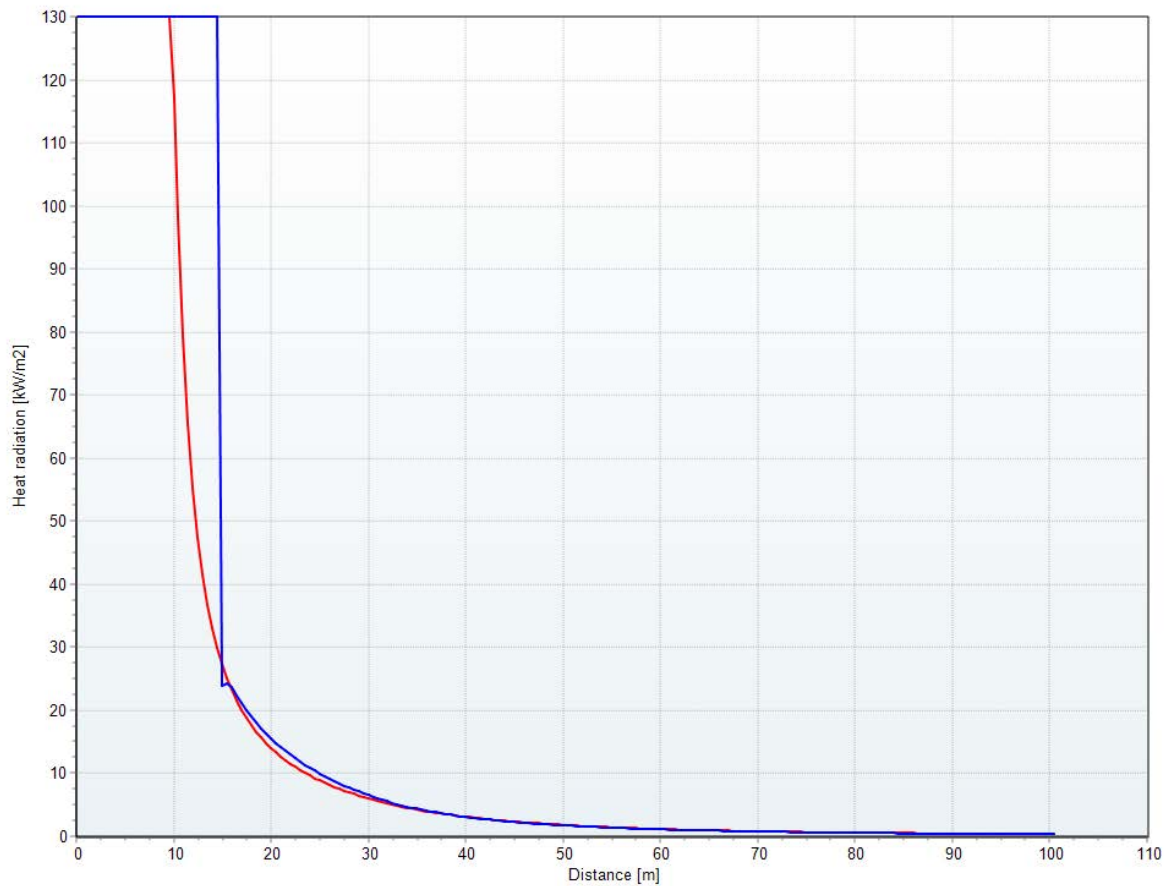
Als repräsentativer "worst case"-Störfall für Gefahrguttransporte auf der Bahn wird ein Lachenbrand von ca. 200 m² angenommen (Kesselwagen mit ca. 60 t Benzin, Quelle: EBP, 13.1.2009)

Die Hitzestrahlung in Abhängigkeit von der Distanz wurde mit TNO Effects berechnet. TNO Effects stellt dafür zwei verschiedene Modelle zur Verfügung: Das HSE Zweizonenmodell von Rew & Hulbert und das Yellow Book Lachenbrandmodell. Das HSE Zweizonenmodell scheint dem Yellow Book Lachenbrandmodell überlegen zu sein und wird deshalb zur Verwendung empfohlen.

An der zweiten Sitzung der Begleitgruppe wurde deshalb beschlossen, in der Methodik für die Berechnung des objektbezogenen Risikos durch Lachenbrände das HSE Zweizonenmodell zu verwenden.

B 1.1.1. TNO Effects HSE Zweizonenmodell von Rew & Hulbert

Abb. 29 Hitzestrahlung in verschiedener Höhe über Boden in Abhängigkeit der Distanz zu einem Lachenbrand von 200 m² Grösse (Gefahrguttransporte auf der Bahn: Kesselwagen mit 60 t Benzin)
(Berechnung BAFU mit TNO Effects 10.1)



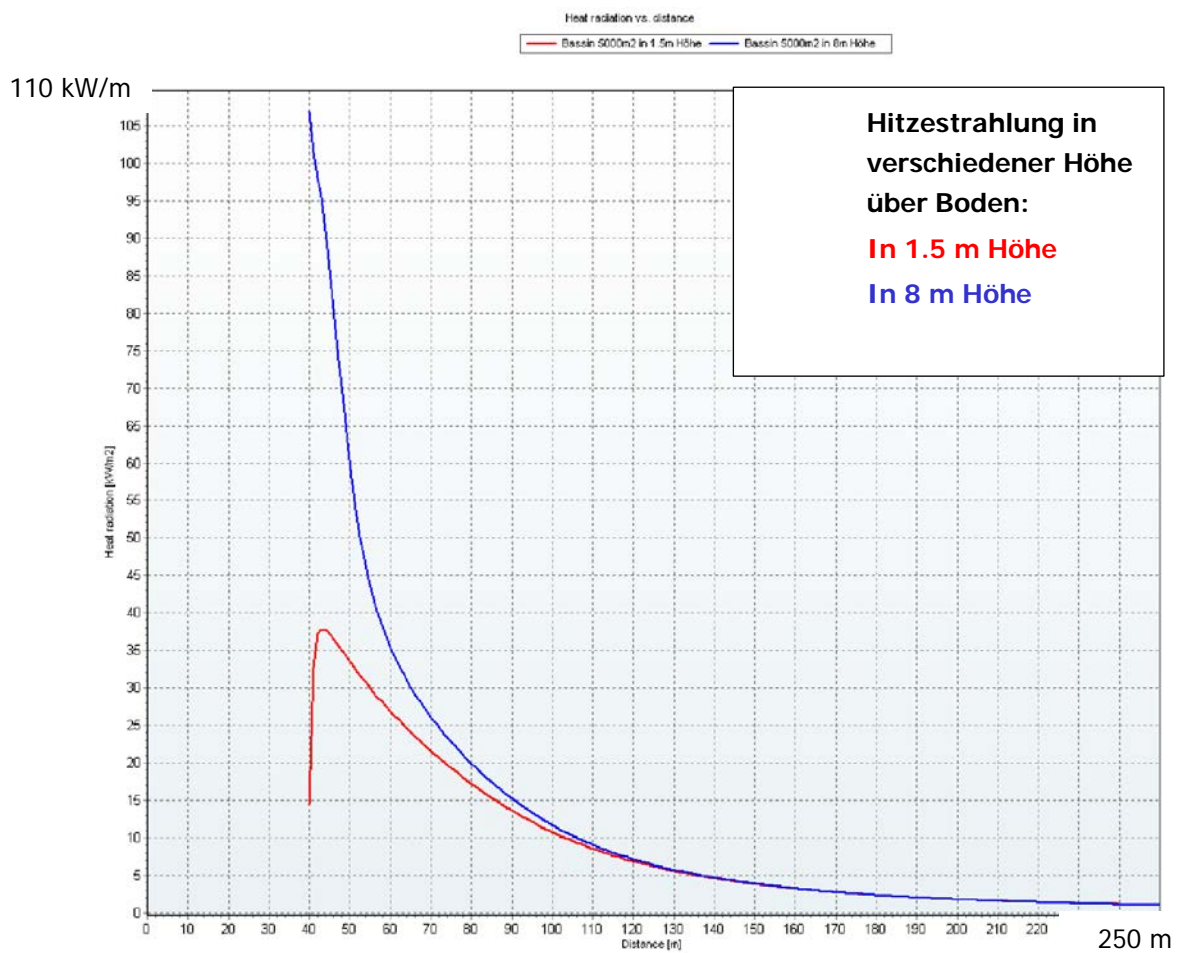
- Rote Kurve: Hitzestrahlung in 1.5 m Höhe über Boden
- Blaue Kurve: Hitzestrahlung in 8 m Höhe über Boden
- Reichweite Flamme in Windrichtung (Distanz Flammenkontakt):
max. 21 m ab Lachenmittelpunkt gemäss Outputparameter "Flame footprint dimensions"

Results	Pool fire	Pool fire
Equivalent diameter poolfire (m)	15.958	15.958
Max Diameter top flame (length ellipse) (m)	18.586	18.586
Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW	21,-8,6,16	21,-8,6,16
Calculated pool surface area (m2)	200	200
Combustion rate (kg/s)	13.4	13.4
Duration of the pool fire (s)	4477.6	4477.6
Surface emissive power flame (kW/m2)		
Surface emissive power (clear flame) (kW/m2)	130	130
Surface emissive power (sooted flame) (kW/m2)	22.2	22.2
Flame tilt (deg)	29.33	29.33
Flame temperature (°C)	958.27	958.27
Length of the flame (m)	24.342	24.342
Height of clear fraction Flame (m)	3.1896	3.1896
Weight ratio of HCL/chemical (%)	0	0
Weight ratio of NO2/chemical (%)	0	0
Weight ratio of SO2/chemical (%)	0	0
Weight ratio of CO2/chemical (%)	326.07	326.07
Weight ratio of H2O/chemical (%)	98.74	98.74
Heat radiation at Xd (kW/m2)	0.34155	0.32814
Atmospheric Transmissivity at Xd (%)	70.975	70.962
Viewfactor at Xd (-)	0.014095	0.013624
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)	4.775	4.5267
Percentage first degree burns at Xd (%)	0	0
Percentage second degree burns at Xd (%)	0	0
Percentage third degree burns at Xd (%)	0	0
Distance to clothing burning dose (m)	13.69	14.946
Heat Radiation Contours distance [m]		
10 kW/m2 heat radiation contour	24	25
Lethality Contours distance [m]		
1,0% lethality contour (10 min exposure)	24	25
Parameters		
Inputs		
Chemical name	Raw Gasoline	Raw Gasoline
	Sample (Sample mixtures)	Sample (Sample mixtures)
Type of pool fire calculation	Two Zone model	Two Zone model
	Rew & Hulbert	Rew & Hulbert
Pool size determination	Confined	Confined
Total mass released (kg)	60000	60000
Mass flow rate of the source (kg/s)		
Duration of the release (s)		
Type of pool (poolfire)	Circular	Circular
Max. pool surface poolfire (m2)	200	200
Diameter of the rim (m)		
Width of rim (m)		
Width of rectangle (m)		
Length of rectangle (m)		
Rotation rectangle (North = 0 degrees) (deg)		
Height of the receiver (m)	1.5	8
Height of the confined pool above ground level (m)	0	0
Temperature of the pool (°C)	15	15
Fraction combustion heat radiated (-)	0.35	0.35
Soot Fraction	Calculate/Default	Calculate/Default
Fraction of the flame covered by soot (-)	0.8	0.8
Wind speed at 10 m height (m/s)	2	2
Ambient temperature (°C)	15	15
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151
Ambient relative humidity (%)	70	70
Amount of CO2 in atmosphere (-)	0.0003	0.0003
Reporting distance (Xd) (m)	100	100
Maximum heat exposure duration (s)	20	20
Predefined wind direction	User defined	User defined
Wind comes from (North = 0 degrees) (deg)	0	0
Accuracy	Low	Low
Take protective effects of clothing into account	No	No
Correction lethality protection clothing (-)		
Heat radiation lethal damage Probit A ((sec*(W/m2)^n))	-36.38	-36.38
Heat radiation lethal damage Probit B	2.56	2.56
Heat radiation damage Probit N	1.3333	1.3333

B 1.1.2. Bassinbrand

(TNO Effects Yellow Book Lachenbrandmodell)

Abb. 30 Hitzestrahlung in verschiedener Höhe über Boden in Abhängigkeit der Distanz zu einem Bassinbrand von 5'000 m² Grösse



Effects case report

Seite 1 von 1

Case description: Bassin 5000m2 in 1.5m Höhe

Model: Pool fire

version: 5.14 (23.06.2015)

Reference: Yellow Book (CPR-14E), 3rd edition 1997, Paragraph 6.5.4

compared to: Bassin 5000m2 in 8m Höhe

Parameters

Inputs

	Bassin 5000m2 in 1.5m Höhe	Bassin 5000m2 in 8m Höhe
Chemical name	GASOLINE (YAWS)	GASOLINE (YAWS)
Pool size determination	Confined	Confined
Total mass released (kg)	9.25E06	9.25E06
Mass flow rate of the source (kg/s)		
Duration of the release (s)		
Pool surface poolfire (m2)	5000	5000
Height of the receiver (m)	1.5	8
Height of the confined pool above ground level (m)	2.5	2.5
Temperature of the pool (°C)	15	15
Pool burning rate	Calculate/Default	Calculate/Default
Value of pool burning rate (kg/m2*s)		
Fraction combustion heat radiated (-)	0.35	0.35
Soot Fraction	Calculate/Default	Calculate/Default
Value of soot fraction (-)		
Wind speed at 10 m height (m/s)	2	2
Ambient temperature (°C)	15	15
Ambient relative humidity (%)	70	70
Amount of CO2 in atmosphere (-)	0.0003	0.0003
Distance from centre of the pool (Xd) (m)	250	250
Maximum heat exposure duration (s)	20	20
X-coordinate of release (m)	0	0
Y-coordinate of release (m)	0	0
Predefined wind direction	User defined	User defined
Wind comes from (North = 0 degrees) (deg)	0	0
Calculate contours for	Lethal burns	Lethal burns
Heat radiation level (lowest) for first contour plot (kW/m2)		
Heat radiation level for second contour plot (kW/m2)		
Heat radiation level (highest) for third contour plot (kW/m2)		
Take protective effects of clothing into account	No	No
Correction lethality protection clothing (-)		
Percentage of mortality for contour calculations (%)	1	1
Heat radiation damage Probit A ((sec*(W/m2)^n))	-36.38	-36.38
Heat radiation damage Probit B	2.56	2.56
Heat radiation damage Probit N	1.3333	1.3333

Results

	Bassin 5000m2 in 1.5m Höhe	Bassin 5000m2 in 8m Höhe
Max Diameter of the Pool Fire (m)	79.788	79.788
Heat radiation at X (kW/m2)	1.0093	1.0046
1% First degree burns distance (m)		
1% Second degree burns distance (m)		
1% Third degree (Lethal) burns distance (m)	103.82	106.71
Combustion rate (kg/s)	275	275
Duration of the pool fire (s)	33636	33636
Heat emission from fire surface (kW/m2)	59.876	59.876
Flame tilt (deg)	32.937	32.937
View factor (-)	0.028274	0.028143
Atmospheric transmissivity (%)	59.619	59.619
Flame temperature (°C)	742.2	742.2
Length of the flame (m)	58.817	58.817
Calculated pool surface area (m2)	5000	5000
Weight ratio of HCL/chemical (%)	0	0
Weight ratio of NO2/chemical (%)	0	0
Weight ratio of SO2/chemical (%)	0	0
Weight ratio of CO2/chemical (%)	366.58	366.58
Weight ratio of H2O/chemical (%)	0	0

Other information

Main program	Effects 9.0.23.9724
Chemical database	YAWS database
Chemical source	Purple book database
Chemical source date	22.07.1999

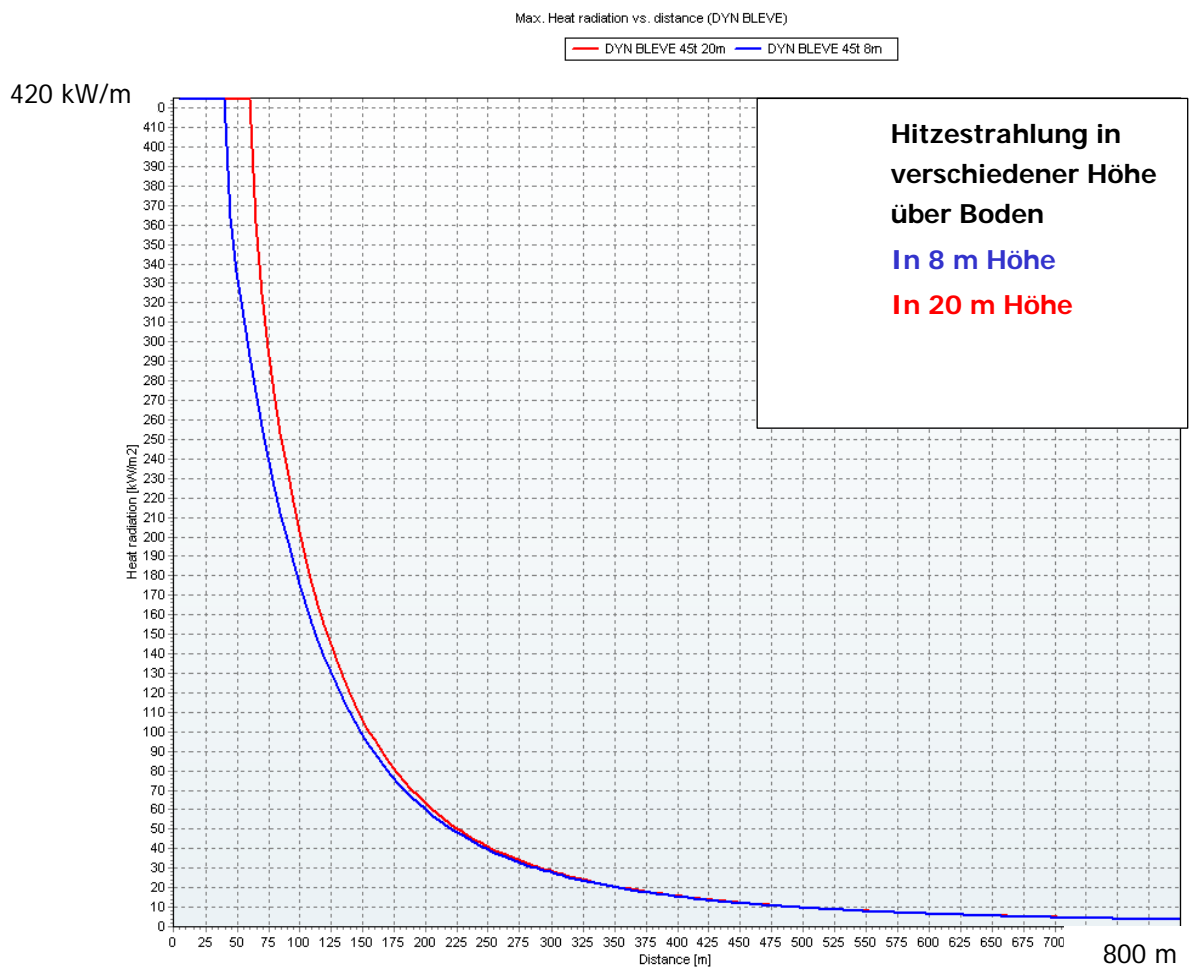
Effects report created by SPIZH-DTHdth at 23.06.2015 14:50:24

B 2. BLEVE (LPG)

Flüssiggas (LPG) wird sowohl in stationären Betrieben gelagert und verbraucht als auch auf dem Strassen- und Schienennetz transportiert.

B 2.1 BLEVE bei Gefahrguttransporten

Abb. 31 Hitzestahlung in verschiedener Höhe über Boden in Abhängigkeit der Distanz zu einem BLEVE mit 45 t Propan



Effects case report

Seite 1 von 1

Case description: DYN BLEVE 45t 20m

Model: BLEVE (Static or Dynamic model)

version: 9.1.0.0 (29.04.2015)

Reference: Static BLEVE: Yellow Book (CPR-14E), 3rd edition 1997, Paragraph 6.5.7 Dynamic BLEVE: W.E. Martinsen and J.D. Marx, An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs, In: proceedings of the international conference and workshop on modelling the consequences of accidental releases of hazardous materials, sept. 28 - oct. 1 1999, San Francisco, California p.p. 605-621.

compared to: DYN BLEVE 45t 8m

Parameters

Inputs	DYN BLEVE 45t 20m	DYN BLEVE 45t 8m
Chemical name	PROPANE (YAWS)	PROPANE (YAWS)
Type of BLEVE calculation	Dynamic BLEVE model	Dynamic BLEVE model
Total mass in vessel (kg)	45000	45000
Initial temperature in vessel (°C)	15	15
Burst pressure of the vessel (bar)	25	25
Ambient temperature (°C)	15	15
Ambient relative humidity (%)	70	70
Amount of CO2 in atmosphere (-)		
Distance from centre of vessel (Xd) (m)	1000	1000
Maximum heat exposure duration (s)	20	20
X-coordinate of release (m)	0	0
Y-coordinate of release (m)	0	0
Height of the receiver (m)	20	8
Calculate contours for	Lethal burns	Lethal burns
Heat radiation level (lowest) for first contour plot (kW/m2)		
Heat radiation level for second contour plot (kW/m2)		
Heat radiation level (highest) for third contour plot (kW/m2)		
Take protective effects of clothing into account	No	No
Correction lethality protection clothing (-)		
Percentage of mortality for contour calculations (%)	1	1
Heat radiation damage Probit A ((sec*(W/m2)^n)	-36.38	-36.38
Heat radiation damage Probit B	2.56	2.56
Heat radiation damage Probit N	1.3333	1.3333

Results

Results	DYN BLEVE 45t 20m	DYN BLEVE 45t 8m
Duration of the Fire Ball (s)	13.108	13.108
Max Diameter of the Fire Ball (m)	206.3	206.3
Max Height of the Fire Ball (m)	309.45	309.45
Surface emissive power (max) (kW/m2)	400	400
1% First degree burns distance (m)		
1% Second degree burns distance (m)		
1% Third degree (Lethal) burns distance (m)	313.14	308.97
(Max) heat radiation level at Xd (kW/m2)	2.1779	2.1728
(Max) Viewfactor at Xd (-)	0.010567	0.010544
Atmospheric transmissivity at Xd (%)	51.527	51.516
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)	16.854	16.784
Percentage first degree burns at Xd (%)		
Percentage second degree burns at Xd (%)		
Percentage third degree burns at Xd (%)	0	0
Flame temperature (°C)		

Other information

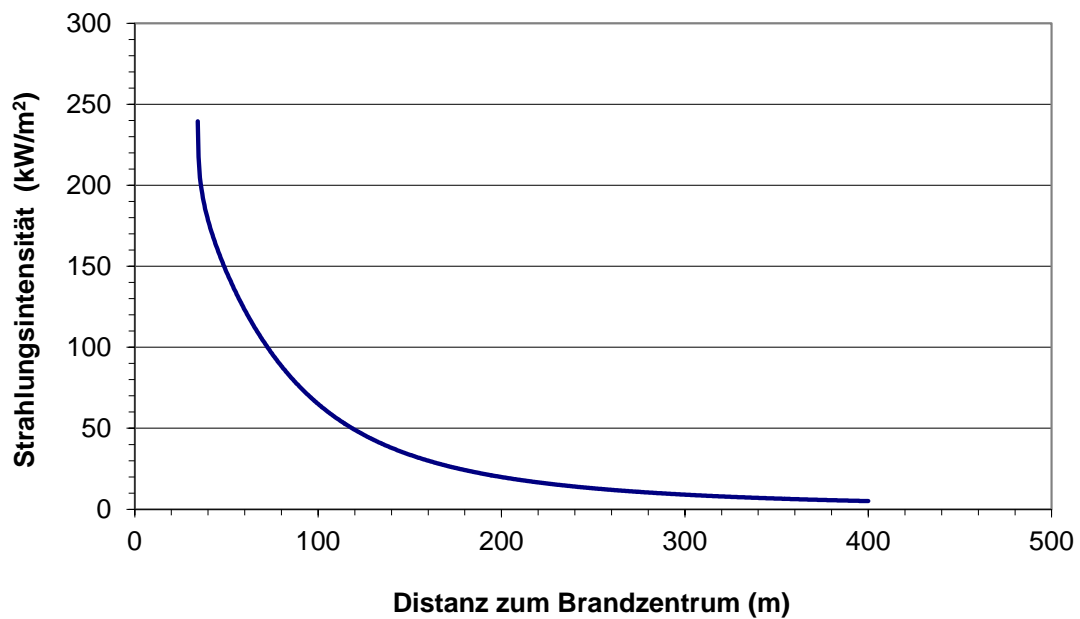
Main program	Effects 9.0.23.9724
Chemical database	YAWS database
Chemical source	Purple book database
Chemical source date	22.07.1999

Effects report created by SPIAG_DTH0914\Suisseplan at 29.04.2015 17:10:25

B 3. Feuerball

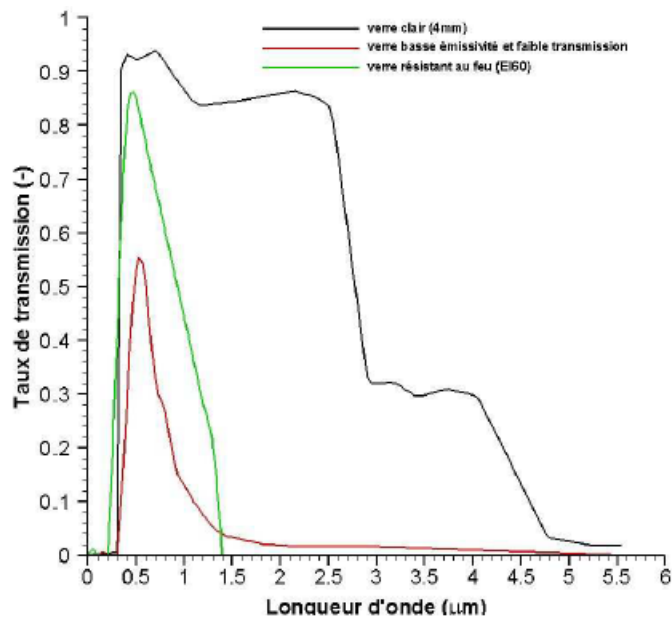
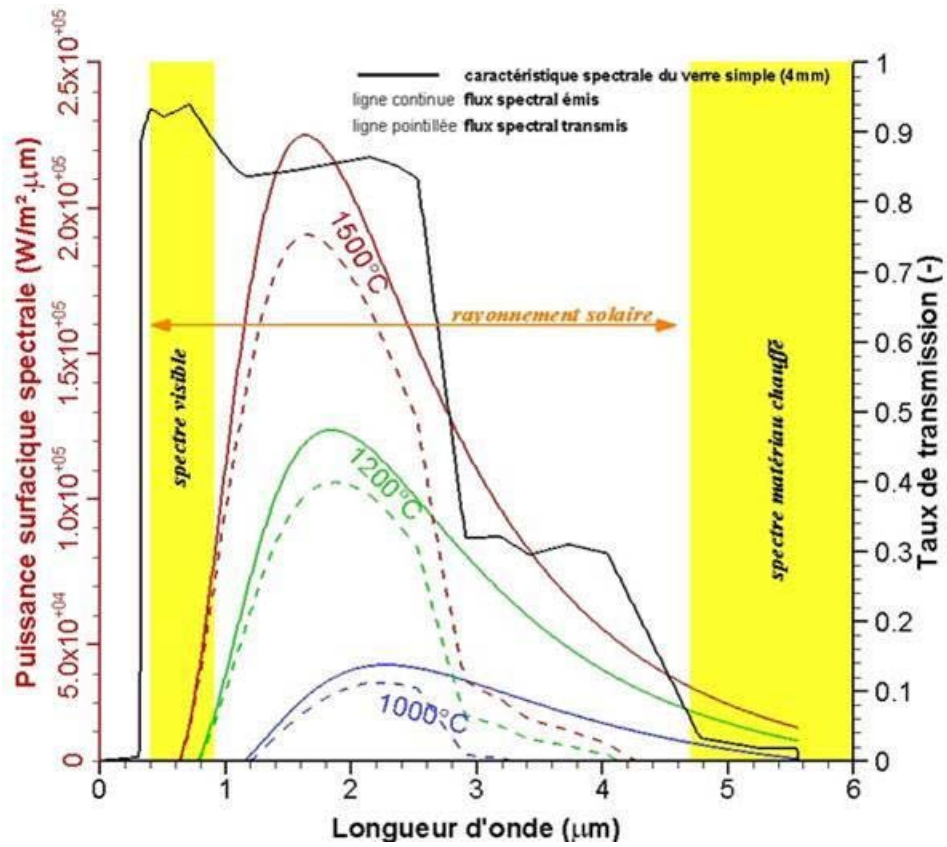
Der Feuerball, welcher bei sofortiger Zündung eines Gasaustrittes nach dem Totalversagen einer Erdgashochdruckleitung auftritt, verursacht gemäss Rahmenbericht 2010 mit zugehörigen Erläuterung "Letalitäten bei Brandszenarien" folgende Hitzestrahlung in der Umgebung:

Abb. 32 Hitzestrahlung des Feuerballs infolge eines Totalversagens einer 16"/70 bar Erdgashochdruckleitung in 8 m Höhe über Boden in Abhängigkeit der Distanz gemäss Erläuterung



C Transmission Normalglas und EI60 Brandschutzglas

Quelle: Laboratoire Efectis, France (erhalten per Mail BAFU 2018-10-29)



D Testdesign

D 1. Vetrotech



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Gefahrenprävention

Arbeitsgruppe Objektschutz & Vetrotech, 05. Juli 2018

Testdesign: Maximalbelastungstest an Brandschutzfenstern

Forschungsprojekt Objektschutz - Grundlagen zum Bauen neben Störfallanlagen

Referenz/Aktenzeichen: N425-1623

1 Einleitung zum laufenden Forschungsprojekt	2
1.1 Fehlende Grundlagen zur Quantifizierung der Wirksamkeit und Verhältnismässigkeit von Brandschutzfenstern	2
1.2 Referenzierte Dokumente	2
2 Ziele und Vorgehen.....	3
2.1 Besprechung Testdesign vom 31. Mai 2018	3
2.2 Festlegen Testdesign zur Bestimmung der Wärmestromdichte	4
2.3 Transmissionsverhalten von Brandschutzgläsern	4
3 Termine.....	4
Anhang I - Datenblatt Heat-Flux-Transducer	5
Anhang II - Aufbau Ofen-Thermoelemente	10

Referenz/Aktenzeichen: N425-1623

1 Einleitung zum laufenden Forschungsprojekt

In den Agglomerationsgebieten nimmt der Siedlungsdruck neben den der StfV [1] unterstellten Anlagen (vor allem entlang von Bahnstrecken und Erdgashochdruckleitungen), aufgrund baulicher Aktivitäten und der Verdichtung, markant zu. Heute fehlen sowohl den Störfallvollzugsbehörden, als auch den Raumplanungs- und Baubehörden und den Projektanden von Bauten im Einwirkungsbereich von Störfallanlagen (Wohnen, Gewerbe und Industrie) die Grundlagen für die Beurteilung der Notwendigkeit und Auslegung von Objektschutzmassnahmen.

Um sowohl den Vollzugsbehörden der StfV, wie auch den Raumplanungs- und Baubehörden und den zuständigen Projektplanern die notwendigen Instrumente für die Ausarbeitung von optimierten Planungs- und Bauprojekten zur Verfügung zu stellen, sollen die vorhandenen Erkenntnisse betreffend Objektschutzmassnahmen vertieft werden. Zum Thema Objektschutz wurde im Jahr 2015 eine Studie im Auftrag des BAFU [2] erstellt. Mit der aktuellen Arbeit werden folgende Kernfragen zu klären sein:

- 1) Es ist aufzuzeigen, dass die Annahme sinnvoll ist, als „Lastannahmen“ auf Brandszenarien (Lachenbrand, Fackelbrand und BLEVE), ausgehend von Bahnanlagen, Strassen, Erdgasleitungen und ausgewählten Betrieben (Tanklager und Propangastanks) abzustützen.
- 2) Es ist aufzuzeigen, welche Schutzmassnahmen (Nutzungseinschränkung, bauliche, technische Massnahme) bei welchen Bauobjekten und in welchen Abständen von den der StfV unterstellten Anlagen wirksam, und verhältnismässig sind.
- 3) Es sind Kriterien aufzuzeigen welche sich eignen, um die Verhältnismässigkeit von Schutzmassnahmen zu beurteilen (Objektbezogenes Risiko, Kosten).

Die Arbeit wird durch die Suisseplan Ingenieure AG ausgeführt und durch eine Arbeitsgruppe bestehend aus Vertretern kantonaler Vollzugsbehörden der StfV (BS, BL, GE und ZH), der CARBURA, den Ports of Switzerland, der SBB, dem SIA, der Swissgas und der VKF begleitet.

1.1 Fehlende Grundlagen zur Quantifizierung der Wirksamkeit und Verhältnismässigkeit von Brandschutzfenstern

Fenster sind in der Gebäudestruktur meist als Schwachpunkt bezüglich den zu erwartenden Einwirkungen durch einen Störfall (wie Wärmestrahlung und Druck) zu betrachten. Durch eine „Härtung“ des Gebäudes durch Brandschutzfenster, kann die Schutzwirkung eines Gebäudes (gegenüber Wärmestrahlung aber auch Druckbeaufschlagung) für die Personen im Innern erhöht werden. Bis dato wird davon ausgegangen, dass Standardfenster bei einfallenden Wärmestromdichten grösser 35 kW/m^2 rasch versagen. Zudem wird davon ausgegangen, dass Standardfenster auch bei Wärmestromdichten $< 35 \text{ kW/m}^2$ nur einen geringen Schutz bieten, da ein Grossteil der auftreffenden Strahlungsleistung durch die exponierten Standardfenster durchtritt und zu einer raschen Erwärmung der dahinterliegenden Räumen mit Entstehung von Sekundärbränden führt. Für die Modellierung der Schutzwirkung von Brandschutzfenstern müssen verlässliche Daten bezüglich deren maximalen thermischen Belastbarkeit sowie bezüglich deren Transmissionsverhalten (vor und nach Aktivierung von allenfalls vorhandenen TTS) vorliegen. Solche fehlen aber im Moment und sollen nun durch Praxisversuche mit repräsentativen Brandschutzprodukten ermittelt werden.

1.2 Referenzierte Dokumente

- [1] Verordnung über den Schutz vor Störfällen (StfV), SR 814.012, 1. Juni 2015;
- [2] Studie zur Bewertung von Schutzmassnahmen ausserhalb der Quelle zur Reduktion von Störfallrisiken, suisseplan i.A. des BAFU, 10. Dezember 2015;

Referenz/Aktenzeichen: N425-1623

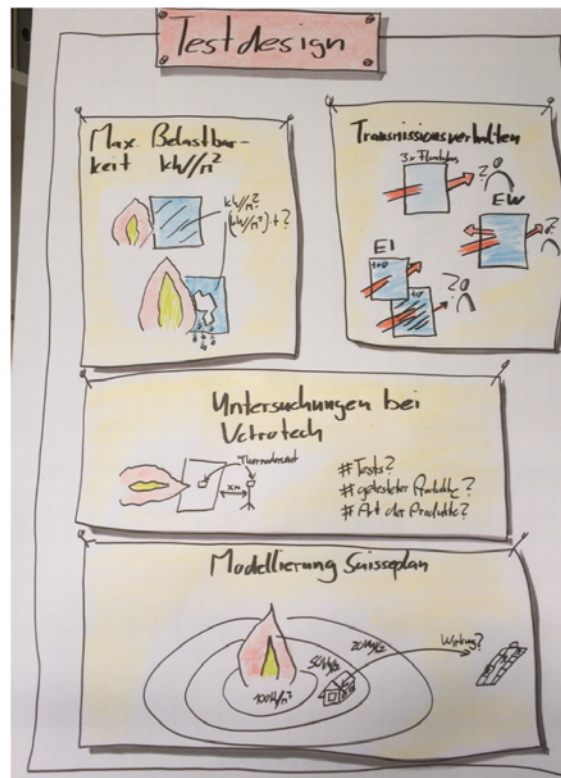
2 Ziele und Vorgehen

Durch Versuche an repräsentativen Brandschutzprodukten in einem modifizierten Prüfofen sollen die fehlenden Grundlagen zur Modellierung der Schutzwirkung von Brandschutzfenstern bestimmt werden. Es sind dies:

- **Wärmestromdichte in kW/m^2** welcher ein zertifiziertes Brandschutzprodukt gemäss Norm standhält, d.h. strukturell intakt bleibt und einen Raumabschluss bildet (inkl. Zeit bis zum Versagen)
- **Maximale Wärmestromdichte in kW/m^2** welcher ein zertifiziertes Brandschutzprodukt standhält, d.h. strukturell intakt bleibt und einen Raumabschluss bildet (inkl. Zeit bis zum Versagen). Auf Basis eines Worst-Case Versuchs z.B. gemäss Parametern der SFPE¹.
- **Transmissionsverhalten** eines für den schweizerischen Markt repräsentativen Brandschutzprodukts (vor und nach Aktivierung von allenfalls vorhandenen TTS) gegenüber dem durch einen Kohlenwasserstoffbrand emittierten Strahlungsspektrum.

2.1 Besprechung Testdesign vom 31. Mai 2018

Untenstehende Skizze diente für die gemeinsame Sitzung zwischen Vetrotech und der AG Objektschutzmassnahmen als Diskussionsgrundlage (Ablauf und Sitzungsziele siehe [Traktandenliste](#)).



¹ SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineers 2016

Referenz/Aktenzeichen: N425-1623

2.2 Festlegen Testdesign zur Bestimmung der Wärmestromdichte

Auf Basis der Besprechung vom 31. Mai 2018 sowie einem Telefonat zwischen Herrn Fischer und Herrn Hösli vom 5. Juli 20018 wurden folgende Beschlüsse gefasst:

- Für die Bestimmung der totalen Wärmestromdichte in kW/m^2 , welcher ein zertifiziertes Brandschutzprodukt gemäss Norm standhält, wird folgende Prüfung durchgeführt; Der Brandraum des Ofens wird mit einem Mauerwerk verschlossen und auf der Ofen-Innenseite ein Heat-Flux-Transducer (siehe Anhang I) sowie ein Temperaturmessfühler befestigt (jeweils gegen das Mauerwerk abisoliert). Beim Thermoelement handelt es sich um ein Element Typ K (siehe Anhang II), welches in der Nähe des Heat-Flux-Transducers eingebaut wird. Der Heat-Flux-Transducer wird wassergekühlt, er kann den Gesamtwärmestrom² (Konvektiv und Strahlung) bis 500 kW/m^2 aufnehmen. Dieser wird über den gesamten Testverlauf aufgezeichnet. Als Prüfbedingungen wird die Einheitstemperaturkurve und falls möglich auch die Hydrocarbonkurve abgefahren.
- Falls die Bestimmung der Wärmestromdichte gemäss Einheitstemperaturkurve und Hydrocarbonkurve erfolgreich verläuft, werden ggf. weitere Versuch mit Brandschutzgläsern (EI und/oder EW), sowie Standard Floatglas durchgeführt. Bei diesen Versuchen sollen worst-case Parameter, z.B. gemäss SFPE, als Prüfparameter gewählt werden. So kann die maximale Wärmestromdichte in kW/m^2 bestimmt werden, welche zu einem Versagen der Glasstruktur führt.

2.3 Transmissionsverhalten von Brandschutzgläsern

Seitens Vetrotech werden der Arbeitsgruppe repräsentative Transmissionspektren für Gläser zur Verfügung gestellt. Die Art und Weise des Datenaustausches muss noch besprochen werden (Suisseplan, Vetrotech, BAFU).

3 Termine

Sitzung zur Diskussion des Testdesigns:	31. Mai 2018
Durchführung der Tests im Labor ³ :	Bis Ende August 2018
Durchführung der Modellierungen durch Suisseplan:	Bis 11. September 2018
3. Sitzung der Arbeitsgruppe:	Ab Mitte September 2018
Kontaktgremium der Störfallfachstellen:	Freitag 9. November 2018

² Mit dem Heat-Flux-Transducer kann grundsätzlich zwischen Gesamtwärmestrom und Strahlungsanteil unterschieden werden. Die Messungen können aber nur seriell durchgeführt werden. Die Messzelle von Vetrotech ist im Moment aber nur zur Bestimmung des Gesamtwärmestroms ausgerüstet. Zur Messung der Strahlung müsste ein spezieller Filter eingebaut werden. Die Kosten dafür werden durch Herrn Fischer in KW27 erfragt. Falls zeitlich und preislich machbar, wird der Filter noch beschafft werden.

³ Vetrotech erarbeitet einen Zeitplan für die Durchführung der Tests (Ziel August 2018) aus und legt die definitiven Testspezifikationen fest. Mitglieder der AG können bei der Durchführung der Tests im Labor teilnehmen. Mögliche Daten zur Durchführung der Tests werden im Juli durch Vetrotech mitgeteilt. Die Tests werden im Labor von Vetrotech in Aachen durchgeführt.

D 2. Glas Trösch



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Gefahrenprävention

Arbeitsgruppe Objektschutz und Glas Trösch, 05. Juli 2018

Testdesign: Maximalbelastungstest an Brandschutzfenstern

Forschungsprojekt Objektschutz - Grundlagen zum Bauen neben Störfallanlagen

Referenz/Aktenzeichen: N425-1623

1	Einleitung zum laufenden Forschungsprojekt	2
1.1	Fehlende Grundlagen zur Quantifizierung der Wirksamkeit und Verhältnismässigkeit von Brandschutzfenstern	2
1.2	Referenzierte Dokumente	2
2	Ziele und Vorgehen	3
3	Termine	4
4	Kostenaufteilung	4
	Anhang - Kosten Versuch Glas Trösch	5

Referenz/Aktenzeichen: N425-1623

1 Einleitung zum laufenden Forschungsprojekt

In den Agglomerationsgebieten nimmt der Siedlungsdruck neben den der StfV [1] unterstellten Anlagen (vor allem entlang von Bahnstrecken und Erdgashochdruckleitungen), aufgrund baulicher Aktivitäten und der Verdichtung, markant zu. Heute fehlen sowohl den Störfallvollzugsbehörden, als auch den Raumplanungs- und Baubehörden und den Projektanten von Bauten im Einwirkungsbereich von Störfallanlagen (Wohnen, Gewerbe und Industrie) die Grundlagen für die Beurteilung der Notwendigkeit und Auslegung von Objektschutzmassnahmen.

Um sowohl den Vollzugsbehörden der StfV, wie auch den Raumplanungs- und Baubehörden und den zuständigen Projektplanern die notwendigen Instrumente für die Ausarbeitung von optimierten Planungs- und Bauprojekten zur Verfügung zu stellen, sollen die vorhandenen Erkenntnisse betreffend Objektschutzmassnahmen vertieft werden. Zum Thema Objektschutz wurde im Jahr 2015 eine Studie im Auftrag des BAFU [2] erstellt. Mit der aktuellen Arbeit werden folgende Kernfragen zu klären sein:

- 1) Es ist aufzuzeigen, dass die Annahme sinnvoll ist, als „Lastannahmen“ auf Brandszenarien (Lachenbrand, Fackelbrand und BLEVE), ausgehend von Bahnanlagen, Strassen, Erdgasleitungen und ausgewählten Betrieben (Tanklager und Propangastanks) abzustützen.
- 2) Es ist aufzuzeigen, welche Schutzmassnahmen (Nutzungseinschränkung, bauliche, technische Massnahme) bei welchen Bauobjekten und in welchen Abständen von den der StfV unterstellten Anlagen wirksam, und verhältnismässig sind.
- 3) Es sind Kriterien aufzuzeigen welche sich eignen, um die Verhältnismässigkeit von Schutzmassnahmen zu beurteilen (Objektbezogenes Risiko, Kosten).

Die Arbeit wird durch die Suisseplan Ingenieure AG ausgeführt und durch eine Arbeitsgruppe bestehend aus Vertretern kantonaler Vollzugsbehörden der StfV (BS, BL, GE und ZH), der CARBURA, den Ports of Switzerland, der SBB, dem SIA, der Swissgas und der VKF begleitet.

1.1 Fehlende Grundlagen zur Quantifizierung der Wirksamkeit und Verhältnismässigkeit von Brandschutzfenstern

Fenster sind in der Gebäudestruktur meist als Schwachpunkt bezüglich den zu erwartenden Einwirkungen durch einen Störfall (wie Wärmestrahlung und Druck) zu betrachten. Durch eine „Härtung“ des Gebäudes durch Brandschutzfenster, kann die Schutzwirkung eines Gebäudes (gegenüber Wärmestrahlung aber auch Druckbeaufschlagung) für die Personen im Innern erhöht werden. Bis dato wird davon ausgegangen, dass Standardfenster bei einfallenden Wärmestromdichten grösser 35 kW/m^2 rasch versagen. Zudem wird davon ausgegangen, dass Standardfenster auch bei Wärmestromdichten $< 35 \text{ kW/m}^2$ nur einen geringen Schutz bieten, da ein Grossteil der auftreffenden Strahlungsleistung durch die exponierten Standardfenster durchtritt und zu einer raschen Erwärmung der dahinterliegenden Räumen mit Entstehung von Sekundärbränden führt. Für die Modellierung der Schutzwirkung von Brandschutzfenstern müssen verlässliche Daten bezüglich deren maximalen thermischen Belastbarkeit sowie bezüglich deren Transmissionsverhalten (vor und nach Aktivierung von allenfalls vorhandenen TTS) vorliegen. Solche fehlen aber im Moment und sollen nun durch Praxisversuche mit repräsentativen Brandschutzprodukten ermittelt werden.

1.2 Referenzierte Dokumente

- [1] Verordnung über den Schutz vor Störfällen (StfV), SR 814.012, 1. Juni 2015;
- [2] Studie zur Bewertung von Schutzmassnahmen ausserhalb der Quelle zur Reduktion von Störfallrisiken, suisseplan i.A. des BAFU, 10. Dezember 2015;

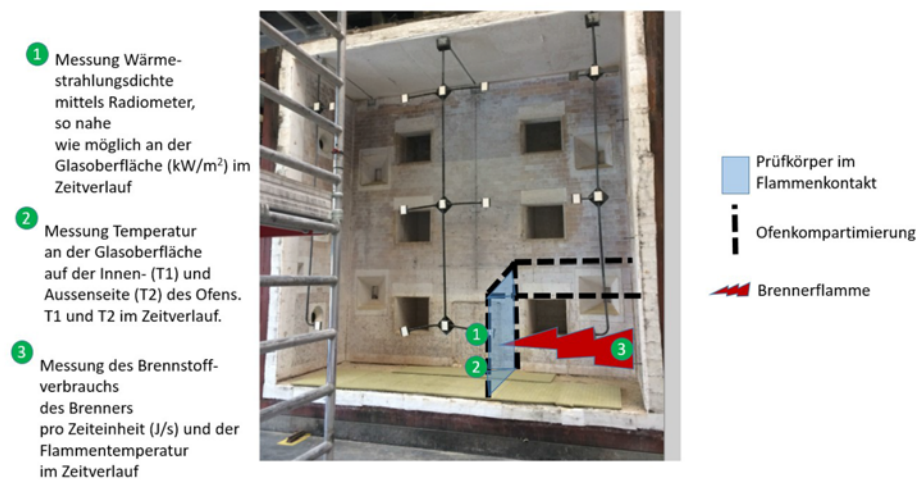
Referenz/Aktenzeichen: N425-1623

2 Ziele und Vorgehen

Die Ziele und das Vorgehen wurden anlässlich einer gemeinsamen Sitzung zwischen Glas Trösch und der AG Objektschutzmassnahmen in Buochs definiert (siehe [Traktandenliste](#)). Durch Versuche an einem repräsentativen Brandschutzprodukt EI30 und einem Dreifach-Isolierglas in einem modifizierten Prüfofen, sollen Grundlagen zur Modellierung der Schutzwirkung von Brandschutzfenstern bestimmt werden. Es sind dies:

- **Maximale Belastbarkeit eines EI30 Glases und eines Dreifach-Isolierglases (Zeit bis zum Verlust der strukturellen Integrität)** bei direkter Beflammung.
- **Transmissionsverhalten eines EI30 Glases und eines Dreifach-Isolierglases bei direkter Beflammung (kW/m²).**

Die folgende Skizze welche auf Basis der Erkenntnisse der Besprechung vom 12. Juni 2018 in Buochs sowie einem Telefongespräch zwischen Herrn Mathys und Herrn Hösli vom 5. Juli 2018 erstellt wurde, visualisiert den Prüfaufbau:



Der Ofen soll in ein Subkompartiment unterteilt werden. Der Prüfkörper wird direkt gegenüber dem Brenner (Abstand ca. 1.5 m) montiert und somit einer **direkten Beflammung** mit Flammenkontakt ausgesetzt. Während dem Versuch werden laufend die Messungen 1-3 gemäss Skizze ausgeführt.

Gegebenenfalls kann mittels den Temperaturmessungen (Messung 2) die bei diesem Test durch das Brandschutzprodukt aufgenommene Wärmeleistung grob abgeschätzt werden.

$$q = \frac{\Delta T_{\text{Glas Mittel}} \cdot c \cdot M_{\text{Glaskörper}}}{t_{\text{Prüfung}}}$$

q:	Durch Glaskörper aufgenommene Wärmeleistung / kJ/s
c:	Wärmekapazität Glaskörper / kJ/kg*K
M _{Glaskörper} :	Masse Glaskörper / kg
t _{Prüfung} :	Belastungszeit / s
ΔT _{Glas Mittel} :	Mittlere Temperaturdifferenz des Glaskörpers / K

Zur Bestimmung der Temperatur T1 und T2 werden Temperaturmessfühler Typ K befestigt. Ob die Messung auf der Innenseite des Ofens funktioniert ist fraglich. Zudem wird sich die Wärmekapazität des Glaskörpers eines EI-Glases während der Prüfung unbestimmt verändern. Auf jeden Fall kann über die Kenntnis der Temperaturdifferenz im Zeitverlauf ein Vergleich mit der Temperaturwechselbeständigkeit für die eingesetzten Prüfkörper vorgenommen werden.

Referenz/Aktenzeichen: N425-1623

Als Prüfbedingungen sollen worst-case Parameter gewählt werden. Um die entsprechend harschen Bedingungen zu erhalten, wird das Brandschutzprodukt mit dem Ölbrenner auf voller Leistung direkt beflammt werden.

E Grundlagen und Literatur

- "Studie zur Bewertung von Schutzmassnahmen ausserhalb der Quelle zur Reduktion von Störfallrisiken", suisseplan, 10.12.2015
- Planungshilfe Koordination Raumplanung und Störfallvorsorge, ARE, 1.10.2013
- Arbeitshilfe Raumplanung und Störfallverordnung, EBP, Nov. 2013
- Dokumentation Grundlagen Screening Personenrisiken Bahn 2011, EBP, Feb. 2013
- Caractérisation et réduction de la vulnérabilité du bâti face à un phénomène dangereux technologique thermique, Seiten 57, 58 und 74, Efectis France, 13 décembre 2006
- Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen, Rahmenbericht zur standardisierten Ausmassesinschätzung und Risikoermittlung, Schweizerische Erdgaswirtschaft und suisseplan Ingenieure AG, 1.12.2010, mit den zugehörigen Erläuterungen "Letalitäten bei Brandszenarien" und "Stationen"
- Rahmenbericht über die Sicherheit von Stehtankanlagen für flüssige Treib- und Brennstoffe, SKS Ingenieure AG (heute suissepan Ingenieure AG), 2005
- Wirkungen von Störfallszenarien bei der Bahn und bauliche Schutzmassnahmen an Gebäuden, EBP, 13.1.2009
- Anforderungen an hitzeresistente Fassaden zum Schutz von Personen in Gebäuden, Roos+Partner, 30.7.2014
- Bemessung von Baustrukturen in Stahl- und Verbundbauweise für Anprall- und Explosionslasten, bauforumstahl, 12.2010
- Bilo, Mike und Kinsman, Peter R.; Thermal radiation criteria used in pipeline risk assessment, Pipes&Pipelines International, 11-12 1997
- Wirksamkeit / Effizienz störfallbegrenzter Massnahmen im Hinblick auf die Ausbreitung gasförmiger Stoffe, TÜV Rheinland, 29.11.2010
- Bundesgesetz über Rohrleitungsanlagen zur Beförderung flüssiger und gasförmiger Brennstoffe und Treibstoffe (Rohrleitungsgesetz, RLG) vom 4. Oktober 1963, SR-Nr. 746.1
- Rohrleitungsverordnung (RLV) vom 2. Februar 2000, SR-Nr. 746.11
- Verordnung über Sicherheitsvorschriften für Rohrleitungsanlagen (RLSV) vom 4. April 2007, SR-Nr. 746.12
- Eidgenössisches Rohrleitungsinspektorat (ERI), 2003: ERI-Richtlinie zur "Planung, Bau und Betrieb von Rohrleitungen über 5 bar"
- Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung, StFV) vom 27. Februar 1991, SR-Nr. 814.012
- Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2008: Handbuch I zur Störfallverordnung (StFV). Vollzugshilfe für Betriebe mit Stoffen, Zubereitungen oder Sonderabfällen, Umwelt-Vollzug Nr. 0818

Bundesamt für Umwelt (BAFU, ehemals BUWAL), 1996: Beurteilungskriterien I zur Störfallverordnung, Reihe Vollzug Umwelt

Bundesamt für Umwelt (BAFU, ehemals BUWAL), 2001: Beurteilungskriterien II zur Störfallverordnung, Reihe Vollzug Umwelt

Schweizerische Erdgaswirtschaft und suisseplan Ingenieure AG, 2010: Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen, Rahmenbericht zur standardisierten Ausmasseneinschätzung und Risikoermittlung, 1.12.2010

Schweizerische Erdgaswirtschaft und suisseplan Ingenieure AG, Sicherheit von Erdgashochdruckleitungen, Screening Personenrisiken: Dokumentation der Methodik, 20. Juni 2014

Schweizerische Erdgaswirtschaft und suisseplan Ingenieure AG, Sicherheit von Erdgashochdruckleitungen, Screening Personenrisiken: Erläuterungen zur Dokumentation der Methodik, 20. Juni 2014

Schweizerische Erdgaswirtschaft, Störfallbetrachtungen zur Verlegung einer Erdgashochdruckleitung im Doppelrohrsystem und/oder zur Verlegung einer Erdgashochdruckleitung mit verschiedenen Überdeckungen (Tiefenlagen), Oktober 2016