TÜVRheinland®
Genau. Richtig.

Auftraggeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen

Fachliche
Ansprechpartner: Dr. Norbert Wiese
Dr. Rüdiger Gregel

TÜV-Auftrags-Nr.: 620 – 10483220/11

Wirksamkeit / Effizienz störfallbegrenzender Maßnahmen im Hinblick auf die Ausbreitung gasförmiger Stoffe

Abschlussbericht

Bearbeiter: Dr. rer. nat. Wolfgang Kaiser
Dipl. Ing. Silke Godager
Dipl.-Geogr. Edgar Neuhalfen
Dipl. Ing. Rainer Kornek
Dr. rer. nat. Manfred Schindler
Dipl.-Ing. Björn Thrun
Telefon: (030) 7562 -1726
E-Mail: Wolfgang.Kaiser@de.tuv.com
Unser Zeichen: TIS - KW

Revision: 0.1
Stand: 2010-11-29

Dieser Bericht enthält:
Seiten 1 bis 73 mit Deckblatt

Inhalt

1 Zusammenfassung ... 3

2 Auftrag ... 4

3 Konzeptionelles Herangehen ... 4

4 Dokumentationen zur Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen bei der Freisetzung gasförmiger Stoffe ... 7
4.1 Störfallbegrenzende Maßnahmen in Berichten über Störfälle ... 7
4.2 Auswertung von Angaben zur Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen in Sicherheitsberichten und Notfallplänen ... 9

5 Erfahrungen bei der Vorbereitung und Abwehr von freigesetzten gasförmigen Stoffen ... 10

6 Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen ... 14
6.1 Vorbemerkungen ... 14
6.2 Absorptions-/Verdünnungseffekte mit stationären und mobilen Wasserschleiern, Hydroschilden ... 15
6.3 Umsetzung gasförmiger Stoffe mit Wasser/Zusätzen im Wasserschleier ... 26
6.4 Verkürzung der Freisetzungsdauer von freigesetzten Gasen aus verdampfenden oder verdunstenden Flüssigkeiten ... 28

7 Diskussion von Vorschlägen zur Ermittlung der Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen ... 31
7.1 Ergebnisse der Recherchen ... 31
7.2 Vorschläge für die Anwendung von Aspekten der Störfallbegrenzung ... 32
7.3 Berechnung von Schutzflächen / Schutzabständen z. B. im Rahmen der Bauleitplanung ... 33
7.4 Vorschläge für weiterführende Untersuchungen ... 37

8 Verzeichnis der Literaturquellen ... 38

9 Anhänge ... 44
9.1 Anhang 1 Leistungsbeschreibung ... 44
9.2 Anhang 2 Zusammenstellung von Maßnahmen zur Störfallbegrenzung aus Datenbanken zu Störfällen ... 46
9.3 Anhang 3 Zusammenstellung von Maßnahmen der Störfallbegrenzung aus Sicherheitsberichten, internen und externen Notfallplänen ... 61
9.4 Anhang 4 Anwendung des Artikels 12 der Richtlinie 96/82/EG ... 70
9.5 Anhang 5 Abkürzungen und Begriffe ... 72

10 Danksagung ... 73

1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie „Wirksamkeit/Effizienz störfallbegrenzender Maßnahmen im Hinblick auf die Ausbreitung gasförmiger Stoffe“ enthält

- Ergebnisse aus Recherchen in Dokumentationen zu Störfällen hinsichtlich der angewendeten Methoden der Störfallbegrenzung. Eine quantitativ ausgewiesene Wirksamkeit ist in diesen Dokumentationen nicht enthalten. Angaben zu Konzentrationsmessungen waren für den Zweck der Studie nicht reproduzierbar.

- Ergebnisse der Auswertung von Sicherheitsberichten, internen und externen Notfallplänen. In diesen Plänen werden störfallbegrenzende Maßnahmen bei potenziellen Gasfreisetzungen beschrieben, ohne die Wirksamkeit quantitativ zu begründen.

- Ergebnisse der Befragung von ausgewählten Feuerwehren zu vorliegenden Erfahrungen. Demnach sind Wasserschleier, Hydroschilde und Lachenabdeckungen bei gasförmigen Stoffen als wirksam einzuschätzen, ohne jedoch einen konkreten Wirkungsgrad angeben zu können.

- Ergebnisse der Auswertung von Publikationen zur Forschung und Entwicklung. Hier werden unterschiedliche Wirksamkeiten quantitativ nachgewiesen. Die nachweislich besten Ergebnisse wurden mit 75 % bei einem industriellen Verfahren zum Niederschlagen von Chlorwasserstoffdämpfen mittels Wasseraerosol beschrieben. Die Arbeiten weisen aber gleichzeitig auf die mannigfaltigen Einflüsse hin, nach denen eine Verallgemeinerung zur Quantifizierung für gasförmige Stoffe erschwert ist. Solche Einflussfaktoren sind:

  - Standort der Anlage,
  - Zeitfaktor (Zeit bis zum Wirksamwerden einer Gegenmaßnahme),
  - Orografie und Bebauung in der Umgebung,
  - Stoffeigenschaften,
  - Art der Freisetzung gefährlicher Stoffe,
  - Wetter,
  - Passive Vorkehrungen,
  - Technologie der Störfallbegrenzung.

  Diese Vielzahl würde hinsichtlich einer Verbesserung der Prognose für Notfallplanung und Bauleitplanung spezielle Sachverständigengutachten (Einzelfallbetrachtungen) erfordern und könnte bei einem quantitativen Nachweis für die Effizienz einer störfallbegrenzenden Maßnahme zu einer Verringerung der Gefährdungsbereiche führen.

Die vorliegende Studie enthält abschließend den Vorschlag eines Modells, um im Rahmen der Notfallplanung und der Bauleitplanung durch Berücksichtigung des Zeitfaktors und einer angepassten Anwendung von Schadensindikatoren bei toxischen Gasen geringere Gefährdungsbereiche als nach den gegenwärtigen Empfehlungen zu erreichen.

2 Auftrag

Gemäß § 3 Absatz 3 Störfall-Verordnung sind von Seiten des Betreibers eines Betriebsbereichs vorbeugend Maßnahmen zu treffen, um die Auswirkungen von Störfällen zu begrenzen[1].

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) beauftragte TÜV Rheinland, Industrieservice GmbH, die Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen im Hinblick auf die Ausbreitung gasförmiger Stoffe zu untersuchen. Dazu sind in vier Schwerpunkten

- verschiedenartigen Maßnahmen bzw. Konzepte zu ermitteln, die zur Begrenzung der Auswirkungen bei der Freisetzung von Gasen und Dämpfen angewendet werden,

- eine Recherche hinsichtlich bereits vorliegender Erkenntnisse zur Wirksamkeit ausgewählter Maßnahmen durchzuführen,

- darzulegen, mit welchem Erfolg im Einzelfall störfallbegrenzende Maßnahmen im deutschen und US-amerikanischen Raum eingesetzt wurden und welche Erfahrungen mit dem Einsatz der genannten Maßnahmen bei Anlagenpersonal und Feuerwehren vorliegen,

- zu betrachten, ob es grundsätzlich möglich ist, die Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen oder einen Bereich der Wirksamkeit zu quantifizieren.

Abschließend sind Empfehlungen abzuleiten, um Möglichkeiten der Quantifizierbarkeit der Wirkung störfallbegrenzender Maßnahmen aufzuzeigen. Dabei ist zunächst insbesondere auf Fragen der Bauleitplanung einzugehen.

Die Leistungsbeschreibung des LANUV ist beigefügt (Anhang 1 Leistungsbeschreibung).

3 Konzeptionelles Herangehen

Das generelle Ziel dieser Studie bestand darin, eine Aussage zu treffen, inwieweit störfallbegrenzende aktive[2] und passive[3] Maßnahmen hinsichtlich ihrer Effizienz möglichst quantitativ zu bewerten sind.

Bevor entschieden werden konnte, welche Methoden oder Konzepte zu einer quantitativen Bestimmung der Wirksamkeit begrenzender Maßnahmen geeignet wären, wurde zunächst der aktuelle Stand des Wissens zu dieser Problematik ermittelt.

---

[1] Begrenzung: Folge eines schweren Unfalls reduzieren (z. B. durch Notfallmaßnahmen, Umhüllung oder Feuerschutzwand); in: Leitfaden der Abfassung eines Sicherheitsberichtes (EU); safety_report_guidance_DE.pdf. Gleichzeitig ist zu bemerken, dass Sicherheits- und Schutzmaßnahmen zur Verhinderung von Störfällen im Einzelnen auch geeignet sein können, die Auswirkungen von Störfällen so gering wie möglich zu halten.

[2] Als „aktiv“ werden hier störfallbegrenzende Maßnahmen bezeichnet, die **nach** einer Freisetzung gasförmiger Stoffe die Ausbreitung der Gase durch auszulösende Handlungen verhindern oder vermindern.

[3] Als „passiv“ werden hier störfallbegrenzende Maßnahmen bezeichnet, die für mögliche Störfälle vorbereitet wurden, um Störfallauswirkungen in Grenzen zu halten.

Dazu wurden in einem ersten Schritt die folgenden Recherchen nach der Art störfallbegrenzender Maßnahmen und deren Bewertungen hinsichtlich Wirksamkeit durchgeführt:

- Dokumentationen zu Störfällen in den Datenbanken der Zentralen Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen (ZEMA), der Erfassungsstelle der Kommission der Europäischen Union (Major Accident Hazard Bureau - MAHB) in Ispra (MARS, Major Accident Reporting System), der Erfassung der Organization für Economic Cooperation and Development (OECD) über MARS, Dokumentationen zu Störfällen im US-amerikanischen Raum (United States Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Washington DC);

- Zusammenstellung von störfallbegrenzenden Maßnahmen aus zugänglichen Sicherheitsberichten, internen und externen Notfallplänen;

- Auswertung von Einsatzerfahrungen ausgewählter Feuerwehren;

- Ausgewählte Forschungsarbeiten zu Untersuchungen über das Zurückhalten von gasförmigen Stoffen nach deren Freisetzung.

Um den Umfang überschaubar zu gestalten, wurden folgende Kriterien für Recherchen zur Bewertung der Wirksamkeit, der Quantifizierbarkeit störfallbegrenzender Maßnahmen bei einer Ausbreitung von gasförmigen Stoffen zusammengestellt:

1. Auswahl von Stoffen

   a) Stoffe gemäß Rangfolge SFK/TAA-GS-01 Leitfaden: Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung:

      - Phosgen
      - Acrolein
      - Chlor
      - Schwefeldioxid
      - Schwefelwasserstoff
      - Formaldehyd (Konzentration > 90 %)
      - Cyanwasserstoff
      - Oleum 65% (mit Wasser Bildung von Schwefeltrioxid-Nebel)
      - Brom
      - Ammoniak
      - Fluorwasserstoff
      - Fluor
      - Ethylenoxid
      - Acrylnitril
      - Chlorwasserstoff
      - Methanol
      - Propan (verflüssigtes Gas)
      - Benzol

b) Weitere gefährliche Stoffe bei Störfällen (geordnet nach Toxizität entsprechend AEGL-2 für 60 min)

- Stickstoffdioxid
- Dimethylamin
- Kohlenmonoxid
- Schwefelkohlenstoff
- Vinylchlorid
- Toluol
- Butadien-1,3

2. Folgende Methoden (Konzepte) von Maßnahmen wurden ausgehend von den Erfahrungen in der Störfallabwehr ausgewählt:

a) Aktive störfallbegrenzende Maßnahmen

- Absorptions-/Verdünnungseffekte mit stationären und mobilen Wasserschleiern, Hydroschilden,
- Umsetzung gasförmiger Stoffe mit Wasser und Zusätzen im Wasserschleier,
- Verkürzung der Freisetzungsdauer von freigesetzten Gasen, aus verdunstenden Flüssigkeiten (Abdeckung/Eingrenzung der Verdunstungsfläche von Lachen, Methoden der Rekondensation, Methoden der Abschaltung/Abdichtung von Anlagen, Lecks),
- Löschen, Schutz benachbarter Anlagen vor übergreifenden Bränden

b) Passive störfallbegrenzende Maßnahmen

- bautechnische Maßnahmen (Auffangwannen, Brandmauern, Zäune gegen Ausbreitung von Schwergas),
- Vorhalten leerer Behälter zum Umpumpen,

3. Zeitfaktor (Zeit vom Beginn der Freisetzung bis zur Realisierung einer wirksamen Begrenzung)

Abschließend wurde ausgehend von den recherchierten Ergebnissen ein Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit/Effizienz störfallbegrenzender Maßnahmen abgeleitet. Besonderes Augenmerk wurde auf Vorschläge für eine Anwendung im Rahmen der Bauleitplanung gelegt. Möglichkeiten für weitere Untersuchungen wurden vorgeschlagen.

4 Dokumentationen zur Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen bei der Freisetzung gasförmiger Stoffe

4.1 Störfallbegrenzende Maßnahmen in Berichten über Störfälle

In den Datenbanken wurde nach Angaben zur Begrenzung von Störfällen mit den ausgewählten gasförmigen Stoffen recherchiert (Datenbanken und Stoffe: Abschnitt 3). Die ausgewählten gasförmigen Stoffe waren bei einigen Störfällen Bestandteile in Stoffgemischen. In solchen Fällen wurden störfallbegrenzende Maßnahmen nur dokumentiert, wenn die aufgeführten Substanzen Hauptbestandteil waren oder im Stoffgemisch mehrere der ausgewählten Gase vorhanden waren.

Die in den Störfall-Datenbanken recherchierten störfallbegrenzenden Maßnahmen mit gasförmigen Stoffen sind im Abschnitt 9.2 (Anhang 2) aufgeführt.

Als erstrangige störfallbegrenzende Maßnahme bei Freisetzung gasförmiger Stoffe wurde in vielen Fällen versucht, ein Leck abzudichten, die Anlage mit Not-Aus-Schalter außer Betrieb zu nehmen, freigesetzte leichtentzündliche Flüssigkeiten in Notbehälter (Havariebehälter) umzupumpen oder gefahrlos abzuleiten. Zeiten, nach denen eine Ausbreitung in der Atmosphäre begrenzt oder abgestellt wurde, sind nur selten dokumentiert.

Eine Hauptmaßnahme bei einer Gasfreisetzung ist die Anwendung von Wassersprays nach verschiedenen Einsatz-Methoden (vgl. Anhang 2, Nr.1 bis 76).

Mitunter waren in den Berichten Angaben zu Messungen an spontan festgelegten Orten enthalten, um vor allem die Auswirkungen auf die Einsatzkräfte oder die Bevölkerung abschätzen zu können.
Häufig wurden dazu Spürröhrchen eingesetzt, um die schädlichen Auswirkungen von toxischen Gasen beurteilen zu können (siehe Abschnitt 9.2 Anhang 2, Nr. 2, 20, 23, 26, 27, 29, 33, 40, 41, 43, 63, 68, 108, 110, 120). Abgesehen von den oft sprunghaft wechselnden meteorologischen Bedingungen und der relativ großen Fehlergrenze von Messungen mit Spürröhrchen werden in den Berichten aber auch keine oder nur sehr ungenaue Angaben zur Entfernung von der Freisetzungsquelle und zu den örtlichen Bedingungen (Bebauung, Orografie) gemacht. Aussagen zur quantitativen Wirkung der Störfallbegrenzung fehlen.
Beispielsweise wurde lediglich bei einem dokumentierten Ereignis [127] (Freisetzung von Vinylchlorid, AEGL1 60 min: 250 ppm), bei dem nach dem Schließen von Ventilen Wasservorhänge eingesetzt wurden, um die Ausbreitung der Gefahrstoffwolke besser einzudämmen, massenspektrometrisch gemessen:

- Probenentnahme an verschiedenen Stellen und Analyse mit dem Massenspektrograph,
- Messpunkte innerhalb der Halle >100 ppm (oberhalb des Messwertbereichs),
- nach 1 h 38 min bis 2 h 18 min 100 ppm,
- auf der Straße nach 1 h 38 min 10 ppm,
- ca. 120 m von der Quelle 74,34 ppm nach 16 min, (davor <1ppm),
- in der Halle nach 20 min 93,28 ppm abnehmend,
- mobile Trupps messen 28mal im Abstand von 12 min 500 m vom Freisetzungsort,
- an der Stadtgrenze (Entfernung?) nach 1 h 42 min: 0,19 bis 0,8 ppm.

Aus den Messwerten geht allerdings nicht hervor, welchen Einfluss der Wasservorhang auf die Begrenzung der Ausbreitung der Wolke hatte.

Prinzipiell werden vor allem bei Bränden Wasserschleier gegen gefährliche Bestandteile im Rauchgas eingesetzt[4]. In den Berichten ist lediglich angegeben, dass die Rauchgaswolke niedergeschlagen wurde und dass mit Spürröhrchen keine gefährlichen Konzentrationen festgestellt wurden.

Generell geht aus den Berichten über ein Ereignis mit gasförmigen Stoffen (ZEMA, MARS, OECD) nicht hervor, mit welchem quantitativen Effekt eine störfallbegrenzende Maßnahme zu bewerten ist. Allgemein wird in vielen Berichten lediglich qualitativ dargestellt, dass

- eine Maßnahme ohne einen Beleg mit Messwerten „wirkungsvoll“ ist,
- gefahrlose Konzentrationen mit Spürröhrchen auf dem Betriebsgelände und außerhalb des Betriebes (oft ohne Zeitangaben) bestimmt wurden.

Auch eine ausführliche Recherche zu den Störfallangaben des U. S. Chemical Safety Board (CSB) brachte keine weiterführenden Ergebnisse. In den Untersuchungsberichten, die schwere Störfälle u. a. mit Ammoniak, Methanol, Chlor, Schwefelwasserstoff, Mononitrotoluol, Vinylchlorid, Propan, Oleum/SO_3 und Ethylenoxid behandeln, wird auf die im Störfall eingeleiteten aktiven Maßnahmen nicht eingegangen. Vielmehr stehen hier – wie auch in den europäischen Störfalldokumentationen - die Ursachen, die zu den Störfällen geführt haben, wie das nicht Einhalten von gültigen Standards, das Verwenden von nicht geeignetem Material, das Fehlen von sicherheitstechnischem Equipment und Unzulänglichkeiten bei der Instandhaltung im Mittelpunkt.

Störfälle infolge Freisetzung hochentzündlicher Gase und leichtentzündlicher Flüssigkeiten führen bekanntlich oft zu Explosionen und Bränden.

Tabelle 1: Störfälle (Explosionen und Brände) ausgewählter gefährlicher Stoffe

(nicht im Anhang 2 Zusammenstellung von Maßnahmen zur Störfallbegrenzung aus Datenbanken zu Störfällen aufgeführt)

Gasförmiger Stoff	Anzahl in Störfalldokumentationen (ZEMA, MARS, OECD)		
	Explosion	Explosion und Brand	Brand
Propan	1	9	3
Kohlenmonoxid	-	3	-
Methanol	3	1	3
Schwefelkohlenstoff	2	-	-
Toluol	5	3	1

Da in diesen Fällen die störfallbegrenzenden Maßnahmen hauptsächlich im Löschen der Brände und der Kühlung von benachbarten Anlagen mit Wasserspray bestanden, wurden – sofern nicht vor dem Brand eine Ausbreitung der Stoffe stattfand – solche Störfälle nicht aufgelistet.

Über den Erfolg einer versuchten Verdünnung von Schwergaswolken mittels Hydroschilden o. a. vor einer Explosion gibt es keine Angaben für eine nachvollziehbare quantitative Beurteilung der störfallbegrenzenden Maßnahme.

[4] Brände, bei denen die ausgewählten gefährlichen Stoffe im Rauchgase vorhanden sein können, wurden nicht dokumentiert.

Weitere Angaben zu störfallbegrenzenden Maßnahmen in den Berichten sind zwar betriebsbezogen, aber für eine Auswertung in dieser Studie zu allgemein gehalten.

So wurden Störfälle nicht dokumentiert, wenn nur angegeben wurde, dass das Ereignis

- durch den Einsatz von betrieblichen Kräften sowie von Einheiten der öffentlichen Gefahrenabwehr und von Hilfsorganisationen oder

- die Anwendung der Maßnahmen der internen und externen Notfallpläne

bekämpft wurde.

Bei manchen Freisetzungen gasförmiger Stoffe in beachtlichen Mengen werden begrenzende Maßnahmen nicht angegeben (vgl. Anhang 2 Zusammenstellung von Maßnahmen zur Störfallbegrenzung aus Datenbanken zu Störfällen, Nr.119 bis 125).

Bei allen Ereignissen handelten interne und in vielen Fällen auch externe Einsatzkräfte. Ein wesentlicher Gesichtspunkt bestand dabei darin, möglichst kurzfristig mit geeigneten Abwehrmaßnahmen zu beginnen. Allerdings sind die Zeiten von der Alarmierung bis zum Wirksamwerden der Abwehrmaßnahmen betriebs- und standortbezogen. Sie werden selten detailliert oder gar nicht angegeben. Die Folge ist stets eine von der Einsatzzeit abhängige ungehinderte Freisetzung gasförmiger gefährlicher Stoffe in die Atmosphäre.

4.2 Auswertung von Angaben zur Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen in Sicherheitsberichten und Notfallplänen

In den zugänglichen Sicherheitsberichten, den internen und externen Notfallplänen sind viele störfallbegrenzende Maßnahmen aufgeführt (vgl. Anhang 3 Zusammenstellung von Maßnahmen der Störfallbegrenzung aus Sicherheitsberichten, internen und externen Notfallplänen). Generell wird vorausgesetzt, dass diese Maßnahmen vernünftigerweise wirkungsvoll und begrenzend sind. Sie gehören vereinbarungsgemäß in die Rubrik „allgemeines Gefahrenabwehr-Know-how“.

Die im Abschnitt 3 aufgeführten Methoden von Maßnahmen (Nr. 2 a, aktive störfallbegrenzende Maßnahmen) dominieren gegenüber den störfallbegrenzenden passiven Maßnahmen, bei denen meistens nur auf die detaillierten Festlegungen im technischen Regelwerk verwiesen wird.

Konkrete Daten zur Bewertung der Wirksamkeit werden in diesen Dokumenten nicht angegeben[5].

[5] Möglicherweise in speziellen Gutachten dokumentierte Angaben sind uns zur Zeit nicht bekannt.

5 Erfahrungen bei der Vorbereitung und Abwehr von freigesetzten gasförmigen Stoffen

Erfahrungen aus der Praxis sind eine wesentliche Voraussetzung zur Beurteilung der Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen. Es wurden Feuerwehren der TUIS, der ATF und sonstige Berufs- und Werkfeuerwehren, davon insgesamt 9 aus dem Bundesland Nordrhein-Westfalen, zur Störfallbegrenzung freigesetzter gasförmiger Stoffe, insbesondere hinsichtlich quantitativer Aussagen über die Effizienz unterschiedlicher Methoden, angefragt.

Die Erfahrungsberichte bringen übereinstimmend zum Ausdruck, dass

- zu Absorptions- und Verdünnungseffekten Hydroschilde und Düsenschläuche (B-Schlauch mit vielen Wasserdüsen) eingesetzt und ohne dokumentierte Angaben über exakte Messwerte als wirksam beurteilt werden;

- Methoden der Leckabdichtung mit Dichtkissen, pneumatischen Dichtzylindern, Rohrummantelungsschellen sowie mit den sonst am Feuerwehrmarkt erhältlichen Stopfen und Keilen ausgezeichnet wirksam sind;

- Umsetzungen freigesetzter gasförmiger Stoffe mit Zusätzen im Wasserschleier nur von einigen TUIS- und Werkfeuerwehren praktiziert werden, dies jedoch ohne Aussagen zur Quantifizierung der Wirksamkeit;

- zur Verkürzung der Freisetzungsdauer ein Abdecken und eine Eingrenzung der Verdunstungsfläche und Lachen mit Folien oder Schaum durchgeführt wird;

- Rekondensation ausgetretener gasförmiger gefährlicher Stoffe nicht durchgeführt wird.

Einige Feuerwehren teilten mit, dass sie über diesbezügliche Erfahrungen nicht verfügen, obwohl entsprechende Vorkehrungen zur Anwendung getroffen wurden.

Generell zeigt sich, dass die Feuerwehren Methoden zur Störfallbegrenzung freigesetzter gasförmiger Stoffe anwenden bzw. vorbereitet haben. Vorgenommene Konzentrationsmessungen geben aber keine Hinweise zur Quantifizierbarkeit der Effizienz. Sie erfolgten mit dem Ziel, die toxische Belastung der Einsatzkräfte oder der Bevölkerung ermitteln bzw. ausschließen zu können.

Ferner wurden im Sinne der Aufgabenstellung Erfahrungsberichte von Institutionen und Wissenschaftlern ausgewertet:

VDI-Technologiezentrum [189] hat im Auftrag des BMFT eine Übersicht über die Aktivitäten im Bereich der Sicherheitsforschung und Sicherheitstechnik erstellt. Dazu gehören die Vermeidung von Störfällen, die Begrenzung von Störfällen und die Bewältigung von Notfällen und Katastrophen.

Langelüddecke [201] berichtet über Erfahrungen zur Wirksamkeit betrieblicher Anlagen für die Störfallbegrenzung und Besonderheiten der BASF AG in Ludwigshafen, wobei die Produktion von Ammoniak im Mittelpunkt steht. Es wird über erforderliche Maßnahmen zur Gefahrenverhütung bei der Lagerung und an Be- und Entladestellen von Ammoniak berichtet. Ferner werden die Erfordernisse der Schadensbekämpfung bei Unfällen mit Ammoniak betrachtet, wobei die bewährten Techniken, das Abdecken mit Kunstofffolie, das Umpumpen

von flüssigem Ammoniak, das Niederschlagen von Ammoniakdämpfen und das Absaugen von gasförmigem Ammoniak beschrieben werden. Ferner werden Angaben zur Spezifik der erforderlichen Schutzausrüstung gemacht.

Böke [187] fasst resultierend aus Erfahrungen Maßnahmen zu primären Sicherheitsmaßnahmen, die die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Störfalls senken, und zu sekundären Sicherheitsmaßnahmen, die eine Verringerung des Schadensausmaßes bewirken, zusammen. Im Beitrag wird die Störfallsimulation zur Bestimmung von technischen Schutzmaßnahmen erläutert. Außerdem wird ein kurzer Überblick über die gesetzlichen Vorschriften und ein Auszug aus der Störfallverordnung gezeigt. Ein Schwerpunkt bildet ein Störfall, bei dem Gase freigesetzt werden. Anhand von Grafiken und Diagrammen werden die Zusammenhänge der störfallbedingten Stofffreisetzung erklärt. Mögliche Gegenmaßnahmen werden aufgezeigt.

In einem Videofilm **BOLIDEN** [203] wird die erfolgreiche Anwendung von Rekondensationsvorrichtungen vorgestellt. Bei Gefahrgutunfällen mit druckverflüssigten Gasen (hier: Schwefeldioxid) wird das relativ gefahrlose Ab- und Umfüllen in der Praxis geschildert.

Pleß [190] hat in einem Forschungsbericht zur Verbesserung der Effizienz der Feuerwehreinsätze Erfahrungen verschiedener Feuerwehren zur Lufteinmischung bei genormten Strahlrohren und Hydroschilden sowie die Wirksamkeit von versprühtem Wasser bei der Ad- und Absorption von Gasen ausgewertet. Nach einer Umfrage bei 7 (5)[6] ausgewählten Werkfeuerwehren, 3 (2)[6] Berufsfeuerwehren und 12 (6)[6] freiwilligen Feuerwehren in Landkreisen werden zur Freisetzung von gasförmigen Stoffen und der Wirksamkeit von Abwehrmaßnahmen folgende Erfahrungen mitgeteilt:

Eingesetzt wurden die Wehren bei Behälterrissen und Leckagen von 1 kg/s (undichte Flansche, Ventile) bis 10 kg/s (Flanschabriss oder Leckage).
Als Dedektionsmöglichkeiten wurden angegeben: Prüfröhrchen, Explosimeter, Gaswarngeräte und in Betrieben vorhandene stationäre Gasmessgeräte und Sensoren. Konkrete Messergebnisse mit Bezug zur Freisetzungsrate wurden nicht dokumentiert. Die vorhandenen Messgeräte können nur zum Teil genutzt werden (geringe Anzahl, nicht ausreichend entwickelte Peripherie zur Aufzeichnung der Ergebnisse und der Auswertung vor Ort). Auch kontinuierlich messende Geräte lassen nur eine auf den Messpunkt oder die Messstrecke bezogene Abschätzung zu.

Zur Störfallbegrenzung wandten die Feuerwehren folgende Maßnahmen an:

- Absperrungen,
- Sicherung von Kanaleinläufen,
- Sicherung von tiefer gelegenen Stellen,
- Aufbau von Wasserschleiern,
- Einsatz von Neutralisierungsmittel und Zusätzen (nur in Betrieben), z. B. Natronlauge und Kalkmilch bei Freisetzung saurer Gase, Thiosulfat zur Reduktion von Chlor und Phosgen, Tenside zur Verringerung der Tropfengröße des Wassers,

[6] In Klammern: Anzahl der auswertbaren Angaben von den entsprechenden Feuerwehren

- Einhausungen und Rekondensation mit Planen,
- Bergungsbehälter,
- wasserbetriebene Ventilatoren,
- Dampfstrahlen,
- Abdecken mit Mittel- und Leichtschäumen,
- Schließen von Rauch- und Wärmeabzügen in Gebäuden.

Als Geräte kamen zum Einsatz:

- Sprühstrahlen aus mobilen Sprühdüsen mit Voll- und Hohlkegelstrahlen unterschiedlicher Leistung bis maximal 800 l/min,
- Sprüh-, Flach- und Vollstrahlen aus Monitoren bis 1600 l/min,
- Hochdruckstrahlrohre,
- Hydroschilde,
- Be- und Entlüftungsgeräte sowie Leichtschaumgeräte, Turbolöschgeräte.

Erfahrungen bei Störfällen mit Schwergasen liegen hauptsächlich bei Werk- und Berufsfeuerwehren vor. Freiwillige Feuerwehren besitzen nur geringe Erfahrungen aus Einsätzen mit kleinen Quellstärken.
Maßnahmen zur Verdünnung, Kanalisation und Niederschlagung werden nur in unmittelbarer Nähe zum Freisetzungsort als effizient eingeschätzt. Wichtigste Aufgaben sind auch in diesem Fall die Beseitigung des Lecks (Abschiebern, Abdichten, Einbringen in Bergungsbehälter), die Abdeckung (Schäume, poröse Massen), die Neutralisation oder die Aufnahme von Flüssiggaslachen.

Hydroschilde werden wegen der oft unzureichenden Wasserbereitstellung bzw. ungenügender Pumpenleistung nur teilweise genutzt.

Nach der Auswertung der Erfahrungen werden zu erzielende Wirkungen beim Niederschlagen der Gase mit Wasser und die Wirksamkeit von Zusätzen im Wasser von den Einsatzkräften überbewertet. Messwerte zur Bewertung der Effizienz werden von den Feuerwehren nicht angegeben.

Folgende Möglichkeiten zur qualitativen Verbesserung des Wirkungsgrades störfallbegrenzender Maßnahmen werden von den Feuerwehren genannt:

- Löschwasserbereitstellung,
- Verfügbarkeit leistungsfähiger Pumpentechnik,
- Kenntnisse über die Lufteinmischung bei genormten Strahlrohren und Hydroschilden,

- Kenntnisse über die Wirksamkeit von versprühtem Wasser bei der Ad- bzw. Absorption von Gasen,

- Mittel zur Leckabdichtung auch bei hohen Drücken,

- Einsatz von Gasschutzanzügen im Tieftemperaturbereich,

- kontinuierliche Überwachung von Gaswolken durch Messgeräte auf der Grundlage PID(FID),

- Ausbreitungsrechnungen in einfacher Form für Taschenrechner oder Notebook unter Beachtung von Wetterparametern und Bebauungsarten.

Gleichermaßen sind die Qualifizierung und die Publikation von Erfahrungen bedeutsam. In Frage kommen vor allem:

- Einführung in die taktischen Maßnahmen der Bekämpfung von Schadgaswolken im Rahmen des Unterrichts einschließlich Üben von Einsatzvarianten mit einem Gefahrenpotenzial und verschiedenen Einflüssen (Wetter, Ex-Schutz),

- Schulung über Gefahrstoffeigenschaften von Gasen, das Verhalten nach der Freisetzung, sowie vor allem Vermitteln von Kenntnissen zum technischen Regelwerk für Gase,

- Umgang mit Datenbanken und Nachschlagewerken (Sicherheitstechnische Kenndaten zur Toxizität und zu Gefährdungsabschätzungen),

- Ausbildung des mittleren Dienstes bei Werkfeuerwehren,

- Bekanntmachen und Verbreiten von Erfahrungen bei Einsätzen.

Im Rahmen der Einholung von ausländischen Erfahrungen hinsichtlich der Methoden zur Störfallbegrenzung, z. B. im Rahmen der Überwachung der Ansiedlung entsprechend Seveso-II-Richtlinie, wurde aus der Provinz Südtirol mitgeteilt, dass „In konkreten Fällen … Systeme zur Niederschlagung von Schadstoffwolken zur Verkleinerung der Zonen mit einer Einschränkung der urbanistischen Nutzung geführt“ haben (siehe Anhang 4).

6 Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen

6.1 Vorbemerkungen

Dokumentiert werden in diesem Abschnitt publizierte wissenschaftliche Untersuchungen vor allem zu aktiven störfallbegrenzenden Maßnahmen (Abschnitt 3, Nr. 2 a). Für passive störfallbegrenzende Maßnahmen (Abschnitt 3, Nr. 2 b) gibt es hinreichende Festlegungen und Empfehlungen im technischen Regelwerk, die erfahrungsgemäß wesentlich zur Störfallbegrenzung beitragen.
In Unternehmen, die große Mengen von gefährlichen Stoffen handhaben, wurden passive Maßnahmen (stationäre Hydroschilde ohne und mit Neutralisationszusätzen, stationäre Wasserschleier und Dampfvorhänge, Löscheinrichtungen, Einhausungen, Rekondensationseinrichtungen u. a.) realisiert, die im Störfall aktiviert werden.
Als Maß für die Wirksamkeit der Störfallbegrenzung wird ein Konzentrationsminderungsfaktor (auch als Verdünnungsfaktor bezeichnet) angegeben. Dieser Faktor ist der Quotient aus der Konzentration des toxischen Gases an einem bestimmten Ort ***ohne*** störfallbegrenzende Maßnahme zur Konzentration an diesem Ort ***nach Anwendung*** einer störfallbegrenzenden Maßnahme[7].
Für die Beurteilung einer quantitativen Bewertung der Wirksamkeit störfallbegrenzender Methoden ist eine Unterscheidung zwischen aktiv und passiv bei den wissenschaftlichen Untersuchungen nicht angebracht. Die Begrenzung der Auswirkungen wird allerdings von der Schnelligkeit der Anwendung einer Methode wesentlich bestimmt.

Eine ausführliche Übersicht über ältere Forschungsarbeiten aus den 70er und 80er Jahren zu störfallbegrenzenden Maßnahmen gibt **Lees** [194]. Dort werden unter anderem folgende störfallbegrenzenden Maßnahmen diskutiert:

- ***Dämme***
  Einschränkung der Ausbreitung gefährlicher Konzentrationen (flüssiges Chlor) von 2,6 km auf 320 m (Dilwali, Mudan 1987, beschrieben in: Loss Prevention, Emission and Dispersion 15/315 in [194]).

- ***Schaum***
  Beschäumen ist eine effektive Maßnahme, um Verdunstungsgeschwindigkeiten zu senken (Brom, Chlor, Methylamin, SO_2, $POCl_3$). Verschiedene Schäume (z. B. Hazmat 2) vermindern die Verdunstung: Brom bis > 95 %, Chlor 67 – 82 %, Fluorwasserstoff 70 - 85 %, Schwefeldioxid >61 %. Der Schaum muss aber geeignet sein.

- ***Feste Barrieren*** (z. B. Einhausungen).

- ***Fließende Barrieren***
  Wassersprays (fest, mobil)
  - Mechanischer Effekt (Barriere, Verteilung, Verdünnung)
  - Thermischer Effekt (Erwärmung von kaltverflüssigten Gasen)
  - Physikalisch-chemischer Effekt (Absorption, chemische Reaktion)

[7] Bei einem Konzentrationsminderungsfaktor 4 würde beispielsweise eine Konzentration von 80 ppm auf 20 ppm reduziert werden.

Ferner in diesem Zusammenhang Diskussion alter Arbeiten, z. B. von: McQuaid, Moore und Rees, Goldfish und Hawk Loss Prevention, Emission and Dispersion 15/317 ff (Versuchsbeschreibungen, Modellierungen)
Feldversuche mit Schwergas von HSE mit CO_2
Dampf
Die Anwendung von Dampf ist abhängig von der Freisetzungsart, der Anlage und der angewendeten Methode. Konzentrationsverminderungsfaktoren: 2 bis 10 im Nahbereich, im Fernbereich bis 4. Beschreibung von Modellierungen (FENCE62/…23, DENS23, SPRAY23, SPRAY62, SPRAY65).
Dampfschleier für entzündliche leichte Gase (Cairney and Cude 1974, Simpson 1974), durch installierte Anlagen ausgelöst durch Gassensoren.

Diskussion von Vergleichen Wasserspray und Dampf, siehe McQuaid, 1980.

Diese Arbeiten werden z. T. von den hier in den Abschnitten 6.2 bis 6.4 zitierten Autoren aufgegriffen.

6.2 Absorptions-/Verdünnungseffekte mit stationären und mobilen Wasserschleiern, Hydroschilden

Mehrere Arbeiten befassen sich mit der Anwendung von Wassersprays, Wasserschleiern und Dampfvorhängen zur Diffusion von Schwergaswolken oder zur Absorption gefährlicher Gase.

Barth, Hartwig und Heudorfer [169] untersuchten im Auftrage des BMFT im Jahr 1987 die zwangsweise Verdünnung von Schwergasen durch Wasservorhänge. Durch den Wasservorhang wird Luft in das Schwergas eingemischt.
Diskutiert werden

- Lufteinmischung in den Wasservorhang (nach Berechnungen geht der Wirkungsgrad der Lufteinmischung bei einem zunehmenden Wasserverbrauch drastisch zurück),

- Wechselwirkung Wasservorhang-Schwergas in einer Ausbreitungskammer (die Hälfte der in den Wasservorhang eingemischten Luft trägt zur Schwergasverdünnung bei, schwacher Wind verstärkt die Verdünnung),

- Auslegungsgrundsätze.

Nach Berechnungen wird durch Wasservorhänge relativ rasch die untere Zündgrenze erreicht. Allerdings lassen sich freigesetzte hochtoxische Stoffe durch die Anwendung eines Wasservorhangs nicht auf unbedenkliche Konzentrationen verdünnen, tragen aber zur Konsequenzminderung bei.
Die Aussagen stimmen mit Windkanalmessungen und Freilanduntersuchungen überein.

In dem Projekt wurde ein numerisches Modell zur Berechnung der Lufteinmischung in einen planaren Wasservorhang aufgestellt.

Barth, Hartwig und Heudorfer [183] führten eine kleinskalige Simulation eines Wasservorhangs in einer dafür konstruierten Schwergas-Ausbreitungskammer durch. Als Schwergas wird Kohlendioxid (schwerer als Luft, Faktor: 1,53) in diese Kammer eingeleitet, das den Wirkungen eines Wasservorhangs mit und ohne Windeinwirkung ausgesetzt wird.

Das Kohlendioxid wird in die Versuchskammer eingeleitet. In 100 cm Entfernung vom Austrittsspalt sind entlang einer Rohrachse 5 Wassersprühdüsen angeordnet. Innerhalb der Versuchskammer können an beliebigen Messorten über ein Probenahmesystem kontinuierlich Gasproben entnommen und in einem **entsprechenden** Analysegerät beprobt werden.

Ohne Windeinfluss ist der Wirkungsgrad pro Wassermenge eine nichtlineare Funktion, die von mehreren Parametern abhängt (Beschreibung in: Heudorf, W.: Die Literaturstelle wird nicht konkret benannt). Die Luftzumischung erhöht sich bei Erhöhung des Betriebsdruckes an den Sprühdüsen sowie bei Vergrößerung der Sprayhöhe.

Die zunehmende Windgeschwindigkeit erhöht die vom Wasservorhang forcierte Luftzumischung, wobei sich oberhalb eines bestimmten Betrags der Windgeschwindigkeit die Luftzumischung wieder verringert.
Aus den experimentell ermittelten Verhältnissen von Wassermenge/Luftzumischung lassen sich erste Abschätzungen über die Effizienz eines Wasservorhangs durchführen.
Die vom Wasservorhang erzeugte und der Schwergaswolke zugemischte Luft erzwingt die Dispersion des Schwergases.
Diese Folge der Wechselwirkung von Schwergaswolke und Wasservorhang kann man sich integral so vorstellen, dass die Wolkenhöhe in Lee des Wasservorhangs stark erhöht wird. Dadurch, dass die Schwergaswolke nun ein um den Betrag der vom Wasservorhang zugemischten Luft vergrößertes Volumen einnimmt, wird die Konzentration des Schadgases reduziert.

Um eine Vorstellung von der Größenordnung der durch den Wasservorhang zusätzlich erreichten Verdünnung zu gewinnen, ergibt sich beispielsweise unter der Annahme, dass der Wasservorhang jeweils zur Hälfte Schwergas von Luv und Frischluft von Lee einmischt, ein Verdünnungsfaktor von etwa 20. Dabei ist aber deutlich festzustellen, dass dieser Verdünnungsfaktor im Wesentlichen von der freigesetzten Schwergasmenge und der versprühten Wassermenge sowie den technischen Betriebsparametern: Düsenbetriebsüberdruck, Spray-Höhe, Tröpfchengröße, Tröpfchenspektrum etc. abhängig ist. Als für die betriebliche Praxis typische Zumischrate können 10 m³ Luft pro Liter versprühtes Wasser betrachtet werden.

Puls und Hartwig [159] prüften in Feldversuchen herkömmliche, meist stationär eingesetzte Techniken sowie Möglichkeiten der Feuerwehren zur Beeinflussung der Dispersion schwerer Gase nach deren Freisetzung und vergleichen die verschiedenen Techniken. Untersucht wurden Wasservorhänge, Feuerwehr-Hydroschilde und Feuerwehr-Sprühstrahlrohre in unterschiedlichen Anordnungen.
Sie kommen zu dem Ergebnis, dass die Unterschiede in der Wirkungsweise der verschiedenen Techniken groß sind, vgl. auch in [163] die Abschnitte 7 und 8.

Barth, Uli [166] untersuchte die Wirksamkeit von vertikalen Dampfvorhängen ohne chemische Zusätze zur Schadensminimierung bei störfallfreigesetzten schweren Gasen mit Feldversuchen.

Die Auswertung der umfangreichen Messdaten ergab, dass sich unter den o. g. Standardbedingungen ein mittlerer Verdünnungsfaktor von 28 erzielen lässt. Eine Druckänderung gegenüber dem Standardbetriebsdruck von 5 barü um den Faktor 2 nach unten bzw. nach oben bewirkte, dass sich mittlere Verdünnungsfaktoren von 6 bzw. 66 einstellten. Die Änderung der Windgeschwindigkeit von 1,8 m/s auf 2,8 m/s bei Standardbedingungen veränderte den mittleren Verdünnungsfaktor um weniger als 2. Außerdem zeigten Messungen, dass

sich eine Änderung der Windgeschwindigkeit umso geringer auf die Veränderung des Verdünnungsfaktors auswirkt, je höher der Düsenbetriebsdruck ist.

Im Vergleich mit anderen Verfahren wird deutlich, dass die Wirksamkeit eines Dampfvorhangs und die eines Wasservorhangs in einem vergleichbaren Größenbereich liegen.

In der Quelle (zu beachten: Stand 1990) wird darauf hingewiesen, dass Dampfvorhänge in der Bundesrepublik z. B. in Anlagen der BASF (Vgl. GIESBRECHT/SEIFERT 1984) und der Bayer AG vorhanden sind.
Außerhalb der Bundesrepublik werden Dampfvorhänge bei den Firmen Imperial Chemical Industries (ICI) in Großbritannien und MOBAY in Nordamerika eingesetzt. Bei MOBAY (Tochter von Bayer) werden in sieben Phosgen herstellenden Betrieben Dampf-Ammoniak-Vorhänge vorgehalten.

Naue [161] informiert über eine Schadgasverdünnung durch rotierende Freistrahlen. Ein durch rotierende Freistrahlen überstrichener Bereich und die damit einhergehende Verdünnung von aus einer vereisten Lache verdampfendem Kohlenstoffdioxid werden berechnet. Insbesondere das Abklingverhalten von Freistrahlen und deren Reichweite werden untersucht.

Auf der Grundlage der theoretischen Kenntnisse zum Verhalten von Freistrahlen werden die besonderen Bedingungen bzw. das Verhalten für rotierende Freistrahlen, erzeugt durch eine um die vertikale Achse drehendes Gebläse, erörtert und viele Varianten durchgerechnet.

Es werden die quantitativen Anforderungen an die Erzeugung eines rotierenden Freistrahls (Strahlfördermenge am Ende des Freistrahls) berechnet, um bei einer Freisetzung aus einer Lache eine primäre Verdünnung auf etwa 1 % zu erreichen. Wird durch das Gebläse ein Volumen überstrichen, dass in etwa die Größenordnung $5{,}5 * 10^6$ m³ bis $6{,}0 * 10^6$ m³ erreicht, würde bei einer Freisetzung von 300.000 m³ CO_2 (angenommener Worstcase) eine Verdünnung auf ca. 2,5 % CO_2 möglich sein.

Ritter und Klopp [162] berichten über die Trennwirkung und Verdünnungswirkung einer „Wasserschutzwand“. Sie stellen die Konstruktionsprinzipien einer Einrichtung dar, in der mittels Pumpendruck von ca. 200 bar Wasser einem speziellen Rohrleitungssystem zugeführt wird, das mit speziellen Sprühdüsen ausgerüstet ist. Das Wasser tritt aufgrund der Anordnung der Düsen senkrecht nach oben in einem Sprühstrahl aus.
Aufgrund des Pumpendrucks erreicht der Sprühstrahl eine Höhe von bis zu ca. 6 m. Die Anordnung der Düsen auf dem Rohrscheitel entlang der Rohrachse lässt auf diese Art und Weise eine „Wasserschutzwand“ entstehen.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass bei der Freisetzung des Wassers aus den Düsen Wassertröpfchen entstehen, die bedingt durch die hohe kinetische Energie Gaspartikel nach „ ... oben reißen und verdünnen“. Eine Trennwirkung der Wasserschutzwand, d. h. das Verhindern eines Gasdurchtritts durch die Wasserschutzwand konnte bei den Versuchen festgestellt werden (Reduzierung der Ausbreitungsreichweite).

Puls [163] ermittelt den Wirkungsgrad von Hydroschilden im Vergleich mit anderen technischen Vorrichtungen zur Dispersion schwerer Gase am Beispiel von Kohlendioxid.

Die verwendeten technischen Vorrichtungen zeigen deutliche Unterschiede in ihrer Wirksamkeit, die Schwergaswolken zu verdünnen. Teilweise wurden nur kanalisierende Effekte

vorgefunden. Teilweise wurde die Gaskonzentration durch die Geräte lokal sogar verstärkt. Einige Vorrichtungen verdünnen die Gaskonzentration, die bei einer ungehinderten Gasfreisetzung auf dem Versuchsfeld nachzuweisen war, auf weniger als 1/100-tel der Konzentration.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen deutlich, dass die Auswahl und Positionierung der eingesetzten Technologien entscheidend für den Erfolg der Minderung der Schwergaskonzentration ist.

Seifert und Giesbrecht [73] testen vertikale Dampfvorhänge aus Wasserdampf ohne chemische Zusätze. Zwischen der angenommenen Leckagestelle und dem vor der Gasausbreitung zu schützenden Ort wird ein Dampfvorhang errichtet.
Der Dampfvorhang wird durch das Verdüsen von Wasserdampf mit hohem Anfangsimpuls erzeugt, wodurch eine starke Lufteinmischung in das Leckgas bewirkt wird. Somit kann das Gas schnell unter einen vorgegebenen Konzentrationswert, z. B. die untere Zündgrenze verdünnt werden.
Zur Auslegung der Dampfvorhänge bezüglich des notwendigen Dampfmassenstroms und des Dampfvordrucks wurde ein Rechenmodell entwickelt und experimentell verifiziert. Dabei ist der Dampfvorhang hinsichtlich des Dampfmassenstroms und des zu erzeugenden Impulses so auszulegen, dass das Gas bereits im aufsteigenden Strahlbereich vor Erreichen der Kulminationshöhe unter den vorgegebenen Konzentrationswert verdünnt wird. Wind unterstützt den Verdünnungsvorgang.
Im Ergebnis der Feldversuche wird ein Auslegungsdiagramm für Dampfvorhänge vorgestellt. Aus dem Auslegungsdiagramm können die Mengenströme dimensioniert werden.

Meroney et al. [178] stellten fest, dass die Konzentration von freigesetztem Kohlendioxid durch Wasservorhänge um den Faktor 4 bis 6 gegenüber Versuchen ohne Einsatz eines Wasservorhanges gemindert wird.

Dandrieux, Dusserre und Ollivier [164] beschreiben die Einschränkung der Ausbreitung von Chlor durch einen vertikalen gefächerten Wasservorhang.
Sie setzten Chlor aus Druckgasflaschen frei (0,33 kg/min) und nahmen in Abständen von 5, 10 und 15 m Proben mit und ohne Wasservorhang (vertikal 8 m, horizontal 20 m).

Das Verhältnis zwischen den ohne Wasservorhang und mit Wasservorhang ermittelten Konzentrationen (Verdünnungsfaktor) wird für den Abstand von 5 m mit 5 angegeben, wobei auf die verschiedenen Richtungen von Wasservorhang und Wind und damit auf die Einschränkung der Repräsentativität des Ergebnisses hingewiesen wird. Bereits im Abstand von 10 m beträgt das Verhältnis 1. Die Wirksamkeit des Wasservorhangs ist auf seine direkte Wirbelzone beschränkt. Chlor breitet sich links und rechts um die Barriere aus. Es sind mehrere simultane Wasservorhänge erforderlich.

Petersen und Diener [181] berichten aus dem Anlass, dass von 20 US-amerikanischen Unternehmen der chemischen/petrochemischen Industrie[8] ein Fluorwasserstoff-Minderungs-/Beurteilungsprogramm (ICHMAP) aufgelegt wurde, das sich u. a. in einem 3-teiligen Untersuchungsprogramm mit der Beurteilung der Effektivität von Dampfbarrieren im Hinblick auf die Verzögerung und auf die Verdünnung von HF-Dampfwolken bei störfallbedingter Freisetzung in Industrieanlagen befasst. Diese Quelle enthält einen Überblick über den wesentli-

[8] Allied-Signal, Amoco, Ashland, BP, Chevron, Conoco/DuPont, Dow, Elf Aquitaine, Exxon, Kerr-McGee, Marathon, Mobil, Phillips, Saras, Shell Internationale, Sun/Suncor, Tenneco, Texaco, Unocal, 3M

chen dritten Teil dieses Untersuchungsprogramms, in dessen Rahmen über 200 Windkanalsimulationen durchgeführt worden sind (Ersatzgas für HF: Ethan, CO_2 oder SF_6; bei unterschiedlicher Anlagenbeschaffenheit, mit zweidimensionalen Hindernissen und Einhausungen).

Folgende Ergebnisse werden angegeben:

- Zweidimensionale Hindernisse minderten die Konzentrationen im Nahbereich um den Faktor 2 bis 9, im Fernbereich (500 m bis 2.000 m) war die Konzentrationsminderung einheitlich.

- Zweidimensionale Hindernisse bewirkten keine signifikante Erhöhung der Wolkeneintreffzeiten.

- Einhausungen minderten die Konzentrationen im Nahbereich um den Faktor 4 bis 15 und im Fernbereich um den Faktor 1 bis 4. Die Minderung im Fernbereich ist auf die freigesetzte Menge zurückzuführen, die zunächst in der Einhausung (je nach Volumen der Einhausung) zurückgehalten wird.

- Einhausungen bewirkten eine Verlängerung der Wolkeneintreffzeiten von ungefähr 500 s in einer stark verbauten Anlage und mit nur wenig Effekt (50 s oder weniger) in einer leicht verbauten Anlage.

- Verglichen mit flachem, unbebautem Grasland mindern die für eine Industrieanlage typischen Hindernisse die Konzentrationen im Nahbereich um den Faktor 2 bis 25. Die Konzentrationsminderungsfaktoren vereinheitlichten sich bei Entfernungen von 2.000 m bis 5.000 m, je nach Komplexität der Anlage.

- Die Konzentrationsminderungsfaktoren sind abhängig von der Anlagenbeschaffenheit, von der Windrichtung sowie vom Freisetzungsszenario und sie sind anlagenspezifisch.

Der Bericht fasst zusammen, dass zweidimensionale Hindernisse für die Verdünnung von HF-Dampfwolken nur im Nahbereich effektiv sind und die Wolke nicht signifikant aufhalten. Einhausungen hingegen sind für die Verdünnung von HF-Dampfwolken im Nah- und Fernbereich effektiv, können die Wolke in nur leicht verbauten Anlagen aber nicht signifikant aufhalten. Einhausungen sind in stark verbauten Anlagen am effektivsten, aber die Ausführung der Einhausung ist anlagenspezifisch und eine Windkanalsimulation sollte durchgeführt werden.

Unabhängig von der Anlagenbeschaffenheit (leicht oder stark verbaut) wurden im Nahbereich (100 m) die besten Ergebnisse mit einem halbkreisförmigen Hindernis erzielt (Konzentrationsminderungsfaktor: 6). Unter Berücksichtigung der Anlagenbeschaffenheit wurden bei einer stark verbauten Anlage im Nahbereich (100 m) die besten Ergebnisse mit einem 3-2-3-Hindernis H = 10 m, Abstände zur Quelle: (30, 40, 50) m mit einem Konzentrationsminderungsfaktor von 9 und mit einem winkelförmigem Hindernis (Konzentrationsminderungsfaktor: 9) erzielt. Die niedrigsten Konzentrationsminderungsfaktoren wurden mit einem Hindernis mit vertikaler Bewegung beobachtet.

Bei Einhausungen wurden signifikante Konzentrationsminderungsfaktoren nur mit einer Seiten-Einhausung ohne Öffnungen mit Spoilern erzielt. Diese betrugen im Nahbereich 5 bis 9

bzw. im Ergebnis von im Vorfeld geführten Untersuchungen[9] 4 bis 15 und im Fernbereich 1 bis 4. Eine signifikante Erhöhung der Wolkeneintreffzeiten (ungefähr 500 s) konnte nur bei einer stark verbauten Anlage erzielt werden.

Schatz und Koopman [182] berichten über die Realisierung eines Programms zur Durchführung von Großfeldversuchen auf einem Testgelände in Nevada, in deren Mittelpunkt die Untersuchung von Sprühwassereinsatzeffekten auf die Minderung von Fluorwasserstoff-Wolken stand.
Folgende Ergebnisse werden genannt:

- HF/Sprühwasser-Verhältnis: Ab einem HF/Wasser-Verhältnis von 1:40 konnte eine Effizienz der HF-Entfernung von > 90 % erzielt werden (Einflussgrößen entsprechend Bezugsfall).

- Sprühwasser Tropfengröße: Je geringer die Tropfengröße, desto besser die Effizienz der HF-Entfernung (beständige Verbesserung). Empfohlen werden 160 µm an Stelle von 320 µm.

- Sprühwasser Additive: In Bezug auf die Minderung des frei gesetzten AUA (Alkylat, 90 % HF) konnte nur ein sehr geringer Effekt durch den Einsatz von Additiven festgestellt werden. Beim Einsatz des Monitors konnte keine Verbesserung der Effizienz der HF-Entfernung durch den Einsatz von Additiven (hier nur $NaHCO_3$) nachgewiesen werden.

- Sprühwasser Fließrichtung: Die Sprühwasserrichtung aufwärts verbessert die Effizienz der HF-Entfernung bei niedrigeren HF/Sprühwasser-Verhältnissen. Bei höheren HF/Sprühwasser-Verhältnissen hingegen ist der Effekt nicht erkennbar oder nur unbedeutend. Die Verringerung der Tropfengröße hatte auf dieses Ergebnis keinen Einfluss.

- Sprühwasser Abstand zur Quelle: Die Vergrößerung des Sprühwasser Abstandes zur Quelle auf 32 ft (9,8 m) nahm einen scheinbar positiven Einfluss auf die Effizienz der HF-Entfernung.

- Dampfdispersion: Der Dampf (realisiert durch einen 8-Düsen-Kopf, aufwärts gerichtet, im Abstand von 16 ft (4,9 m) von der Quelle) unterbindet die Verdampfung und führt zu einer Vergrößerung des Wolkendurchmessers am Sprühwasservorhang. Zu viel Dampf kann dazu führen, dass die Wolke über die Sprühwasser Kopfhöhe reicht.

- Sprühwasser Kopfhöhe: Die Erhöhung der Sprühwasser Kopfhöhe führte zu einer leichten Verschlechterung der Effizienz der HF-Entfernung.

- Sprühwasserdüsenabstand: Größere Abstände von 2 ft (0,6 m) und 3 ft (0,9 m) sind scheinbar besser geeignet. Die technische Gestaltung war für verlässliche Ergebnisse jedoch nicht hinreichend (HF-Bypass um das Sprühwasser).

- HF Druck: Die Theorie, dass die Erhöhung des HF Druckes zu einer Erhöhung der HF Flussrate und somit, bei unveränderter Sprühwasser Flussrate, zu einer Reduzierung des HF/Sprühwasser-Verhältnisses führt, konnte nicht nachgewiesen werden. Beobachtet wurde eine Verbesserung der Effizienz der HF-Entfernung mit ansteigendem HF

[9] Petersen, R. L., Ratcliff, M. A.; „Vapor Barrier Assessment Program for Delaying and Diluting HF Vapor Clouds – A Wind Tunnel Modeling Evaluation“. 1989.

Druck. Der Grund hierfür ist unklar und liegt möglicher Weise in nicht gemessenen Variablen.

- HF Temperaturen: Bei HF Temperaturen oberhalb des Siedepunktes ist der Flüssigkeitsanteil sehr gering. Es wurden keine weiteren Messungen unterhalb des Siedepunktes durchgeführt.

- Art der Freisetzung: Eine pure Dampffreisetzung ist mit Sprühwasser scheinbar schwerer zu mindern als ein aus einem Leck freigesetztes HF-Flüssigkeit/Dampf-Gemisch. Die ermittelten Daten sind als verlässliches Ergebnis jedoch mit zu vielen Abweichungen behaftet.

- Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit: Bei den durchgeführten Tests konnte kein Einfluss von Windgeschwindigkeit (erhöht auf 6 m/s) und Luftfeuchtigkeit (erhöht auf 90 %) auf die Effizienz der HF-Entfernung festgestellt werden. Jedoch sind die ermittelten Daten als verlässliches Ergebnis nicht geeignet (fehlerhafte IFS-Messungen).

- Produktart (HF, AUA): Die Differenz im Hinblick auf die Effizienz der HF-Entfernung ist unbedeutend.

Der Bericht fasst zusammen, dass das HF/Sprühwasser-Verhältnis die bedeutendste variable Größe ist. In den Tests konnte eine Effizienz der HF-Entfernung von > 90 % bei einem HF/Sprühwasser-Verhältnis von 1:40 nachgewiesen werden.

Es wurde festgestellt, dass ein Weitwinkel-Monitor für die HF-Entfernung weniger effizient ist als ein Sprühwasservorhang mit derselben Sprühwasser Flussrate. Es wurde weiterhin festgestellt, dass der Einsatz eines Engwinkel-Monitors und die Vergrößerung seines Abstandes zur Quelle ebenfalls weniger effizient sind als ein Sprühwasservorhang mit derselben Sprühwasser Flussrate. Der Einsatz eines Spritzbleches und eines Monitors, der direkt auf die Quelle gerichtet ist, ist mit derselben Sprühwasser Flussrate so effizient wie ein Sprühwasservorhang.

Der Einsatz eines doppelten Sprühwasservorhangs im Abstand von 16 ft (4,9 m) und von 32 ft (9,8 m) von der Quelle besitzt dieselbe Effizienz der HF-Entfernung wie ein einzelner Sprühwasservorhang im Abstand von 16 ft (4,9 m) von der Quelle.

Der Einsatz eines doppelten Sprühwasservorhangs aufwärts und abwärts führte nicht zur Verbesserung der Effizienz der HF-Entfernung.

Das Anbringen einer Lexan-Platte und eines Leitbleches an der Quelle führten nicht zur Verbesserung der Effizienz der HF-Entfernung.

In der Zeitschrift **BahnTech** [185] wird über einen stationären Wasserschleier für einen Tunnel berichtet. Zwei im Abstand von einem Meter hintereinander angeordnete Sprühbogen mit Mehrfachdüsen an Decke und Wänden erzeugen ein dichtes Feld aus Wassertröpfchen, das Rauchgas und Rauchpartikel auswäscht sowie die Hitzestrahlung fast gegen Null fährt. Dieses Tröpfchenspektrum lässt nach vorhandenen Erkenntnissen und umfangreichen Versuchsergebnissen keine gefährlichen Ableitströme in Verbindung mit dem Fahrdraht entstehen.

Bara et. al. [179] berichten über die Wirkung eines Hydroschildes bei Ammoniakfreisetzungen. Als Quelle diente eine mit dem Ventil nach unten gerichtete Ammoniakflasche (Quellstärke 7,6 kg/min). Die Flüssigphase wurde in einer Metallwanne gesammelt (Poolfreisetzung). Getestet wurde ohne Hydroschild und 2 Tests in Entfernungen von 8 m. Konzentrationen wurden auf dem Versuchsfeld in 8 m Breite und maximal 35 m Quellenabstand ermittelt (Wind 2 m/s). Minderungsfaktoren (Konzentration Versuch ohne Hydroschild / Konzentration Versuch mit Hydroschild) sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Versuchsreihe	Minderungsfaktor bei jeweiliger Quellentfernung		
	x = 13 m	x = 25 m	x = 35 m
Test 1	11,5	2,1	1,4
Test 2	12,8	4,9	2,6

Im Abstand von 50 m zum Freisetzungsort ist keine Effektivität des Wasservorhangs mehr erkennbar. Die Ergebnisse werden dahin gehend interpretiert, dass nach einer bestimmten Grenzentfernung hinter dem Hydroschild der Minderungsgrad gegen Null strebt. Dies wird begründet mit dem Umfließen des Schildes und späterem Zusammenfließen der Gaswolke. Die Ammoniakwolke umfließt den Hydroschild, weil er zu schmal ist. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass das Gas unter dem Wasserschild hindurch fließen kann.

Vgl auch: Bara, A.; Dusserre, G.; Bourely, C.; Valette, T.. In: Face au Risque, 97, Heft 338, Seiten 6 – 10.
In Ales wurden Wasservorhänge bei Chemieunfällen getestet. Von ausströmendem Ammoniak wurden jenseits des Wasservorhanges in verschiedenen Abständen die Rückstände in der Luft gemessen. Die Schrankenfunktion wurde durch die freibleibenden Abstände am Boden beeinträchtigt, zum Teil entstand eine ungewollte Thermik. Windgeschwindigkeit und Feuchtigkeitsgehalt der Luft sind entscheidend. Große Tropfen eignen sich in der Nähe der Austrittsstelle eher zur Verdünnung, kleine Tropfen zur Zerstäubung. Zur Verdünnung und Verteilung der Giftgaswolke ist die Wassermenge und zur Absorption des Gases ist die Position des Wasservorhanges ausschlaggebend.

Valette, T. u. a. [186] informieren über Wasserschleier, die in Form eines Pfauenschwanzes bei ausströmendem Ammoniak eingesetzt werden. Die Wirkung des Wasserschleiers sowie die Turbulenzen der Gaswolke hängen von ihrem Abstand, der Wassermenge und der Windrichtung ab. Die Gaswolke kann gelöst, abgelenkt oder gestoppt werden. Genaue Auswirkungen der Windgeschwindigkeit ließen sich bislang nicht aufzeigen. Das Entweichen von Gas unter dem Wasserschleier hindurch lässt sich eventuell durch einen zweiten Schleier reduzieren.

Brodowic, A. I. [191] beschreibt Laborversuche zur Bestimmung der Absorption von Ammoniak durch Wasser und die Ermittlung eines Berechnungskoeffizienten der Absorption, mit welchem die Berieselungsflächennorm in Ammoniakwaschtürmen bestimmt werden kann. Für die Bestimmung des Berechnungskoeffizienten musste der Grad des Einflusses der Gas- und Flüssigkeitsgeschwindigkeit und anderer Faktoren auf den Absorptionskoeffizienten bestimmt werden. Die experimentell und rechnerisch ermittelten Werte ergaben dabei eine gute Übereinstimmung.

Pless und Wienecke [193] beschäftigen sich mit dem Aufbau eines Wasser-Aerosollöschfahrzeugs (Turbolöscher) und dessen Erprobung für den Einsatz zur Brandbekämpfung und Gefahrenabwehr in industriellen Bereichen. Im Rahmen der Forschungsaufgabe wurde der aus zwei Strahltriebwerken des Typs Larzac 02 erzeugte Abgasstrahl ver-

messen, die optimale Beladung mit Löschwasser ermittelt und die Wirksamkeit des Wasser-Abgasstrahls für die Brandbekämpfung brennbarer Flüssigkeiten auf großen Brandflächen, die Niederschlagung und Verteilung von gasförmigen Schadstoffen sowie die Kühlung heißer Flächen untersucht. Zusätzlich wurde die Druckbelüftung von Tunnelbauwerken mittels Abgasstrahl untersucht.

Loos [197] untersucht in seiner Dissertation Grundlagen der Absorption von sauren Gasen. Er modelliert den Stoffaustausch in Strahlwäschern für die Anwendung bei der Anlagenkonstruktion.

Eine **QVF-Publikation** [195] enthält Angaben zur Absorption von Chlorwasserstoff in Wasser. Das Absorptionsgleichgewicht des Systems Chlorwasserstoff/Wasser wird dargestellt. Bei geringen Salzsäurekonzentrationen ist der Partialdruck von Chlorwasserstoff sehr niedrig. Er steigt erst bei höheren Konzentrationen in der Flüssigkeit deutlich an. Die Absorption von Chlorwasserstoff in Wasser hat eine hohe Wärmetönung von etwa 2100 kJ/kg HCl. Aufgrund des S-förmigen Verlaufes der Gleichgewichtslinie kann bei der Absorption unter Siedebedingungen eine maximale Salzsäurekonzentration nicht überschritten werden. Sie beträgt bei einem Gesamtdruck von 1 bar und reiner Chlorwasserstoffzuspeisung 35 Gew.-%, wobei im praktischen Betrieb geringfügig niedrigere Werte eingestellt werden.
Im Gegensatz zum System HCl/Wasser ist bei Schwefeldioxid zu erkennen, dass im Gleichgewicht nur geringe Konzentrationen in der wässrigen Phase erreicht werden. Wasser ist demnach kein gutes Absorptionsmittel für SO_2. Die Absorptionsfähigkeit ist aber noch so groß, dass diese nicht vernachlässigt werden darf.

Die **Bundesanstalt für Materialprüfung** [196] berichtet u. a. über die mit mobilen Wasserschleiern (Hydroschild) zu verhindernde Ausbreitung von Gaswolken.
Folgende Daten werden genannt:

- Ein Liter Wasser löst bis zu 442 Liter HCl.
- Mit zunehmendem Druck und fallender Temperatur steigt die Wirkung der Absorption. Der Bunsensche Absorptionskoeffizient gibt an, wie viel Gas bei 0°C und 1013 mbar von einem Liter Flüssigkeit aufgenommen wird.
- Ein Raumteil Wasser absorbiert bei 15° 727 Raumteile Ammoniakgas, 450 Raumteile Chlorwasserstoff, 43,5 Raumteile schweflige Säure, 3,25 Raumteile Schwefelwasserstoff, 1 Raumteil Kohlensäure.
- Ammoniak bildet wegen seiner großen Affinität zu Wasser mit dem in der Luft vorhandenen Wasserdampf Salmiakgeist, der als Nebel sichtbar wird, sich am Boden ausbreitet und dort niederschlägt. 1 m^3 feuchte Luft kann auf diese Art 5 - 7 g Ammoniak binden. 1 l Wasser von 0 °C kann ca. 1 m^3 bzw. 800 g Ammoniakgas aufnehmen. Dabei tritt eine Erwärmung des Gemisches ein. Bei 20 °C sind es noch 520 g Ammoniak, die von 1 l Wasser aufgenommen werden können. Die Lösungen von Ammoniak in Wasser sind mit 10 %, 20 % oder 25 % als Salmiakgeist, Ammoniakwasser oder Ammoniumhydroxid handelsüblich.
- Da Ammoniak leichter als Luft ist, müssen für eine Lüftungsanlage die Zuluftöffnungen unten und die Abluftöffnungen oben angebracht werden. Lüftungseinrichtungen müssen von ungefährdeten Bereichen aus in Funktion gesetzt werden können. Zur Beseitigung von Ammoniakschwaden oder zur Verhinderung der Ausbreitung in andere Bereiche können Wasserschleier oder Wassersprühanlagen dienen. Bei Temperaturen unter 0 °C kann auch Sole oder ein Glyzerin-Wasser-Gemisch als Absorptionsmittel angewandt werden. Auch in Alkoholen ist Ammoniak löslich.

- Hohe Löslichkeit im Wasser z.B. bei 20 °C: 0,50 kg/l bei 5 °C: 0,75 kg/l.

Haunold [198] unterstreicht in einem Vortrag die Absorptionsfähigkeit von Feinstnebel. Ein Gramm Nebelwasser hat eine Oberfläche von ca. 0,5 m². Tensidzusatz verursacht eine lipophile Fläche und damit eine starke Senke für organisches Material, Aerosole und Gase. Die Effektivität der Anlagerung ist abhängig von der Feinheit und Menge des Nebels, von der Qualität der tensidischen Fläche und der Kontaktzeit.

Stein und Humann [74] berichten über Wasserschleier zum Verdünnen von Schwergaswolken. Für einen angenommenen Störfall in einer Propylenanlage und einer gasförmigen Freisetzung von ca. 2 kg/s in Bodennähe soll mit Hilfe eines Wasserschleiers die Konzentration von Propylen in der Luft hinter dem Schleier ca. 1 Vol.-% erreichen.
Untersucht werden die Ausbreitung von Schwergaswolken, das Lufteinsaugen in einen Wasserschleier aus abwärts gerichteten Vollkegeldüsen, Hydroschilden und aus aufwärts gerichteten Düsen. Die Dimensionierung des Wasserschleiers wird mit einem näherungsweise anwendbaren Berechnungsmodell durchgeführt. Fehlende Angaben für Hydroschilde wurden durch Messungen ermittelt. Für den Wasserschleier können 175 abwärts gerichtete Vollkegeldüsen in 5 m Höhe über dem Boden oder 30 Hydroschilde am Boden mit einer Schlitzbreite 5 mm benutzt werden. Ergänzend erfolgten Strömungsversuche bei Wind mit einer abwärts gerichteten Vollkegeldüse der Fa. Schlick und einem Hydroschild der Fa. Albach. Danach sind Hydroschilde gut in der Lage, das Schwergas einzusaugen und mit der Luft zu vermischen.

Bei Windstille wird allein durch den Wasserschleier das Einmischen von Luft erreicht. Bei Wind kann die Schwergaswolke stark verkleinert werden. Für das Vermischen und Lufteinsaugen werden der Einsatz von Hydroschild und abwärts gerichteter Vollkegeldüse diskutiert.

Martinsen [175] berichtet, dass ein Wasservorhang in Lee einer LNG-Pool Freisetzung Minderungsraten zwischen 25 % und 75 % hat.

Watts [176] diskutiert die Wirkungsweise von Wasservorhängen auf Explosionen und auf eine mögliche Änderung der Konzentration von Gaswolken. Die Zündenergien für Ethylen (7 Vol.-%) und Wasserstoff (30 Vol.-%) nahmen bei Betrieb einer Düse um den Faktor 3 – 15 bzw. 8 – 5 im Vergleich zur Zündenergie ohne Wasservorhang zu.

Eggelston et al. [177] untersuchten spezielle Eigenschaften eines Wasservorhanges mit den Versuchsgasen Vinylchlorid und Ethylen. Die Minderung der Stoffkonzentration bei diesen Gasen durch Absorption wurde als nicht relevant eingestuft.
Bei geringer Quellstärke wirkt der Wasservorhang als Barriere, bei höheren Quellstärken durchläuft das Gas den Sprühkegel und tritt stark verdünnt aus diesem rückwärts aus

Rana und Mitarbeiter [184] berichten über wirksame Sicherheitsmaßnahmen, um die Folgen einer ungewollten Freisetzung entflammbaren Erdgases (LNG) zu verhindern bzw. zu vermindern. Sprühwasservorhänge sind als wirksames Mittel zur Kontrolle und Reduzierung unterschiedlicher Gefahren in der Industrie anerkannt. Sie werden zur Absorption, Verdünnung und Verteilung von giftigen und entflammbaren Dampfwolken eingesetzt. Der Sprühwasservorhang wird bei der Brandbekämpfung von Dampfwolkenbränden auch zum Schutz gegen die Wärmestrahlung verwendet. Außerdem ist er einer der kostengünstigsten und vielversprechendsten Techniken, um LNG-Wolken zu kontrollieren. Wasservorhänge tragen zur Dispersion von LNG-Wolken hauptsächlich durch mechanische Effekte, Verdünnung und

thermische Wirkmechanismen bei. Die bei der Wechselwirkung zwischen LNG-Dampf und Sprühwasservorhang ablaufenden Vorgänge sind aus der bisherigen Forschung nicht hinreichend bekannt. An der Texas A & M University wurden Versuche zur Bekämpfung und Dispersion von LNG-Wolken durchgeführt. Der Beitrag fasst die Versuchsmethode und Versuchsergebnisse zusammen. Zwei verschiedene Typen von Wasservorhängen wurden geprüft.

Wörsdörfer, Barth und Schnatz [72] stellen Wirkungsmechanismen und entsprechende Vorbereitungs- und Planungsphasen bis zur Installation eines Wasservorhangs beispielhaft vor.
Es werden die grundsätzlichen Wirkungsweisen aufwärts und abwärts gerichteter Sprühstrahlen aus Düsen beschrieben (Verdünnungseffekte). Die Auslegung und Optimierung des Wasservorhangs erfolgt mit Hilfe eines numerischen Modells. Das verwendete numerische Modell berücksichtigt die physikalischen Wirkungsmechanismen des Wasservorhangs. Im Rahmen der Anwendung des Modells wurde untersucht, ob sich der Schadstoff in Wasser lösen kann bzw. ob eine Stoffumsetzung erfolgt. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Zeitdauer bis zur Aktivierung des Wasservorhangs (Art der Auslösung) bzw. die Zeitdauer bis der Wasservorhang nach Auslösung (Freigabe Wasserzufuhr) aufgebaut ist.

Es wird darauf verwiesen, dass die vorliegenden allgemeinen Erfahrungen bei der Auslegung und der Errichtung zahlreicher Wasservorhänge in industriellen Anlagen zeigen, dass insbesondere bei brennbaren Schwergasen (z. B. Propylen, LPG) eine ausreichende Verdünnung unter die untere Zündgrenze (UZG) erzielbar ist.

Die jeweiligen theoretischen Vorarbeiten zeigen, dass jeder Wasservorhang individuell ausgelegt werden muss. Das numerische Modell wird nicht näher genannt.

Pleß [190] wertet einen Teil der o. g. Forschungsarbeiten aus und kommt zum Fazit, dass für ein Niederschlagen von löslichen Gasen mit Wassertropfen nur etwa 7 % der maximal möglichen Löslichkeit des Gases genutzt werden kann. Ursachen für den geringen Wirkungsgrad sind unter anderem

- die schnell abnehmende Ausgangskonzentration des Gases in der Luft,
- die kurzen Verweilzeiten zwischen Gas und Wasser,
- die entstehenden Reaktionswärmen.

Das Niederschlagen von Gaswolken ist als nutzbare Möglichkeit für leichtlösliche Gase nur bei Bereitstellung hoher Volumenströme an Wasser sowie zur Verdünnung der Wolken geeignet. Bei in Wasser schwer löslichen Gasen ist eine Absorption praktisch nicht vorhanden. Sie wird auch durch Stoffzusätze im Wasser nicht wesentlich verbessert.

Eine Beurteilung der tatsächlich von den Hydroschilden/Sprühstrahlrohren angesaugten Luft ist äußerst kompliziert und kann im Detail nicht einer Lösung zugeführt werden.
Nach Berechnungen wurde abgeschätzt, dass bei Hydroschilden und Sprühstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 90° die Massenströme von Wasser und Luft etwa im Verhältnis 2:1 stehen.
Insbesondere bei Hydroschilden bleibt im Bodenbereich Schwergas zurück, während vorzugsweise die leichtere Luft in Bereichen größerer Höhe (1 – 1,5 m) angesaugt wird.

Hydroschilde können bis zu einer Zuströmgeschwindigkeit von 5 m/s als Barriere wirken. Bei größeren Quellstärken staut sich die Gaswolke am Hydroschild und fließt seitlich an diesem vorbei. Durch eine radiale Strahlform wird die Wolke seitlich auf 1 – 2 m/s beschleunigt.

Nach Feldversuchen mit Kohlendioxid kommt Pleß zu folgenden Schlussfolgerungen:
Die Störfallbegrenzung bei der Freisetzung von gefährlichen Gasen durch die Feuerwehren hängt von der mitgeführten Technik ab, z. B. von

- der Leistung der Feuerlöschpumpen,
- der Anzahl der Hydroschilde,
- der Anzahl der der Sprühstrahlrohre (Handrohr oder Monitor),
- dem Lüfteraggregat.

Wesentlichen Einfluss hat die Bereitstellung von Löschwasser vor Ort (in bebauten Gebieten 29 m³/h bis 129 m³/h). Der geringste Wasserstrom entspricht einem Durchsatz von 480 l/min, der maximale bei Anwesenheit von zwei Löschfahrzeugen vor Ort liegt bei 3200 l/min.
Mit diesen Förderströmen lassen sich je nach Taktik Schwergase (Quellstärke 2 m³/s bis 25 m³/s) auf 50 % ihrer Ausgangskonzentration verdünnen. Diese Verdünnung ist in der Regel ausreichend für eine weitere Vermischen des Schwergases mit der Atmosphäre.

Werden mehr als die bereitgestellten Förderströme an Wasser benötigt, ist mit zeitlichen Verzögerungen für den Aufbau der Wasserversorgung zu rechnen.
Die maximale Wasserabgabe im mobilen Einsatz liegt bei einem Grenzwert von 5400 l/min (3 Hydroschilde). Mit diesem Förderstrom können je nach taktischer Variante Schwergase (Quellstärken 25 m³/s – 50 m³/s) auf 50 % der Ausgangskonzentration verdünnt werden. Bei Verdünnen der Schwergaswolken unterhalb der unteren Explosionsgrenze bzw. unterhalb der toxischen Konzentration (Quellstärken <1 m³/s) können selbst bei großen Volumenströmen an Wasser nur geringe Wirkungen erzielt werden.

TechnoAlpin und **Securplan** [204] beschreiben ein System zum Niederschlagen unkontrolliert austretender Schadstoffe durch ein Verfahren, bei dem Wasser zu feinsten Aerosolen zerstäubt und mittels Hochleistungsturbinen großräumig versprüht wird.
Die erforderlichen wissenschaftlichen Forschungen und Versuche wurden am Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt in Heyrothsberge durchgeführt. In einer Testreihe im Praxismaßstab wurde die hohe Wirksamkeit des Aerosols bei der Niederschlagung und Auswaschung von gas- und rauchförmigen Schadstoffen nachgewiesen.
Bei Versuchen am Beispiel von Trichlorsilan und Siliziumtetrachlorid konnten Auswaschungsraten bis zu 75% der freigesetzten Substanzen nachgewiesen werden.

Nach dieser erfolgreichen Versuchsreihe wurden weitere Tests direkt an den Produktionsanlagen der Betriebe MEMC und EVONIK in Italien durchgeführt.
Bei allen Testläufen wurde festgestellt, dass die Technologie die Erzeugung von Aerosolbarrieren aus beweglichen Turbinen in großem Ausmaß an großen Produktionsanlagen und Werksgrenzen ermöglicht.

Das automatisch arbeitende System hat keine Aufbauzeiten, einen verhältnismäßig geringen Wasserbedarf, kann sich an die Windverhältnisse anpassen und Emissionsquellen (auch in großen Höhen) direkt bekämpfen.

6.3 Umsetzung gasförmiger Stoffe mit Wasser/Zusätzen im Wasserschleier

Ternowskaja [200] untersucht den Einfluss löslicher oberflächenaktiver Stoffe (Mersolat, Sulfanol) auf die Absorptionsgeschwindigkeit von Schwefeldioxid durch Wasser. Dabei wird

bewiesen, dass die Existenz oberflächenaktiver Stoffe zu einer bedeutenden Verringerung der Absorptionsgeschwindigkeit führt. Die Ursache der Veränderung der Absorptionsgeschwindigkeit ist dabei nicht auf die Veränderung der Oberflächenspannung des Lösungsmittels zurückzuführen, sondern sie ist in der Bildung einer Adsorptionsschicht der Moleküle des oberflächenaktiven Stoffes an der Oberfläche der Flüssigkeit zu suchen. Die Autoren nehmen eingangs eine umfangreiche Literaturauswertung zu diesem Thema vor. Anhand dieser Daten werden eigene theoretische Abhandlungen dieses Problems durchgeführt, die mit praktischen Versuchsergebnissen untermauert werden. Die Versuchsanlage wird im Einzelnen beschrieben. Die Versuchsergebnisse werden in mehreren Diagrammen und Tabellen veranschaulicht.

Engelhardt [171] unternimmt Versuche zur Absorption von Chlor durch aufwärts- und abwärts gerichtete Wasservorhänge ohne und mit Zusatzstoffen in einem speziell entwickelten Absorptionsrohr. Dabei wurden die Parameter Chlorkonzentration, Tropfengröße, Fallhöhe und Einfluss von Zusatzstoffen betrachtet.
Die Ergebnisse werden unter Verwendung theoretischer und empirischer Ansätze der Stoffübertragung auf den Wasservorhang übertragen. Untersucht werden aufwärts- und abwärts gerichtete Wasservorhänge. Als Zusatzstoffe kommen Natriumthiosulfat, Natriumhydroxid und Kaliumiodid zum Einsatz.

Für abwärts gerichtete Wasservorhänge ist auf Grund der kurzen Kontaktzeit zwischen versprühter Flüssigkeit und chlorhaltiger Gasphase die Absorption nur sehr schwach ausgeprägt. Wegen der längeren Kontaktzeit bei aufwärtsgerichteten Wasservorhängen wird in diesem Fall deutlich mehr Chlor absorbiert. Insbesondere der Einsatz von dotierter Wasservorhänge (vorzugsweise Natriumthiosulfat) trägt erheblich zur Senkung der Chlorkonzentration bei.

Für abwärts gerichtete Wasservorhänge wird eine relative Minderung der Chlorkonzentration von 1 % bis maximal 6 % angegeben; bei aufwärtsgerichteten Wasservorhängen können nach den durchgeführten Untersuchungen deutlich höhere Effekte, 12 % bis 40 % erreicht werden.

Die Wirksamkeit eines aufwärtsgerichteten Wasservorhanges ist vergleichbar mit der Wirksamkeit eines Dampfvorhangs. Vergleiche hierzu Barth [166].

Hartwig, Barth, Koopman und van Wasen [70] betrachten in einer Vorstudie, ob es ratsam erscheint, den Wirkungsgrad ammoniakdotierter Dampfvorhänge durch Versuche im technischen Maßstab zu untersuchen, z. B. das Verhalten von Phosgen bei Störfallfreisetzung in Bezug auf Ammoniak-Dampf-Vorhänge und Hydrolyse.

Drei Hauptfragen sind bei diesen Tests zu beantworten:

- Das Zeitverhalten der Ansprechzeit von Dampfvorhängen. Es zeigte sich, dass Dampfvorhänge sich so auslegen lassen, dass die Ansprechzeit akzeptable Werte erreicht.

- Das mögliche Versuchsfeld, das offensichtlich aus Sicherheitsgründen nicht in Deutschland liegen kann (Versuchsplanung für ein Gelände in den USA).

- Die Versuchskosten, die mit dem Stand 1989 abgeschätzt werden (3,45 Mio. DM).

Wichtige unbekannte Sachverhalte bei der Planung der Versuche sind

- das Zeitverhalten zwischen Leckage und Wechselwirkung des Vorhangs mit dem Schwergas,
- das Verhalten von Ammoniak innerhalb des Vorhangs,
- der Wechselwirkungsgrad von Phosgen und Ammoniak innerhalb des Wasservorhangs,
- das Hydrolyseverhalten von Phosgen im Vorhang und in der Atmosphäre.

Von großer Bedeutung ist u. a. die Aktivierungszeit (Zeitspanne vom ersten Auftritt einer Leckage bis zur vollen Wirksamkeit der störfallbegrenzenden Maßnahme). Sie unterteilt sich in mehrere Zeitanteile, die außerordentlich verschieden sein können. Wichtig ist es, jene zu senken, die am längsten ausgedehnt sind.

Formeln zur Berechnung von Dampftemperatur, Wärmekoeffizienten, Wärmeleistung, Heißdampftemperatur werden angegeben. Die Berechnungen von Konzentration-Zeit-Verläufen bei Phosgenfreisetzung werden mit DEGADIS vorgesehen.

Pleß [192] untersucht am Beispiel von Ammoniak und Kohlendioxid die Absorption von Schadgasen in reinen Wassertropfen und in Wassertropfen mit verschiedenen Zusätzen an ruhenden Oberflächen, ruhenden Tropfen, fallenden Tropfen und Wasser-Abgasstrahlen. Die Absorption von Wasser-Abgasstrahlen wurde optimiert. Die Löschwirkung des Wasser-Abgasstrahls und von Wasser mit tensidischen Zusätzen war der Gegenstand weiterer Arbeiten. Gleichzeitig erfolgte bei den Experimenten die Beurteilung der Niederschlagung von Rußpartikeln.

6.4 Verkürzung der Freisetzungsdauer von freigesetzten Gasen aus verdampfenden oder verdunstenden Flüssigkeiten

Böke und Hartwig [188] untersuchten in einem Forschungsprojekt, ob Löschschäume als wirksame Schadensminderungsmaßnahme bei einer durch einen Störfall entstandenen Lache eingesetzt werden können. Das Problem ergibt sich daraus, dass nach einer schlagartigen Freisetzung eines flüssigen Gases sowohl bei kaltverflüssigten als auch bei druckverflüssigten Gasen, hier im Anschluss an die Flash-Verdampfung, eine Lache entstehen kann. Durch eine Verminderung der Verdampfung durch eine Löschschaumabdeckung kann die Konzentration bei der anschließenden Gasausbreitung vermindert und damit die potentielle Gefährdung herabgesetzt werden. Durch die Schaumabdeckung werden die Wärmeströme in der Lache, insbesondere durch Konvektion und Strahlung, aber auch der Stofftransportprozess beeinflusst. Im Beitrag wird über experimentelle Untersuchungen im Labor und über Feldversuche berichtet.

Hartwig und Böke [160] führten Laboruntersuchungen mit der Wirkung von 18 kommerziellen Löschschäumen auf freigesetzte Stoffe (Frigene, Ammoniak, Butadien 1.3, Vinylchlorid, Chlormethan, Propan, Schwefeldioxid) durch. Großskalige Feldexperimente mit einer Flüssiggaslache wurden für Ammoniak, Propan und Frigen 114 vorgenommen.

Die Untersuchung unter Einsatz kommerzieller Löschschäume soll eine praxisnahe Umsetzung der Ergebnisse für die Feuerwehren und den Katastrophenschutz und damit eine erweiterte Störfallbekämpfungsmöglichkeit ohne zusätzliche finanzielle Belastungen ermöglichen.

Bei der Lachenverdampfung sind sowohl Stoff- als auch Wärmeaustauschprozesse mit einander verknüpft.
Der Stofftransport oberhalb einer laminaren Grenzschicht wird durch turbulente Vorgänge bewirkt, die um Größenordnungen stärker sind als der Stofftransport durch die laminare Grenzschicht aufgrund molekularer Diffusion.
Die Wärmeaustauschprozesse werden durch die Schaumabdeckung über der Lache beeinflusst. Der Wärmestrom aus der Umgebung in die Lache (Wärme aus der Luft, Wärmestrahlung) wird vermindert. Durch die Luftblasen im Schaum ist die Wärmeleitung durch den Schaum geringer. Die auftreffende Strahlung wird durch den Schaum zum Teil reflektiert und absorbiert. Bei kalten Lachen gefriert die Schaumschicht zum Teil auf der Lache und wirkt zusätzlich isolierend.

Über den verminderten Energieeintrag wird dann mittelbar auch der Stofftransport durch die Schaumschicht vermindert.
Bei einer geschlossenen homogenen Schaumschicht kann durch den Schaum kein konvektiver Stofftransport erfolgen (kein Stofftransport durch Wärmeeinwirkung).

Die Autoren stellen fest, dass für die Abdeckung einer Flüssigkeitslache sowohl Schwerschaum als auch Mittelschaum eingesetzt werden kann. Leichtschäume empfehlen sich wegen ihrer geringeren Windstabilität weniger für diesen Einsatzfall.

Hinsichtlich des Fließverhaltens wurden Proteinschäume als auch synthetische Schäume auf Tensidbasis und filmbildende Schäume (AFFF-Schäume) betrachtet.

Die Untersuchung des Fließverhaltens zeigt, dass Proteinschäume eine geringere Fließfähigkeit aufweisen als synthetische Schaummittel. Das Fließverhalten von Schäumen gibt einen Hinweis über die Fähigkeit der Schäume, weitgehend homogene Abdeckungen auf kryogenen Lachen zu bilden.

Die Untersuchung der Wasserausscheidung zeigt, dass eine Vielzahl von Schäumen eine sehr geringe Wasserauscheidung aufweist. Als geeignet werden Schäume mit einer Wasserausscheidung von unter 5 % innerhalb der ersten 10 Minuten angesehen.

Die Ergebnisse der Experimente zeigen ferner folgende Details:

- Für die ***Laboruntersuchungen*** (Flüssigkeitslachen mit einem Volumen von 700 ml und einer Oberfläche von ca. 280 cm²) wurden AFFF-Schäume eingesetzt.

  Das Verhalten der Flüssigkeitslachen wurde mit und ohne Schaumabdeckung unter Berücksichtigung von Variablen (Strahlungseinwirkung, Windeinwirkung, Lachenuntergrund) untersucht.

  Liegt keine Reaktion zwischen dem Schaummittel und der Lachenflüssigkeit vor, beruht die Verdampfungsminderung auf der Beeinflussung der Wärme- und Stofftransportprozesse durch den Schaum.

  Im Vergleich zur Stofffreisetzung aus einer Lache (Frigen 12) ohne Schaumabdeckung zeigt sich, dass das Aufbringen der Schaumabdeckung zu einem kurzzeitigen Wärmeeintrag durch das im Schaum enthaltene Wasser in die Lache mit der Folge einer kurzzeitigen gesteigerten Stofffreisetzung (Verdampfungsimpuls) führt. Nach dem Absinken

der Stofffreisetzung, bedingt dadurch, dass der Verdampfungsimpuls abklingt, ergibt sich eine Reduzierung des Stoffstroms oberhalb der Lache von ca. 18 % (Mittelschaum) bzw. ca. 15 % (Schwerschaum). Die Werte gelten für eine Windgeschwindigkeit von 0,7 m und eine Wärmestrahlung von 160 W/m² aus der umgebenden Atmosphäre.

Bei einer Ammoniak-Lache bewirkt die Reaktion von Ammoniak mit dem im Schaum enthaltenen Wasser eine weitere Absenkung der Stofffreisetzung.

- Für die ***Feldversuche*** wurden Ammoniak und Propan eingesetzt, eine künstlich berandete Lache mit einer Oberfläche von 2 m² (Wanne) und starker Bodenisolierung.

  Bei den Versuchen mit Ammoniak war die verdampfungsmindernde Wirkung bei synthetischen Schaummitteln ohne filmbildende Eigenschaften am höchsten.

  Es werden die Wärmeeinwirkungen (Wärmeströme) bei ungestörter Verdampfung betrachtet sowie die Veränderungen der Wärmerandbedingungen bedingt durch das Aufbringen der Schaumdecke.

  Für die Anwendung einer Schaumabdeckung bei einer durch einen Störfall entstandenen Lache ist die Betrachtung der Auswirkung der erhöhten Verdampfung nach dem Schaumauftrag auf die Schwergasausbreitung wichtig.

  Die Untersuchungen und deren Auswertung zeigen, dass eine Schaumabdeckung zur Verdampfungsminderung führt, d. h. die Konzentration des freigesetzten Stoffes über die Entfernung in Ausbreitungsrichtung ist, zeitabhängig, deutlich niedriger als bei einer Lache ohne Schaumabdeckung. Der Einfluss der kurzzeitigen Erhöhung der Verdampfung nach dem Schauauftrag ist bei Betrachtung der Ausbreitungssituation aufgrund Verdampfungsminderung durch den Schaum eher gering. Mit zunehmender Zeit beeinflusst nur die verdampfungsmindernde Wirkung der Schaumabdeckung die Gasausbreitung.

Zusammenfassend stellen die Autoren fest, dass eine Abdeckung einer kryogenen Flüssiggaslache mit Schaum eine sinnvolle Maßnahme darstellen kann, die Verdampfungsrate zu vermindern. Eine Schaumabdeckung empfiehlt sich bei Lachen, die eine Verdampfungsdauer von mehr als 15 Minuten im nicht abgedeckten Zustand bei einer Flüssigkeitshöhe von mehr als 5 cm haben. Wichtig für eine effektive Abdeckung ist, eine über die Verdampfungszeit geschlossene Schaumdecke. Treten Löcher auf, so soll nachbeschäumt werden.

Aufgrund der höheren Dichte von Schwerschaum trägt dieser mehr Energie in die Lache ein und ist deshalb im Vergleich zu Mittelschaum weniger geeignet, hat aber den Vorteil windstabiler zu sein.

Böke und Hartwig [172], [173] berichten ferner über die Wirksamkeit der Schaumabdeckungen in Abhängigkeit von der Schaumdichte.

7 Diskussion von Vorschlägen zur Ermittlung der Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen

7.1 Ergebnisse der Recherchen

Die Wirksamkeit begrenzender Maßnahmen bei Störfällen mit gasförmigen Stoffen wird in den recherchierten Störfallberichten lediglich allgemein beschrieben. Aussagen zur Quantifizierbarkeit solcher störfallbegrenzender Maßnahmen wurden in den Berichten von ZEMA, MARS, OECD, CSB nicht dokumentiert. Als Fazit einer Auswertung von Störfallberichten zu freigesetzten toxischen gasförmigen Stoffen in die Atmosphäre wird festgestellt: Für eine Bewertung der Wirksamkeit von störfallbegrenzenden Maßnahmen durch Messungen der Konzentrationen lassen sich keine nachvollziehbaren Erkenntnisse gewinnen.

In den recherchierten Sicherheitsberichten, internen und externen Notfallplänen wird – angepasst an die jeweiligen Gefahrenanalysen - die Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen als allgemeines Gefahrenabwehrgut ohne Quantifizierungsangaben vorausgesetzt.

Aus den Recherchen zu Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Abschnitt 6.2 (Absorptions-/Verdünnungseffekte mit stationären und mobilen Wasserschleiern, Hydroschilden) können folgende Erkenntnisse hinsichtlich der Quantifizierung der Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen abgeleitet werden:

1. Wassersprays und Hydroschilde sind zur Störfallbegrenzung erfahrungsgemäß wirksam. Deutlich werden jedoch gravierende Unterschiede bei der quantitativen Auswertung der Ergebnisse. Es zeigen sich stoff-, anlagen-, orts- und wetterspezifische Einflussfaktoren für die Minderung freigesetzter Gefahrstoffwolken.
   Die besten nachvollziehbaren Wirkungen ließen sich mit Wasseraerosolen erreichen, die mittels beweglicher Turbinen erzeugt werden [204].

2. Eine verallgemeinerungswürdige, alle gasförmigen gefährlichen Stoffe und Bedingungen umfassende quantitative Bewertung der Wirksamkeit von Wassersprays und Hydroschilden ist nicht möglich.

Die vorliegenden Arbeiten zeigen ferner, dass Zusätze, die mit den freigesetzten Gasen im Wasserschleier reagieren (Abschnitt 6.3), die Wirksamkeit erheblich verbessern. Hinsichtlich der Quantifizierbarkeit störfallbegrenzender Maßnahmen gibt es keine weiterführenden Ergebnisse. Mitunter können wirtschaftliche Aspekte den Zusatz der wirkungsvollsten Chemikalien einschränken.

Das Abdecken von verdunstenden Lachen mit Löschschaum ist eine sehr wirksame Maßnahme, um die Verdunstungsrate erheblich zu senken.
Geeignet ist auch die Rekondensation bei Freisetzung druckverflüssigter Gase als Möglichkeit einer Einschränkung der Verdunstungsgeschwindigkeit.

Feldversuche zur Bewertung der Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen sind bekanntlich sehr aufwendig. Die recherchierten Publikationen behandeln in erster Linie die Modellierung einer Freisetzung, Ausbreitung und Zerteilung/Verdünnung von Gaswolken.

Aus den Forschungs- und Entwicklungsberichten (z. T. auf der Grundlage von Feldversuchen) über die Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen kann geschlussfolgert werden,

dass mannigfaltige Faktoren die Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen und damit deren Quantifizierung beeinflussen:

- Standort der Anlage,
- Zeitfaktor (Zeit bis zum Wirksamwerden einer Gegenmaßnahme),
- Orografie und Bebauung in der Umgebung,
- Stoffeigenschaften (Stoffzustand, Reaktionsfähigkeit, Wasserlöslichkeit u. a.),
- Art der Freisetzung gefährlicher Stoffe,
- Wetter,
- Passive Vorkehrungen (Konstruktion der Anlagen, Regelwerk),
- Technologie der Störfallbegrenzung (Art der Maßnahme und deren Anwendung, Geräte, Positionierung zur Freisetzungsquelle, Technik der Lufteinmischung, Tropfengröße, -verteilung, -geschwindigkeit).

Generell wird deutlich, dass die Störfallabwehr ein komplexer Prozess ist. Sie wird vordergründig bestimmt von

- der Wirksamkeit einer vorgehaltenen passiven Maßnahme,
- dem Zeitfaktor von der Entstehung einer Freisetzung bis zum Beginn einer zielgerichteten Abwehr,
- der Anwendungstechnik der Begrenzungsmaßnahme,
- den Stoffeigenschaften bei einer Freisetzung.

Für quantitative Aussagen zur Wirksamkeit einer Störfallbegrenzung sind auf Grund der vielen Einflussfaktoren Einzelfallbetrachtungen erforderlich.

In zu Grunde gelegten Dennoch-Störfall-Szenarien sollten zu Methoden der Begrenzung auch der Zeitfaktor bis zum Beginn einer Abwehrhandlung Beachtung finden.

Eine Messung gefährlicher Konzentrationen im akuten Störfall ist generell problematisch (Ausrüstung). Nur bei großen Störfällen kann eine Abschätzung auch mit komplexen Methoden von zugeführten Spezialkräften durchgeführt werden, aber Hauptrichtung für die Auswertung der Messergebnisse bleibt: schnelle Entscheidungsfindung und Planung der begrenzenden Maßnahmen.

7.2 Vorschläge für die Anwendung von Aspekten der Störfallbegrenzung

Störfallbegrenzende Maßnahmen in Sicherheitsberichten

Da in den vorliegenden Sicherheitsberichten für Betriebsbereiche störfallbegrenzende Maßnahmen als wirksam nur vorausgesetzt werden, sollte Einfluss genommen werden, dass

störfallbegrenzende Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit auch nachvollziehbar begründet werden (z. B. bei der Prüfung von Sicherheitsberichten oder bei der künftigen Novellierung der Störfall-Verordnung).

Störfallbegrenzende Maßnahmen in internen und externen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen

Die im Leitfaden SFK-GS-45 „Schnittstelle Notfallplanung“ empfohlenen Kriterien zur Ermittlung von Gefährdungsbereichen für den objektbezogenen Planungsbereich sollten unter Berücksichtigung folgender Präzisierungen weiter angewendet werden:

1. Die Wirksamkeit der vorhandenen/geplanten technischen und organisatorischen Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen sollte detaillierter untermauert werden. Bei einem Szenarium sollte für störfallbegrenzende Maßnahmen der Zeitfaktor berücksichtigt werden, d. h. die Zeitspanne vom Beginn der Freisetzung bis zum Abschwächen ursprünglich festgestellter Auswirkungen, je nachdem, wie die konkrete Vorbereitung des Betriebspersonals, der Werkfeuerwehr, einer zuständigen Berufs- bzw. freiwilligen Feuerwehr festgestellt und erprobt wurde.

   t_1 Zeit von der Wahrnehmung der Quelle bis zur Alarmierung
   t_2 Zeit bis zum Ausrücken der Abwehrkräfte
   t_3 Zeit der Ankunft an der Quelle und Beginn der Abwehrmaßnahme
   t_4 Zeit bis zur vollständigen bzw. objektiv teilweisen Minderung des Quellterms (Messungen bzw. Abschätzung der Minderung durch die jeweilige Maßnahme)

   $$t_{gesamt} = \sum_{n=1}^{4} t_n$$

   a) Problem: Wie ist der prozentuale Rückgang der Auswirkung an der „Quelle“. In welcher Zeit, in welchem Umfang wird die Auswirkung reduziert.

   b) Problem: Fähigkeiten und Fertigkeiten der Einsatzkräfte für die Einsatzmethode.

   Diese Angaben sind generell orts-/betriebsbezogen und nur aus praktischen Erprobungen vor Ort ableitbar. Auch die Fertigkeiten lassen sich mit Zeitmessungen bei Übungen bestimmen.

2. Die Auswirkungen sollten bei Freisetzung toxischer gefährlicher Stoffe nicht nach dem AEGL2 für eine Stunde, sondern nach dem entsprechenden AEGL2 der jeweils zutreffenden Zeitspanne beurteilt werden.

7.3 Berechnung von Schutzflächen / Schutzabständen z. B. im Rahmen der Bauleitplanung

Im Prinzip sollten für Abstandsfestlegungen die bei der Notfallplanung für einen objektbezogenen Planungsbereich vorgeschlagenen Detaillierungen berücksichtigt werden.

Gleichzeitig sollte ermöglicht werden, dass im Genehmigungsverfahren ein Betreiber Vorschläge für eine Festlegung von Abständen unterbreiten kann, wenn durch ein entsprechendes Sachverständigengutachten plausibel begründet wird, dass durch störfallbegrenzende

passive Maßnahmen, die über das Vorschriftenwerk hinaus gehen, ein sicherer Abstand entsprechend den Empfehlungen der Seveso-II-Richtlinie ermöglicht wird.

In Sonderfällen kann es bei bestehenden Anlagen auch erforderlich werden, über spezielle Sachverständigengutachten zusätzliche technische und/oder organisatorische Maßnahmen zu empfehlen (z. B. im Rahmen der Bauleitplanung Brandschutzmauern bei potenziellen Tankbränden für die Begrenzung der Wärmestrahlung auf schützenswerte Objekte).

Prinzipiell sollten für Abstandsregelungen Änderungen durch Konkretisierung der Schadensprognosen in Betracht gezogen werden. Im folgenden Beispiel wird die humantoxische Bewertung der Szenarien betrachtet:

Im Leitfaden für die Bauleitplanung (vgl.[207]) wird für die Festlegung des Grenzbereiches bei humantoxischen Wirkungen der AEGL 2 für eine Stunde empfohlen.

Wenn durch störfallbegrenzende Maßnahmen die Freisetzungszeit verkürzt und / oder der Quellterm verringert wird; der Grenzbereich aber weiterhin auf der Grundlage des AEGL 2 für eine Stunde berechnet wird, so kann der Fall eintreten, dass die störfallbegrenzenden Maßnahmen nicht oder nur unwesentlich zur Verkleinerung des Grenzbereiches führen.

Beispiel: Freisetzung von Blausäure

Aus einem Behälter läuft eine größere Menge Blausäure aus. Die Blausäure hat eine Temperatur von 5 °C. Es bildet sich eine Lache, aus der Cyanwasserstoff verdunstet und sich auf dem Luftweg ausbreitet. Bei nachfolgend betrachteten Situationen sind die Modellparameter gleich (mittlere Annahmen) – es geht um den Vergleich der Situationen.

Situation 1 – ohne Gegenmaßnahmen:
Ohne Gegenmaßnahmen würde sich ein Quellterm von 689 g/s ergeben; die Verdunstungszeit würde 126 min betragen. Die Grenzentfernung, in der der AEGL 2 für 60 min zu keiner Zeit überschritten wird, beträgt 778 m. Der Konzentrationsverlauf in diesem Aufpunkt ist in Abbildung 1 wiedergegeben.

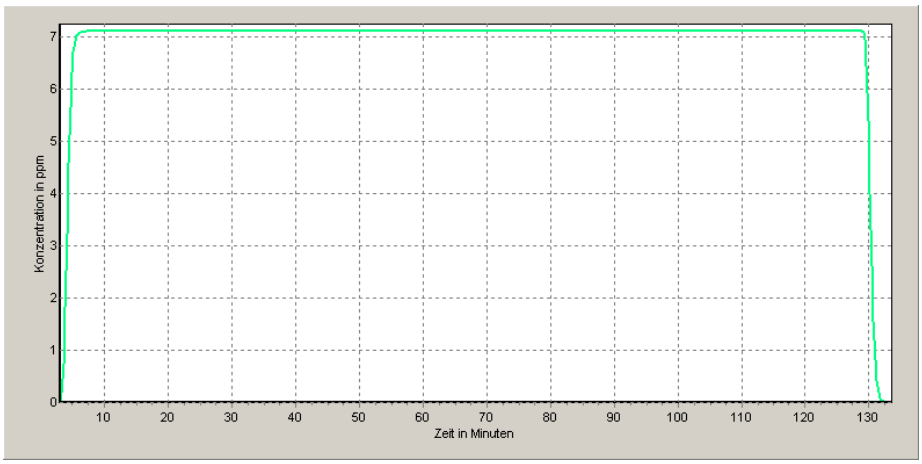

Abbildung 1: Situation 1 - ohne Gegenmaßnahmen: Konzentrationsverlauf in einer Entfernung von 778 m vom Freisetzungsort (AEGL 2 für 60 min – 7,1 ppm)

Situation 2 – Berücksichtigung von Gegenmaßnahmen:
Die Werkfeuerwehr legt nach 10 min einen Schaumteppich über die Lache, so dass nur noch 10 % des ursprünglichen Massenstroms freigesetzt werden; nach 30 min kann die Freisetzung vollständig unterbunden werden (Abbildung 2).

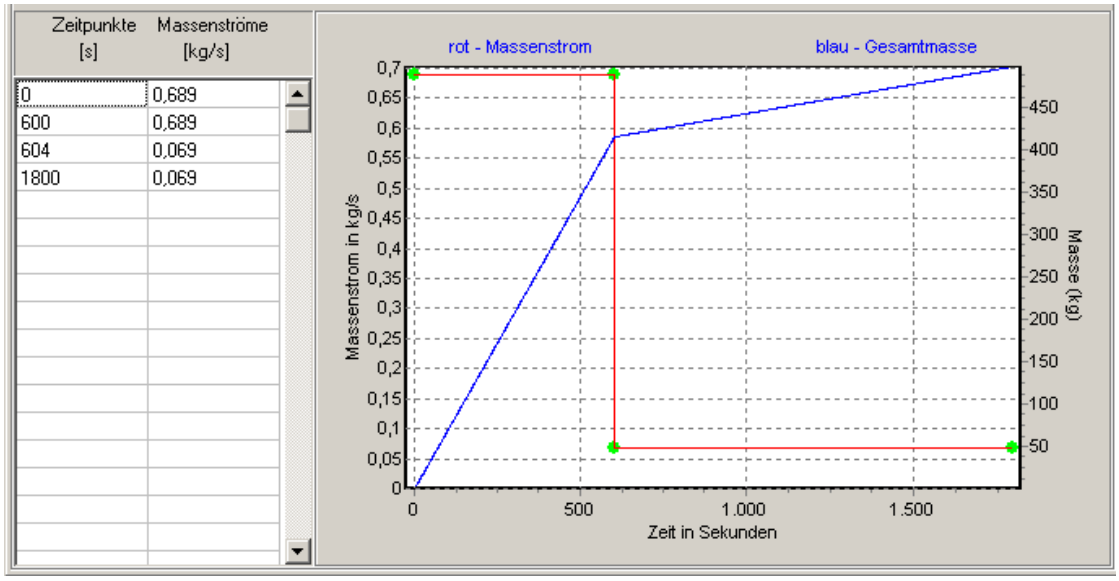

Abbildung 2: Quellterm unter Berücksichtigung der Gegenmaßnahmen

Bei diesem Quellterm liegt die Grenzentfernung, in der der AEGL 2 für 60 min zu keiner Zeit überschritten wird, bei 770 m; also nur geringfügig unter der Grenzentfernung nach Situation 1, weil sich bereits nach kurzer Zeit ein stationärer Zustand eingestellt hat. Der Konzentrationsverlauf in diesem Aufpunkt ist in Abbildung 3 wiedergegeben.

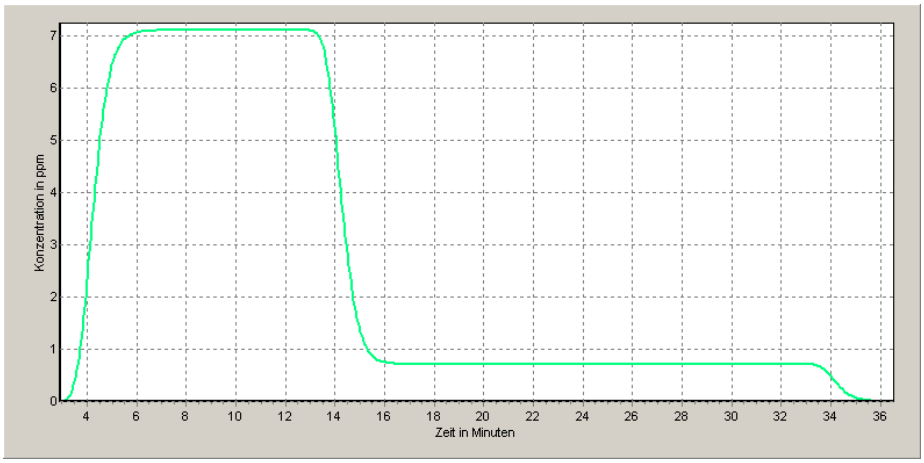

Abbildung 3: Situation 2 - mit Gegenmaßnahmen: Konzentrationsverlauf in einer Entfernung von 770 m vom Freisetzungsort (AEGL 2 für 60 min – 7,1 ppm)

Wird in der Situation 2 – mit Gegenmaßnahmen als Referenzwert der AEGL 2 für 10 min gewählt (das ist etwa die relevante Wirkungsdauer), so ergibt sich eine Grenzentfernung, in der dieser Wert zu keiner Zeit überschritten wird, von 454 m (Abbildung 4).

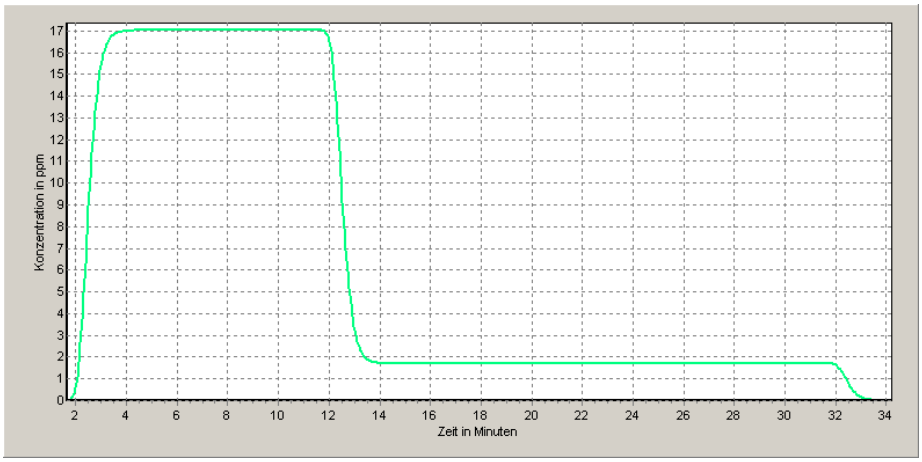

Abbildung 4: Situation 2 - mit Gegenmaßnahmen: Konzentrationsverlauf in einer Entfernung von 454 m vom Freisetzungsort (AEGL 2 für 10 min – 17 ppm)

Humantoxische Bewertung

Dieses Beispiel, das für viele praktische Anwendungsfälle steht, wirft die Frage nach den zu verwendenden Referenzwerten und Referenzzeiten für die Prognose von Schutz- und anderen Abständen auf.

Diese Problematik wurde im Forschungsprojekt [205] und in der Veröffentlichung [206] ausführlich erörtert; hier wird die dort entwickelte bzw. dargelegte Methodik angewandt.

Bei der Ableitung von AEGL wird in verschiedenen Fällen eine sogenannte „Skalierungskonstante“ verwendet.

Für Cyanwasserstoff wird diese mit $k_{HCN,\ AEGL\ 2}$ = 3000 $ppm^2 \cdot$ min angegeben.

Die Bewertung der Kurvenverläufe in diesem Abschnitt (siehe oben) in der Form

$$E_{tox} = \int \left[C(t)\right]^2 \cdot dt \qquad (1)$$

und der Vergleich mit der Skalierungskonstanten (jeweils Division von E_{tox} durch $k_{AEGL\ 2,\ HCN}$) ergibt den „Relativen toxischen Effekt“:

$$e_{tox} = \frac{E_{tox}}{k_{HCN,\ AEGL\,2}} = \frac{\int \left[C(t)\right]^2 \cdot dt}{k_{HCN,\ AEGL\,2}} \qquad (2)$$

$e_{tox} \leq 1$ – Der toxische Effekt erreicht das Niveau der Skalierungskonstanten oder liegt darunter
(für den betreffenden Referenzwert zulässig).

$e_{tox} > 1$ – Der toxische Effekt liegt über dem Niveau der Skalierungskonstanten
(für den betreffenden Referenzwert unzulässig).

Für die berechneten Konzentrationsverläufe werden die relativen toxischen Effekte bestimmt:

1. Situation 1 - ohne Gegenmaßnahmen:
   Konzentrationsverlauf in einer Entfernung von 778 m vom Freisetzungsort (AEGL 2 für 60 min – 7,1 ppm). Relativer toxischer Effekt: 2,105 – nicht zulässig

2. Situation 2 - mit Gegenmaßnahmen:
   Konzentrationsverlauf in einer Entfernung von 770 m vom Freisetzungsort (AEGL 2 für 60 min – 7,1 ppm). Relativer toxischer Effekt: 0,163 - zulässig

3. Situation 2 - mit Gegenmaßnahmen: Konzentrationsverlauf in einer Entfernung von 454 m vom Freisetzungsort (AEGL 2 für 10 min – 17 ppm). Relativer toxischer Effekt: 0,954 – zulässig

4. Die Grenzentfernung für einen relativen toxischen Effekt von 1 wird für eine Entfernung von 448 m berechnet (der geringe Unterschied zu den 454 m im vorigen Punkt 3 kann nicht verallgemeinert werden).

Das betrachtete Beispiel zeigt die Reserven bei der Anwendung des AEGL – Konzeptes. Die nach dem Leitfaden in der Bauleitplanung ermittelten Schutzabstände liegen deutlich höher als nach der betreffenden Skalierungskonstanten des AEGL – Konzeptes; in diesem Beispiel 770 m gegenüber 448 m.

Die Schlussfolgerung daraus ist, dass die Verringerung des Quellterms (Zeit und/oder Stärke) auch angepasste Konzepte in der humantoxischen Bewertung erfordert.

Dafür sind entsprechende Voraussetzungen zu schaffen, da die Skalierungskonstante nur für ausgewählte AEGL vorliegt bzw. abgeleitet werden kann.

7.4 Vorschläge für weiterführende Untersuchungen

Zur Weiterführung von Untersuchungen zur Effizienz störfallbegrenzender Maßnahmen werden folgende Vorschläge unterbreitet:

1. Labor- oder Feldversuche zum Nachweis der Effizienz störfallbegrenzender Maßnahmen (Messwerte und Sachverständigengutachten) sollten bei Notwendigkeit seitens der Betreiber sicherheitsrelevanter Anlagen dann durchgeführt werden, wenn diese eine sinnvolle Abstandsregelung im Rahmen der Bauleitplanung begründen wollen.

2. Entwicklung handhabbarer Berechnungsmethoden, mit denen die Auswirkungen störfallbegrenzender Maßnahmen berücksichtigt werden können. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist die humantoxische Bewertung von Konzentrations-Zeit-Verläufen in relevanten Entfernungen von Quellorten (vgl. dazu das Beispiel in Abschnitt 7.3). Die Konsequenzen sollten an einem konkreten Beispiel der Bauleitplanung aufgezeigt werden.

Wolfgang Kaiser

Dr. rer. nat. Wolfgang Kaiser
Sachverständiger nach § 29a BImSchG

TÜVRheinland® 66518 Industrial Services

8 Verzeichnis der Literaturquellen

[1] Sicherheitsbericht eines Betreibers (anonymisiert laut Datenschutz, Nr. 1), 2009
[2] Nach Angaben eines Betreibers, (anonymisiert laut Datenschutz, Nr. 2), 2009
[3] ZEMA 18.12.1988
[4] ZEMA 06.11.1991
[5] ZEMA 29.07.1993
[6] ZEMA 08.02.1996
[7] ZEMA 04.10.1984
[8] ZEMA 06.08.1981
[9] ZEMA 08.02.1984
[10] ZEMA 18.12.1988
[11] ZEMA 23.10.1992
[12] ZEMA 19.06.1996
[13] ZEMA 30.09.1998
[14] ZEMA 24.05.1994
[15] ZEMA 18.08.1995
[16] ZEMA 19.04.1996
[17] ZEMA 19.08.1996
[18] ZEMA 24.10.1998
[19] ZEMA 29.10.1991
[20] ZEMA 28.05.1992
[21] ZEMA 18.08.1992
[22] ZEMA 25.05.1994
[23] ZEMA 26.07.1987
[24] ZEMA 18.01.1985
[25] ZEMA 05.06.1989
[26] Aufzeichnungen TÜV Ostdeutschland (Ereignis März 1988)
[27] ZEMA 30.05.1981
[28] ZEMA 31.05.87
[29] ZEMA 07.10.88
[30] ZEMA 07.11.88
[31] ZEMA 19.09.90
[32] ZEMA 07.11.90
[33] ZEMA 26.11.91
[34] ZEMA 06.01.93
[35] ZEMA 18.02.93
[36] ZEMA 02.04.93
[37] ZEMA 17.04.93
[38] ZEMA 13.05.93
[39] ZEMA 29.07.93
[40] ZEMA 16.09.93 (vgl. auch Bericht Dr. Schupp vom 22.09.1993, 1993_09_19.pdf)
[41] ZEMA 18.09.93
[42] ZEMA 18.02.94
[43] ZEMA 24.05.94
[44] ZEMA 06.06.94
[45] ZEMA 25.07.95
[46] ZEMA 26.01.98
[47] ZEMA 17.07.98
[48] ZEMA 17.07.99
[49] ZEMA 21.12.99

[50] ZEMA 22.01.00
[51] ZEMA 03.06.02
[52] ZEMA 22.09.04
[53] ZEMA 05.09.05
[54] Zusammenstellung aus den internen und externen Notfallplänen, die seitens TÜV Rheinland erstellt wurden
[55] Externe Notfallpläne (erstellt von TÜV Rheinland), (anonymisiert laut Datenschutz Nr. 3)
[56] Interne und externe Notfallpläne für Läger, erstellt von TÜV Rheinland, Nr. 4
[57] Interner Notfallplan eines Unternehmens (anonymisiert laut Datenschutz Nr. 5)
[58] Sonderschutzplan eines Landkreises für ein Chemieunternehmen (anonymisiert laut Datenschutz, Nr. 6)
[59] Sicherheitsbericht eines Betreibers (anonymisiert laut Datenschutz, Nr. 7)
[60] Sicherheitsbericht eines Betreibers (anonymisiert laut Datenschutz, Nr. 8)
[61] Sicherheitsbericht eines Betreibers (anonymisiert laut Datenschutz, Nr. 9)
[62] Gefahrenabwehrplan eines Unternehmens (anonymisiert laut Datenschutz, Nr. 10)
[63] Sicherheitsbericht eines Betreibers (anonymisiert laut Datenschutz, Nr. 11)
[64] Sicherheitsbericht eines Betreibers (anonymisiert laut Datenschutz, Nr. 12)
[65] Interner Notfallplan eines Unternehmens (anonymisiert laut Datenschutz, Nr. 13)
[66] Deutscher Verband Flüssiggas e.V.: Ermittlung und Analyse der Risiken von Störfällen (Muster-Katastrophenschutzbetrachtung)
[67] ZEMA 04.01.02
[68] ZEMA 17.03.04
[69] ZEMA 21.08.06
[70] Hartwig, S.; Barth, U., H.; Koopman, R.; van Wasen, V.: Verhalten von Phosgen bei Störfallfreisetzung in Bezug auf Ammoniak-Dampf-Vorhänge und Hydrolyse (Vorstudie)
[71] Hartwig, S., Klumpe, G.: Ausbreitung schwerer Gase in dicht bebautem Industriegelände, Staub – Reinhaltung der Luft 51 (1991), S. 169 – 174
[72] Wörsdörfer, K., Barth, U., Schnatz, G.: Dimensionierung von Wasservorhängen, TÜ Bd. 32, 1991, Nr. 12 - Dezember
[73] Seifert, H.; Giesbrecht, H.: Dampfvorhänge als Sicherheitseinrichtung gegen bodennahe Gasausbrüche, Chem. Ing.-Tech. 57 (1985) Nr. 3, S. 250-251
[74] Stein, A. Humann, W.: Wasserschleier zum Verdünnen von Schwergaswolken, TÜ, Bd. 32 (1991), Nr. 10, S. 355-365
[75] DE19960165C2 20.12.2001 Titel Mobiler Wasservorhang mit Standard-Feuerwehranschlüssen erzeugt durch flexible Spezialschläuche mit Düsen zum Einsatz auch bei orographisch und technisch schwierigen Gegebenheiten
Anmelder Hartwig, Sylvius, Univ.-Prof. Dr., 42119 Wuppertal, DE; Puls, Edgar, Dipl.-Ing., 42369 Wuppertal, DE
Erfinder Hartwig, Sylvius, Univ.-Prof. Dr., 42119 Wuppertal, DE; Puls, Edgar, Dipl.-Ing., 42369 Wuppertal, DE
DE-Anmeldedatum 14.12.1999, DE-Aktenzeichen 19960165, Offenlegungstag 06.09.2001, Veröffentlichungstag der Patenterteilung 20.12.2001, Veröffentlichungstag im Patentblatt 20.12.2001, IPC-Hauptklasse A62B 15/00, IPC-Nebenklasse A62C 2/08 A62B 29/00
[76] Chan, S. T.: A Three-Dimensional Model for Simulating Atmospheric Dispersion of Heavy-Gases Over Complex Terrain, UCRL-JC-127475, 10th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the Air and Waste Management Association.Phoenix, Arizona, January 11–16, 1998
[77] MARS 04/26/1998

[78] MARS 09/07/1999
[79] MARS 07/21/2000
[80] MARS 01/05/2004
[81] MARS 06/16/2007
[82] MARS 01/04/2005
[83] MARS 20/02/1986
[84] MARS 04/24/1987
[85] MARS 06/07/1989
[86] MARS 11/06/1991
[87] MARS 16/12/1994
[88] MARS 08/02/1996
[89] MARS 24/09/1996
[90] MARS 06/08/1981
[91] MARS 08/02/1984
[92] MARS 25/04/1985
[93] MARS 13/02/1986
[94] MARS 20/02/1986
[95] MARS 24/02/1987
[96] MARS 29/10/1987
[97] MARS 17/01/1990
[98] MARS 29/01/1990
[99] MARS 01/02/1992
[100] MARS 20/02/1995
[101] MARS 22/04/1998
[102] MARS 17/07/1998
[103] MARS 17/10/1989
[104] MARS 20/12/1999
[105] MARS 29/05/2003
[106] MARS 11/03/1986
[107] MARS 15/05/1986
[108] MARS 07/08/1992
[109] MARS 07/10/1997
[110] MARS 26/10/1986
[111] MARS 16/05/1988
[112] MARS 07/06/1989
[113] MARS 13/05/1993
[114] MARS 24/08/1996
[115] MARS 18/09/1993
[116] MARS 01/03/1995
[117] MARS 18/09/1996
[118] MARS 09/04/2008
[119] MARS 19/05/1985
[120] MARS 11/10/1991
[121] MARS 06/05/1995
[122] MARS 26/08/1996
[123] MARS 17/10/1999
[124] MARS 05/12/1999
[125] MARS 08/03/2000
[126] MARS 14/05/2004
[127] MARS 06/07/2006
[128] MARS 16/06/2007

[129] MARS 17/08/1988
[130] MARS 09/01/1989
[131] MARS 13/12/1990
[132] MARS 26/11/1991
[133] MARS 04/12/2000
[134] MARS 06/10/2000
[135] MARS 06/08/1983
[136] MARS 15/05/1986
[137] MARS 15/03/2006
[138] MARS 23/08/2007
[139] MARS 26/09/1987
[140] MARS 07/10/1988
[141] MARS 18/03/2003
[142] MARS 28/02/2004
[143] MARS 07/11/1992
[144] MARS 25/04/2004
[145] MARS 15/06/1990
[146] MARS 27/09/2001
[147] MARS 09/04/1989
[148] MARS 29/11/1990
[149] MARS 19/09/1990
[150] MARS 25/05/1991
[151] MARS 02/04/1993
[152] Poll, F; Söldner, W: Brandwacht 7/1989, S. 154-158
[153] StMLU, Länderausschuss für Immissionsschutz, 10. – 12.04. 1989
[154] Staatliches Amt für Umweltschutz Dessau/Wittenberg, Bericht 24.05.1993
[155] Staatliches Amt für Immissions- und Strahlenschutz Darmstadt, 14.01.1994, Gutachten
[156] Rheinische Post, Nr. 119, 25.05.1994
[157] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen an BMU 27.02.96, 1996_02_08.pdf
[158] Pressemitteilung von Chemetall, 1998_07_17.pdf
[159] Puls, E., Hartwig, S.: Großskalige Feldversuche zur Untersuchung der erzwungenen Dispersion von Schwergaswolken durch technisches Feuerwehr-Gerät - Ein Geräte-Vergleich von Wirkungsgraden zur Gaskonzentrationsminderung, 5. Fachtagung Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit, 11.2000
[160] Hartwig, S. Böke, J.: Einsatz von Löschschäumen. Konsequenzminderung bei einer durch einen Störfall entstandenen Flüssiggaslache, Wissenschaft und Technik, Bd. 46 Heft 11, November 1993
[161] Naue, Gert: Schadgasverdünnung durch rotierende Freistrahlen, 12. Köthener Rührerkolloquium 2009, Vortragssammlung
[162] Ritter, Dr. J., Klopp, R.: Mit Hochdruck gegen Schwergas-Emissionen, fluid 5/2005
[163] Puls, Edgar: Ermittlung des Wirkungsgrads von Hydroschilden im Vergleich mit anderen technischen Vorrichtungen zur Dispersion schwerer Gase, Dissertation Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich Sicherheitstechnik, 2002
[164] Dandrieux, A.; Dusserre, G.; Ollivier J.: Small scale field experiments of chlorine dispersion, Journal of Loss Prevention in the process industries, 2002
[165] TRD 452 Anlagen zur Lagerung von druckverflüssigtem Ammoniak für Dampfkesselanlagen; - Aufstellung, Ausrüstung, Betrieb -, Sicherheitsbericht Rev. 4 / 2002

[166] Barth, Uli H.: Experimentelle Untersuchung der Wirksamkeit von Dampfvorhängen zur Schadensminimierung bei störfallfreigesetzten schweren Gasen mit großskaligen Feldversuchen. Düsseldorf 1990: VDI Verlag, Reihe 15: Umwelttechnik Nr. 72

[167] 9. Fortschreibung des Sicherheitsberichts für die Akzo Nobel Functional Chemicals, September 2010

[168] Sicherheitsbericht eines Betreibers, Nr. 14 (gesondertes Verzeichnis laut Datenschutz)

[169] Barth, U.; Hartwig, S.; Heudorfer, W.: Untersuchung über Möglichkeiten und Nutzen des Einsatzes von Systemen zur Erzeugung der erzwungenen Dispersion bei Freisetzung von potenziell gefährlichen Gasen aus technischen Industrieanlagen sowie deren Modellierung. Bergische Universität Wuppertal, Forschungsbericht für das BMFT, 1987.

[170] TRwS 133/ Flachbodentanks zur Lagerung wassergefährdender Flüssigkeiten, Abschnitt 4.4.7

[171] Engelhardt, F.: Chlorabsorption an fallenden Tropfen und Übertragung auf Wasservorhänge, 2002, Dissertation Uni Wuppertal

[172] Böke, J.; Hartwig, S.: Einsatz von Schäumen zur Konsequenzminderung bei Störfällen mit tiefkalten Flüssigkeiten: in: Hartwig, S.: Schwere Gase und Sicherheitsanalyse – IV Batelle Eigenverlag, Frankfurt a. M., 1992

[173] Böke, J.; Hartwig, S.: Experimente und Untersuchungen zur Reduzierung der Verdampfungsrate bei Unfallfreisetzungen von kryogenen Stoffen aus Industrieanlagen, Abschlussbericht für BMFT, Wuppertal 1992

[174] Jeuling, J.: Bestrijding van Ammoniakkongevallen (Bekämpfung von Ammoniakunfällen), Ministerie von Binnenlandse Zaken, Directie Brandweer, Inspectie voor het Brandweerwezen, Afdeling Bestrijdungs- en Hulpverleningstechniek_Gravenhage 1984

[175] Martinsen, zitiert nach [173]

[176] Watts, J. W.: Effects of Waterspray on Unconfines Flammable Gas. Loss Prevention; 1976, S. 48-54

[177] Eggelston, L. A; Herrera, W. R.; Pish, M. D.: Warter Spray to Reduce Vapor Cloud Spray; Loss Prevention; 1976, S. 31-42

[178] Meroney R. N.; Neff, D. E.; Heskestad, G: Wind-Tunnel Simulation of Field Dispersion Tests (by HSE) of Water Spray curtains; boundary layer meteorolog, 1984

[179] Bara, A.; Dusserre, G.: The Use of Water Curtains to Protect Firemen in Case of Heavy Gas Dispersion. Journal of loss prevention in the process industries, Vol. 10, Nr. 3, pp 179-183, 1997

[180] Chan, S. T.: A Three-Dimensional Model for Simulating Atmospheric Dispersion of Heavy-Gases Over Complex Terrain, UCRL-JC-127475, 10th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the Air and Waste Management Association.Phoenix, Arizona, January 11–16, 1998

[181] Petersen, R. L.; Diener, R.: Vapour barrier assessment programme for delaying and diluting heavier-than-air HF vapour clouds (Dampfbarrierenbeurteilungsprogramm im Hinblick auf die Verzögerung und Verdünnung von schwerer-als-Luft HF-Dampfwolken). 1990: Journal of loss prevention in the process industries (Journal über die Schadenverhütung in der Prozessindustrie), Heft 3 (2).

[182] Schatz, K. W.; Koopman, R. P.: Water spray mitigation of hydrofluoric acid releases (Minderung von HF-Freisetzungen mit Sprühwasser). 1990: Journal of loss prevention in the process industries (Journal über die Schadenverhütung in der Prozessindustrie), Heft 3 (2).

[183] Barth, U., Hartwig, S., Heudorfer W.: Experimentelle Untersuchungen über Wasservorhänge als technische Maßnahme zur Konsequenzminderung bei Störfallfreisetzung von schweren Gasen. Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988) Nr. 11, S. 898-901
[184] Rana, Morshed A.; Guo, Yuyan; Mannan, M. Sam: Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 23, Heft 1, 2010, S. 77 – 88
[185] BahnTech, 01, Heft 3, S. 23
[186] Valette, T.Bourely, C.Dusserre, G.Bara, A. : Le Sapeur Pompier, 96, Heft 878, S. 912 - 913
[187] Böke, J.: S+S Report, Fachdokumentation Brandschutzwesen Nr.32/96/0326/ Z022, Band 2 1995, Heft. Nr. 5, S. 48 - 54
[188] Böke, J.,Hartwig, S.: Chemie-Ingenieur-Technik, 67 (1995), Heft Nr. 2, S. 183 – 185
[189] VDI-Technologiezentrum, Sicherheitsforschung und Sicherheitstechnik, Düsseldorf: VDI-Technologiezentrum (1991). 57 Seiten
[190] Pleß, G., Heyrothsberge:Institut der Feuerwehr (2000). 101 Seiten
[191] Brodowic, A. I.; Krasnowskaja, R. V.: Кокс и химия (Харков) 11(1941)1, S. 27 – 30
[192] Pleß, G., Heyrothsberge: Institut der Feuerwehr (1993). 48 Seiten
[193] Pleß, G.; Wienecke, F.: Heyrothsberge:Institut der Feuerwehr (1998). 137 Seiten.
[194] Frank P. Lees: Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control, second edition
[195] QVF: http://www.qvf.com/de/ProcessSystems_3/Mineralsaeuren/Absorption...
[196] BAM: Projekt Tiefkalte Lagerung von Ammoniak, www.infosis.bam.de/dosis/pdf_gen/pdf_gen.php?aid=113764
[197] Loos, T.: Simulation der chemischen Absorption im Strahlwäscher, Dissertation, TU Dresden, 2006
[198] Haunold, W.: Einsatz von tensidisch aktiviertem Feinstnebel zur Adsorption von Gasen und Aerosolen. Vortrag. Haunold@zuf.uni-Frankfurt.de
[199] Sendelbach, S.: Freisetzung von Chlorwasserstoffgas. In: Brandschutz, Deuswche Feuerwehr-Zeitung, 5/2003, S. 381- 383
[200] Ternowskaja, A. N.; Belopolskij, A. P.: Gasabsorption in Anwesenheit von oberflächenaktiven Stoffen. In: Журналь физической химий, том 24, выд. 1, ст. 43 - 57
[201] Langelüddecke, J.: Schutz und Sicherheit bei Ammoniak - Erfahrungen der BASF-Werkfeuerwehr. In: Brandschutz/Dt. Feuerwehr-Ztg. Stuttgart 46(1992)9, S. 620 – 624
[202] Sicherheitsbericht eines Betreibers (anonymisiert laut Datenschutz, Nr. 15)
[203] Videofilm, Gefahrgutunfälle mit Schwefeldioxid, Status Räddningsverk BOLIDEN, SKELLEFTEHAMN, 1986
[204] TechnoAlpin und Securplan, Scientific Journal H12, Abatement of uncontrolled harmful emissions. Fa. Securplan GmbH srl, Kravoglstr. 32/34 via Kravogl, I 39012, Ansprechpartner: Herr Gögele
[205] Forschungsvorhaben des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) „Weiterentwicklung des Programmsystems DISMA als Entscheidungshilfe und Planungssystem bei Industrieunfällen, Hochwasserlagen und Waldbränden“: Neues Konzept zur Ermittlung der Wirkungen luftgetragener Schadstoffe auf den Menschen Anwendung des AEGL – Konzeptes im Katastrophenschutz. Bonn 2006
[206] Kaiser, W.; Rogazewski, P.: Quantifizierung von Gefahren bei Störfällen. Gefährdungsbereiche und Gefahrenfelder durch toxische Wirkungen bei unterschiedlichen Wirkungsmodellen für luftgetragene Gefahrstoffe im Hinblick auf das AEGL-Konzept. TÜ 41(2000)10, Seiten 41 bis 45
[207] SFK/TAA-GS-01 Leitfaden: Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung - Umsetzung § 50 BImSchG, Stand 2005

9 Anhänge

9.1 Anhang 1 Leistungsbeschreibung

Leistungsbeschreibung
„Wirksamkeit/ Effizienz störfallbegrenzender Maßnahmen im Hinblick auf die Ausbreitung gasförmiger Stoffe“

Hintergrund und Zielsetzung

Gemäß § 3 (3) Störfall-Verordnung sind von Seiten des Betreibers eines Betriebsbereichs vorbeugend Maßnahmen zu treffen, um die Auswirkungen von Störfällen so gering wie möglich zu halten. Diese störfallbegrenzenden Maßnahmen können aktiver oder passiver Art sein. Zu den passiven Maßnahmen zählen z. B. Schutzzäune, –wälle oder Auffangräume. Aktive Maßnahmen können Wasserschleier, Dampfwände, Berieselungsanlagen o. ä. sein. Im Falle der Freisetzung von Flüssigkeiten können Maßnahmen wie Auffangräume so dimensioniert werden, dass die austretende Flüssigkeit vollständig zurück gehalten wird.
Im Falle der Freisetzung von Gasen ist die Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen in vielen Fällen eingeschränkt, da in Abhängigkeit von den Stoffeigenschaften sowie den Witterungs- und Umgebungsbedingungen nur ein Teil des Gases
zurückgehalten werden kann. Wie groß dieser Anteil ist, ist weit gehend unbekannt. Im Allgemeinen wird der Erfolg bei Schwergasen größer bzw. vorhersehbarer sein als bei dichteneutralen Gasen. Bei Wasserschleiern oder ähnlichen Maßnahmen wird zudem die auf bestimmte Gase wie z. B. Ammoniak oder Phosgen hydrolysierende Wirkung genutzt. Auch hier ist die gemäß der möglichen chemischen Umsetzung zu erwartende Wirkung qualitativ bekannt, nicht jedoch die Wirksamkeit im realen Fall quantifizierbar. Im Rahmen von Störfallauswirkungsbetrachtungen kann es sich ergeben, dass am gewählten Aufpunkt der relevante Beurteilungswert überschritten wird. Soll zusätzlich eine störfallbegrenzende Maßnahme berücksichtigt werden, so lässt sich deren Auswirkung auf das Ergebnis derzeit nicht quantifizieren. Insbesondere im Zusammenhang mit der Ermittlung angemessener Abstände in der Bauleitplanung ist es jedoch häufig von Interesse, konkret zu wissen, wie hoch der Beitrag einer bestimmten Maßnahme zu einer möglichen Reduzierung dieses Abstandes ist.
Bevor entschieden werden kann, ob und welche Untersuchungen zur Bestimmung der Wirksamkeit begrenzender Maßnahmen durchzuführen sind, soll in einem Untersuchungsvorhaben zunächst der aktuelle Stand des Wissens ermittelt werden.

Leistungsumfang

Pos. 1
Im ersten Schritt sind die verschiedenartigen Maßnahmen bzw. Konzepte zu ermitteln, die zur Begrenzung der Auswirkungen bei der Freisetzung von Gasen und Dämpfen angewendet werden. Auf Grundlage der Erfahrungen, die im LANUV im Rahmen der Begutachtung von Sicherheitsberichten und der Prüfung von Sicherheitskonzepten gesammelt wurden und derjenigen, die beim Auftragnehmer selbst vorliegen oder ihm aus der Literatur bekannt sind, werden die relevanten Maßnahmen ausgewählt, die einer näheren Betrachtung unterzogen werden sollen. Die Kriterien für die Auswahl werden durch den Auftragnehmer in Abstimmung mit dem LANUV festgelegt. Die ausgewählten Maßnahmen sollen sowohl aktiver als auch passiver Art sein und sind in tabellarischer Form aufzuführen und in ihren wesentlichen Merkmalen zu beschreiben.

Pos. 2
In einem zweiten Schritt ist eine Recherche hinsichtlich bereits vorliegender Erkenntnisse zur Wirksamkeit der im ersten Schritt ausgewählten Maßnahmen durchgeführt werden. Dabei

soll zunächst ermittelt werden, ob in der Vergangenheit bereits Untersuchungen durchgeführt wurden, die sich mit der Frage beschäftigten, wie hoch der Anteil freigesetzter Gasmengen oder Gasmengenströme ist, die durch die verschiedenen begrenzenden Maßnahmen zurückgehalten, niedergeschlagen oder auf andere Weise an der Ausbreitung gehindert werden können. Im Einzelnen sind die zugänglichen Datenbanken im deutschsprachigen und internationalen Raum abzufragen. Darüber hinaus sollen auch die einschlägigen Forschungsinstitutionen etc. in die Recherche einbezogen werden. Die Ergebnisse dieses Arbeitsschrittes sind in einem Zwischenbericht zu dokumentieren. Der Zwischenbericht ist dem Auftraggeber vorzulegen und anschließend in einem Termin in den Räumlichkeiten des LANUV vorzustellen.

Pos. 3
Der dritte Schritt beinhaltet eine Recherche einschlägiger Ereignisse zu der Frage, mit welchem Erfolg im Einzelfall derartige Maßnahmen eingesetzt wurden. Hier ist neben deutschen Quellen auch insbesondere der US-amerikanische Raum einzubeziehen, da erfahrungsgemäß besonders dort zahlreiche Erfahrungen mit der Wirkungsweise von Gefahrenabwehrmaßnahmen vorliegen. Unterstützend sollen Informationen bei Feuerwehren eingeholt werden, bei denen Erfahrungen mit dem Einsatz der genannten Maßnahmen vorliegen. Hierbei ist es zunächst ausreichend, sich auf die Feuerwehren in NRW zu fokussieren. Die konkrete Vorgehensweise bleibt dem Auftragnehmer vorbehalten. Da allerdings derartige Angaben im Internet nicht zu finden sein werden, soll in diesem Arbeitsschritt einen direkte Kontaktaufnahme mit den größeren Feuerwehren in NRW erfolgen.

Pos. 4
Die unter den vorherigen Positionen ermittelten Informationen werden zusammengefasst, ausgewertet und aufbereitet. Dabei sollen folgende Fragen beantwortet werden:

a. Ist es grundsätzlich möglich, die Wirksamkeit störfallbegrenzender Maßnahmen oder einen Bereich der Wirksamkeit zu quantifizieren?

b. Für welche Maßnahmen und Stoffe wurden bisher Untersuchungen zur Wirksamkeit durchgeführt?

c. Welche Randbedingungen liegen den Untersuchungen zugrunde und sind dementsprechend bei einer Umsetzung in der Praxis einzuhalten (Abstände vom Freisetzungsort, Witterungsbedingungen etc.)?

Die Untersuchungen, die hinsichtlich der gestellten Fragen eine Relevanz haben, sind vom Auftragnehmer in Bezug auf die Veranlassung, die getroffenen Randbedingungen und die erzielten Ergebnisse nachvollziehbar darzustellen.

Pos.5
Abschließend sollen im Rahmen des Untersuchungsvorhabens Empfehlungen für mögliche Folgeuntersuchungen abgeleitet werden. Der Auftragnehmer soll konkret herausarbeiten, welche Untersuchungen künftig noch durchgeführt werden müssen, um die Frage nach der Quantifizierbarkeit der Wirkung störfallbegrenzender Maßnahmen zu beantworten. Dabei ist zunächst insbesondere abzustellen auf die Bereiche, die im Rahmen der Bauleitplanung in der Vergangenheit eine Rolle gespielt haben.

9.2 Anhang 2 Zusammenstellung von Maßnahmen zur Störfallbegrenzung aus Datenbanken zu Störfällen

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
Absorptions-/Verdünnungseffekte mit stationären und mobilen Wasserschleiern					
1.	Wasserschleier	Chlor 3 t	Aufbau eines Wasserschildes hat weiträumige Verteilung verhindert. Außerhalb 0 – 1 ppm	[3] [152] [153]	
2.	Wasservorhang	Ammoniak 400 – 700 kg	teilweise wirksam (30 ppm Betriebsgelände)	[6]	Brauerei 80335 München
3.	Leitung abschiebern, Leck schließen, Wasservorhang	Chlor 0,5 – 1 t	k. A.	[8]	Ibbenbühren-Uffeln NRW
4.	Leitung abschiebern, Wasserschleier	Chlor 0,5 t	k. A.	[9]	
5.	Wasserschleier	Chlor 3 t		[10]	
6.	Wasserschleier	Chlor 4,6 t	k. A.	[32]	
7.	Wasserschleier	Ammoniak 250 kg	teilweise wirksam	[14]	40474 Düsseldorf
8.	Wassernebel	Ammoniak	k. A.	[17]	Verletzte
9.	Wasserschleier Absperrungen, Warnungen	Ammoniak 150 kg	k. A.	[37]	
10.	Wasserschleier, Auffangen in Behältertassen	Ammoniak 780 kg	k. A.	[39]	
11.	Wasserschleier	Ammoniak	teilweise wirksam	[52]	Konzentration im Nieder-schlags-wasser

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
					lag bei 58 mg/l 70376 Stuttgart Kraftwerk
12.	Wasserschleier	Nitrose Gase 200 kg	k. A.	[30]	
13.	Wasserschleier	Oleum (65 %) 100 kg	wirksam	[31]	„Nebel nieder-geschlagen“ Ludwigshafen
14.	Wasserschleier	Chlorwasserstoff 60 kg	wirksam	[33]	AOPAN-Anlage, Chlormethylie-rung, Minden
15.	Wasserschleier, technische Maßnahmen zur Entlastung	1.3 Butadien, Benzol 400 kg	k. A.	[34]	
16.	Wasserschleier Entspannung der Fackel, Absperrungen	Schwefeldioxid 135 kg	k. A.	[35]	
17.	Wasserschleier	Schwefeltrioxid aus Oleum 500 kg	Wolke niedergeschlagen, aber Teile trieben ab	[36]	Sulfosäure-Betrieb Frankfurt/Main
18.	Wasserschleier	Stickstoffdioxid 90 kg	teilweise wirksam	[38] [154]	
19.	Wasserschleier Tank geschlossen, Absaugen	Toluol 6,4 t	teilweise wirksam	[40]	
20.	Wassersprühstrahl nach 26 min	Formaldehyd 183,5 kg	Formaldehyd weitgehend niedergeschlagen	[41] [155]	Bitterfeld-Wolfen Druckfarben
21.	Wassersprühschleier	Formalin	wirksam	[51]	Künftige techni-sche und orga-nisatorische

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
					Maßnahmen 15537 Erkner
22.	Wasserschleier	Dichlorethan 1 m³	k. A.	[28]	
23.	Wassersprühstrahl 2000 l/min über 90 min	Ammoniak 250 kg	Messwerte: unmittelbar: 70 ppm in 100 m: -	[43] [156]	Geruch 3 h Dräger Spürröhrchen
24.	Einsatz eines Gelenklöscharmes zur Niederschlagung der Ammoniakdämpfe	Ammoniak	wirksam	[68]	
25.	Wasserspray mit Werkskräften	Siliciumtetrachlorid, (200 kg) Chlorwasserstoff	k. A. Chlorwasserstoffwolke einige km	[77], vgl. auch [81]	
26.	Wasserschild gegen auslaufendes Chlor, unter anderem: Not-Aus, Wasserschleier	Chlor 4850 kg	Zivilschutz machte Messungen 5 ppm	[78]	Bei Reinigung einer Tankerpipeline Ausbreitungsrechnungen
27.	Wasserspray	Chlor 188 kg	Messungen um das Betriebsgelände herum: nach 49 min: 0,5 ppm, nach 61 min: 3 ppm nach 2-3 h: 0,1 ppm	[79]	keine detaillierten Angaben zum Zeitpunkt des Einsatzes des Wasserschleiers
28.	Wasserspray	Chlor 1500 l	Quantifiziert mittels	[80]	keine Daten zur Prognose
29.	Not-Aus, Wasserspray	Chlor 350kg	Chlorkonzentration 500 m Wind: West 0,3 ppm Ausbrei-	[83]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
		Chloreisenbrand	tungsprognose		
30.	Bekämpfen mit Wasser, dann 15:00 the fire brigade installed basins to catch leaking ammonia water, a vacuum pumping vehicle transferred the ammonia water into a storage tank which had been prepared meanwhile. From 17:00 h on the release rate reduced constantly, such that it was possible from 20:00 on to start pumping the pool of ammonia water from the retention pond. At about 22:00 the leak rate in the first leak was reduced at an almost not perceivable level, ammonia was still leaking only from the later formed leak points.	Ammoniak, kaltverflüssigt	k. A.	[82]	Tankschaden
31.	Wassersprays Auffangmöglichkeiten (bunding, catch-pots, etc.);	Ammoniak 25 kg Phosgen	Messungen waren nicht erforderlich	[86]	Außerhalb des Betriebes: Wasserdecke zur Verdünnung der Wolke
32.	Wasserteppich um den Kältemaschinenraum zur Verhinderung der Verdunstung	Ammoniak 1,2 t	Messungen wären notwendig, wurden aber nicht gemacht	[86]	
33.	Wasserschleier	Ammoniak 0,4 – 0,7 t	U-Bahn-Schacht 12 ppm, innerhalb Betrieb 30 ppm, angrenzende Straße 5 ppm	[88] [157]	Keine Entfernungen zu den Messpunkten angegeben Siehe auch ZEMA 9606

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
34.	Wasserschleier	Ammoniak 3,8 t in 5,5 h	k. A.	[89]	
35.	Wasserschleier	Chlor 0,5 – 1 t	Keine Daten	[90]	Messungen außerhalb, aber keine Daten
36.	100 m von der Betriebsgrenze Wasserschleier	Chlor 0,5 t	k. A.	[91]	Evakuierung im Abstand von 300 m
37.	Heißwasserschleier	Chlor 180 kg	Keine Messdaten nach 2 h Leck behoben, Prognoserechnungen	[92]	
38.	Wasserschleier	Chlor Flash-Verdampfung 94kg Chlorwasserstoff	k. A.	[93]	
39.	Wasserschleier	Chlor 350 kg	500 m: 0,3 ppm	[94]	
40.	Wasserspray, Monitore	Chlor	Keine Überschreitung der MAK-Werte (Chlor 1.5 mg/m³) und Chlorwasserstoff (7 mg/m³)	[95]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
41.	Wassersprays, Monitore	Stickstoffdioxid Chlor Ammoniak	Begin: 09:43. At 15:30, the maximum concentrations measured inside the installation were: nitric acid = 50 ppm; nitrogen oxides = 5 ppm; chlorine = 3ppm. At 22:00 there were: nitric acid = 15ppm; nitrogen oxides = 5 ppm; chlorine = less 0.3ppm. At 02:45 there were: nitric acid = 0ppm; nitrogen oxides = 1 ppm; chlorine = 0.2 ppm. Outside the installation, at 15:30 there were: nitric acid = 5ppm; nitrogen oxides = 0.2 ppm. At 22:00 there were 5ppm of nitric acid. Ammonia was not detected, both inside and outside.	[96]	Brandausbruch Ammoniumnitrat
42.	Dampfstrahl	Chlor 3,68 t	k. A.	[98]	
43.	Abfahren der Anlage, Trennung vom Stripper Wasserspray nach 30 min Leckabdichtung nach 3,5 h	Chlor 221 kg Fluorwasserstoff 1,12 t Chlorwasserstoff 50 kg	Cl_2 außerhalb Betrieb nach 40 min: 0,5 – 1 ppm	[99]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
44.	Wassersprays, Monitore	Chlor 150 kg	Ausbreitungsrechnung	[100]	Anwendung verschiedener Dispersionsmodelle (BASF)
45.	Automatische ausgelöstes Sprinklersystem an allen Gebäudeöffnungen	Chlor	Außerhalb kein Chlor festgestellt	[101]	
46.	Wasserschleier	Brom 5 – 10 l	nach 30 – 50 s Verdampfung gestoppt	[102]	
47.	Wasserhosen, Abschließen der Abwasserkanaleinflüsse	Cyanwasserstoff 100 kg	Keine Gefahren außerhalb Betrieb	[104]	
48.	Wassersprays, Monitore	Fluorwasserstoff	k. A.	[107]	
49.	Wasserschleier gegen HF-Wolke und zur Verdünnung der abfließenden Säure	Fluorwasser-stoffsäure 2,5 m^3	k. A.	[108]	Tanküberfüllung
50.	Wassersprays, Monitore	Stickstoffdioxid 2,5 t Chlor Düngemittel	Personenschäden	[110]	Durchgegangene Reaktion 10 000 Personen betroffen
51.	Wasserschleier, Umpumpen in Ersatzgefäße	Stickstoffdioxid	keine Messdaten (Wolke durch Wind verdünnt)	[111]	Tankerleck HNO_3
52.	Wasserschleier	Nitrose Gase 90 kg	k. A.	[113]	
53.	Wassersprays, Monitore	Stickstoffdioxid 600 kg	keine Messdaten	[114]	
54.	Wasserschleier	Formaldehyd (60 %) 183,5 kg	keine Messdaten	[115]	
55.	Wasserschleier	Schwefeldioxid	k. A.	[118]	
56.	Wassersprays, Monitore	Schwefeldioxid	k. A.	[119]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
57.	Niederschlagen mit viel Wasser	Schwefeldioxid 11 t	k. A.	[120]	Zersetzung von Formamidinsul-fon-säure
58.	Wasserspray auf Tank (Leck)	Schwefeldioxid 300 kg	k. A.	[121]	
59.	Wasserspray an Anlage	Ethylenoxid 8 t	erfolgreich	[136]	
60.	Wasserschleier	Chlorwasserstoff (Salzsäure 28 t)	k. A.	[123]	
61.	Wasserschleier	Vinylchlorid 1,5 t	k. A.	[124]	
62.	Wasserschleier	Chlorwasserstoff 0,5 t	„es half HCl-Wolke niederzu-schlagen“	[125]	
63.	Wasserschleier gegen HCl-Gas	Salzsäure 20 t Chlorwasserstoff	5 ppm nicht überschritten	[126]	
64.	Wassersprays, Monitore	Vinylchlorid 210 kg	Monitoring (MC) und mobile Trupps z. B. in 120 m 74,34 ppm	[127]	siehe
65.	Wasserschleier	Chlorwasserstoff	Wolke verdünnt	[128]	
66.	Wasserschleier	Vinylchlorid 4 t	Außerhalb Betrieb negative Messergebnisse	[129]	
67.	Sprinkler-System über der Anlage ausgelöst	Vinylchlorid 20 m³ Chlorwasserstoff	1000 m ab Betriebsgrenze kein VCM	[130]	
68.	Wasserschleier	Vinylchlorid 3 t Chlorwasserstoff 0,4 t Dichlorethan 34 t	10 – 15 ppm HCl in der Nähe des Betriebs	[131]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
69.	Wasserschleier	Chlorwasserstoff 60 kg	k. A.	[132]	
70.	Not-Aus Wasserschleier	Butadien 1,3 3,25 t	Keine irreversiblen Schäden außerhalb	[133]	
71.	Wasserschleier	Schwefelkohlenstoff 200 kg	gelöscht	[139]	Tankerunfall, Ausbreitung Wolke und Feu-er
72.	Wasserwolke	Oleum 65 % 100 kg	Keine Gesundheitsschäden	[149]	
73.	Wasserspray, Löschmonitore	Propan, Butan, Propen, Buten -	Keine Zündung	[148]	
74.	Wasserspray	Oleum 0,5 t	Wolke niedergeschlagen, keine weite Ausbreitung		
75.	Handventil für Ammoniak, geschlossen Wasserschleier	Ammoniak 780 kg	wirksam	[5]	
76.	Wasserschleier mit TLF 16	Chlorwasserstoff ca. 75 kg Zersetzungsreaktion	wirksam Messungen mit GC der BF ergaben keine gefährlichen Konzentrationen	[199]	
Umsetzung gasförmiger Stoffe mit Wasser/Zusätzen im Wasserschleier					
77.	Beseitigung der Freisetzung, Chlor-Behandlung mit Soda in einer Entsor-gungsanlage Wasserschleier gegen Wolke	Chlor 10,55 t	k. A.	[97]	Freisetzung beim Abfüllen

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
78.	Verdünnung mit Löschwasser und Kalkmilch	Fluorwasserstoffsäure 3 t	wirksam	[69]	
79.	Zupumpen von NaOH in die Chlorvernichtungsanlage	Chlor 50 kg	wirksam	[7]	
80.	Dämpfe aus der Halle über Scrubber gereinigt ableiten	Fluorwasserstoffsäure	Keine Personenschäden	[109]	
81.	Verdünnen mit Wasser (>100 : 1) um Entzündung zu verhindern	Ethylenoxid 4 t	erfolgreich	[134]	
Verkürzung der Freisetzungsdauer von freigesetzten Gasen, aus verdunstenden Flüssigkeiten					
82.	Verdampfung durch Überlagern mit Wasser verhindert	Brom 200 kg	wirksam nach 40 s Ausbreitungsrechnung	[47] [158]	Verdampfungsfläche 20 m², vgl. auch [102]
83.	Ventil absperren, Lache mit Schwerschaum abgedeckt	Schwefelkohlenstoff	k. A.	[29]	
84.	Schwimmdach mit Schaumteppich abgedeckt	Rohöl	wirksam	[48]	
85.	Armaturen schließen Schaumdecke	Schwefelkohlenstoff 2,5 t	Keine Personenschäden	[140]	
86.	Schaumdecke	Benzol 332 t	Verdunstung eingeschränkt	[141]	Lache in der Tanktasse
87.	Schaumdecke und abpumpen	Benzol 23 t	Keine Emissionen	[142]	Lache in der Tanktasse
88.	Lacheneingrenzung, Leichtschaum Schutz umliegender Anlagen vor Feuer	Benzol 19 t	k. A.	[143]	
89.	Umleiten in einen anderen Tank Absorption	Oleum 8,55 t	k. A.	[150]	
90.	Umpumpen von Gas in andere Kavernen, Abfackeln	Ethylen	wirksam	[26]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
91.	Umpumpen des Öls aus dem betroffenen Tank in zwei andere Tanks, Abpumpen aus der Tanktasse	Rohöl 3193,6 t	wirksam	[49]	
92.	Erdwälle errichtet, Absaugen	Benzin 674 t	k. A.	[45]	Lache 85 m²
93.	Flüssiges NH_3 in Auffangwanne geleitet, abgepumpt	Ammoniak	teilweise wirksam	[50]	
94.	Abpumpen	Ottokraftstoff	wirksam	[53]	
95.	Ammoniakanlagen – Umschaltung der Ammoniakanlagen auf »Kaltfahrweise«, – Einspeicherung in drucklose Tanks, – Abtrennung der anderen Kugeltanks vom System und schnelle Entleerung des beschädigten Kugeltanks, – Schließen der Armatur in der Sammelleitung zu den Druckbehältern, – die an der Schadensarmatur entstandene Austrittsöffnung wurde durch eine Kappe verschlossen	Ammoniak	wirksam	[16]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
96.	– Heizkreislaufpumpe abgeschaltet. – Trennung des Tanks vom Stickstoff-pendelsystem. – Armaturen sämtlicher Zu- und Abführ-leitungen geschlossen. – Leckstellen mit Planen zur Verhinde-rung des Eintrages von Luftsauerstoff in den Tank abgedeckt. – permanente Stickstoffbeaufschlagung mittels Schlauchleitung direkt über die Leckstellen in das Tankinnere. – Eingebrachter Stickstoff über Dach (ins Freie) abgeleitet.	Teeröl-Feststoff-Gemisch (TÖF)	wirksam	[67]	
97.	Notentspannung	Vinylchlorid 1,7 t	k. A.	[27]	
98.	Überströmventil wurde demontiert und die Rohrleitung blindgeflanscht, Abfackeln des Restgases	Butan 150 l	k. A.	[46]	
99.	Einleiten in ein Auffangbecken und Schlie-ßen der Quelle	Formaldehyd 200 kg	k. A.	[117]	
100.	Ableiten über Leitung in Tank außerhalb des Tankfeldes, Umpumpen in Tkw	Methanol 365 t	Keine Angaben zu Emissio-nen	[144]	
101.	Waggonschnellschlussventil von Hand ge-schlossen, keine Wasserbesprühung mög-lich	Chlor	k. A.	[13]	
102.	Not-Aus-System, am beschädigten Verdich-ter alle Ventile geschlossen	Ammoniak 1200 kg	in 100 m Personenschaden	[4]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
103.	Not-Aus	Ammoniak 27 t	Ausbreitungsprognose Messwerte: k. A.	[87]	8 km vom Störfallort Ammoniakgeruch
104.	Abschalten der Anlage	Propylen 180 kg	wirksam	[25]	
105.	Abschaltung	Ammoniak	k. A.	[15]	
106.	Schließen des Ventils	Flüssiggas	wirksam	[21]	Ausströmen 30 min
107.	Leckstelle durch Vereisung abgedichtet	Flüssiggas	k. A.	[19]	
108.	Abdichten der Flanschverbindung, Kühlung	Vinylchlorid 4 t	k. A.	[23]	
109.	Betriebliche Abschaltmaßnahmen. Keine Maßnahmen zur Begrenzung der Ausbreitung von Cl_2 und HF	Chlor, Fluorwasserstoff, Salpetersäure Natriumhypochlorit	1 ppm Chlor in der Produktionshalle	[106]	
110.	Not-Aus	Phosgen 300 kg (in Monochlorbenzol)	k. A.	[84]	
111.	Not-Aus; Alarmierung (kein Wasserschleier)	Ammoniak 10 t in 3 min, insges.38 t nach 43 min	On the basis of the described effects and of post accident predictions, it was evaluated that ammonia concentration was about 150 ppm for 10 minutes at 3.5 km reducing to 50 ppm for 15 minutes at 7 km from the leak source.	[85]	3,000 on-site people were exposed. About 50,000 off-site people were exposed to the fumes (up to 7 km away) but nobody was seriously affected.

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
112.	Not – Aus Ableiten von HF in einen Notbehälter	Fluorwasserstoff 60 – 100 kg/s	Keine Verletzte, Schäden	[105]	Freisetzung 84 min nach Alarmierung gestoppt
113.	Not-Aus, Kühlung; keine weiteren Maßnahmen angegeben	Toluol 2,5 t	Dämpfe nur innerhalb der Produktionshalle	[145]	
Löschen, Schutz benachbarter Anlagen					
114.	Löscharbeiten	Flüssiggas 1 t	k. A.	[20]	
115.	Löschen mit Schaum nach Explosion	Flüssiggas	wirksam	[22]	
116.	Löscharbeiten, 1,5 h	Propylen 4,1 t	wirksam	[24]	Gasausbruch, Brand
117.	Löscharbeiten nach Brand	Pentan	k. A.	[44]	Künftige technische und organisatorische Maßnahmen
118.	Kühlung der Nachbartanks	Acrylnitril 500 kg Explosion 200 t Brand	Messungen durchführt, keine Daten angegeben	[103]	
119.	Kühlung benachbarter Tanks mit Wasser	Ethylenoxid 5 t Trimethylamin 5 t	erfolgreich	[135]	Explosion
Weiteren Angaben zur Störfallbegrenzung					
120.	Keine Maßnahmen	Stickoxid-Gemisch Ca. 100 kg	k. A.	[112]	
121.	keine Angaben	Formaldehyd (>90 %), 1 t	Verletzte keine Messdaten	[116]	
122.	Keinerlei begrenzende Maßnahmen	Vinylchlorid 4 t	20 ppm bei 4,3 km	[122]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff Menge freigesetzt bei Störfall	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
123.	keine Angaben	Ammoniak 1400 kg	k. A.	[18]	Technische Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit
124.	keine Angaben	Kohlenwasserstoffe C2 – C6 500 – 1000 kg	k. A.	[42]	Künftige technische und organisatorische Maßnahmen
125.	Keine Maßnahmen	Kohlenmonoxid -	k. A. zu Daten	[137] [138]	Wolke breitet sich aus
126.	Keine Maßnahmen	Propan 16,1 t	Keine Zündung	[146]	
127.	Verteilung in der Atmosphäre ohne Maßnahmen	Propan 9 t	Keine Zündung	[147]	
128.	Absperrung, Evakuierung	Chlor 5 t	k. A.	[11]	
129.	Änderung/Ergänzung der Betriebsanweisung	Chlor	k. A.	[12]	

9.3 Anhang 3 Zusammenstellung von Maßnahmen der Störfallbegrenzung aus Sicherheitsberichten, internen und externen Notfallplänen

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff[10]	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
Absorptions-/Verdünnungseffekte mit stationären und mobilen Wasserschleiern					
1.	Anlegen von Wasserschleiern zum Niederschlagen von freigesetzten toxischen Gasen/Dämpfen	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [56] [58] [62] [63]	
2.	Wasserschleier nach 10 min	Trichlorsilan	im Verlaufe von 30 min komplette Überdeckung mit Turbolöscher, 90 %	[2]	Leck 500 mm² (ca. DN 25)
3.	Zerteilen/Verdünnen von Schwergaswolken mittels Wasserstrahl	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
4.	Wasservorhang mit Standard-Feuerwehranschlüssen erzeugt durch flexible Spezialschläuche mit Düsen zum Einsatz auch bei orographisch und technisch schwierigen Gegebenheiten	Gefahrstoffe, Wärmestrahlen, Schwergase	Verdünnung durch Luft-einmischung als wirksam/teilwirksam patentiert	[75]	
5.	Löschdampfeinrichtungen	F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [65]	

[10] Symbole: F+: hochentzündlich, F: leichtentzündlich, T+: sehr giftig, T: giftig. Stoffe mit den Gefahrensymbolen T+ und T müssen gemäß Leistungsbeschreibung gasförmig bzw. verdunstende Flüssigkeiten sein.

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff[10]	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
6.	Wasserbereitstellung (Fördern über lange Wege)		als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [56]	
7.	Wasserrückhaltung bei Löschen, Wasserschleiern		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
8.	Niederschlagen mit Wasserschleier	Ammoniak gasförmig	als wirksam empfohlen	[165]	
9.	Niederschlagen mit Wassermonitoring und Berieselung	HF	als wirksam geplant	[202]	Zeit bis zum Wirksam werden des Wasserschleiers: 60 s, 90 % werden absorbiert (kein Nachweis)
Umsetzung gasförmiger Stoffe mit Wasser/Zusätzen im Wasserschleier					
10.	Absorption/Entgiftungsreaktionen bei freigesetzten Gasen	T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
11.	Absaugen von gasförmigen Stoffen und Ableiten in Wäscher	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [62]	
12.	Rekondensation freigesetzter Schwergase	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
Verkürzung der Freisetzungsdauer von freigesetzten Gasen, aus verdunstenden Flüssigkeiten					
13.	Abpumpen, Umpumpen von gefährlichen Stoffen aus beschädigten Behältern in Ersatzbehälter o. a.	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [60] [62] [63]	
14.	Abpumpen gefährlicher Stoffe aus Tanktassen	T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff[10]	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
15.	Erfassen und gezieltes Ableiten bei gleichzeitigem Verdünnen	Ammoniak gasförmig	als wirksam empfohlen	[165]	Bei Leckmengen 0,128 kg/s Grundlage Leck nach Brötz (A=0,01 D^2)
16.	Lachen mit Folien abdecken	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[58]	
17.	Aufbringen von Bindemitteln	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [56] [58]	
18.	Aufbringen von Schaum	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [63] [64]	
19.	Zurückhalten, Auffangen von freigesetzten Gefahrstoffen	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [56]	
20.	Eingrenzen der Gefahrstofflachen	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [56]	
21.	Ausbrandbecken, Auffangräume mit Gefälle zu Ausbrandbecken im Gebäude oder außerhalb des Gebäudes; Mengenbegrenzung	Triethylaluminium (TEAL)	als wirksam geplant	[167]	
22.	Blow-Down-Behälter	Trichlorsilan, Monosilan	als wirksam geplant	[168]	Anlage zur Zeit in Errichtungsphase
23.	Auffangbereich unter den Freianlagen mit Gefälle zu Auffangräumen, die gleichzeitig auch Ausbrandbecken (mit Brandwänden) sind	Trichlorsilan, Monosilan	als wirksam geplant	[168]	Anlage zur Zeit in Errichtungsphase
24.	Sandsackverbau zur Rückhaltung von gefährlichen flüchtigen Flüssigkeiten	F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
25.	Umgrenzungsmauer/-zaun als Barriere der Begrenzung der Ausbreitung einer Gaswolke bzw. des niedergeschlagenen Gases	Schwergase F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [62]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff[10]	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
26.	Erkennen von Leckagen in ausgewählten Anlagenbereichen (Armaturengruppen, besondere Anlagenteile wie z. B. Verdampfer) und Auslösung von Notfunktionen	Ammoniak, druckverflüssigt	als wirksam empfohlen	[165]	
27.	Reduzierung der Freisetzungsmenge durch Ansprechen Rohrbruchsicherung bei größeren Lecks in Rohrleitungen	Ammoniak, druckverflüssigt	als wirksam empfohlen	[165]	
28.	Abdichten von Lecks in Behältern, Rohrleitungen, aus denen gefährliche flüchtige Stoffe austreten, (TKW, Rohrleitungen, Armaturen) mit in Wasser getränkten Tüchern, Holzdorn o. a.	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [55] [56]	
29.	Schließen mit Handschiebern	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
30.	Schließen von Pipelineschiebern	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
31.	Bei Abschalthandlungen der Elektroenergieversorgung Funkenbildung ausschließen	F+, F	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [55]	
32.	Errichten, Bau schützender Vorrichtungen bei Gefahr im Verzug (z. B. Abdichten von Gebäudeöffnungen)	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
33.	Abpumpen von explosionsgefährlichen Dämpfen aus Kellern	F+, F	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
34.	Entlüften von Gebäuden	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [56]	
35.	Entfernen von ortsbeweglichen Behältern im Brandfall (soweit noch möglich), um einen BLEWE zu verhindern	F+	als wirksam/teilwirksam geplant	[66]	
36.	Schließen von Gebäudeöffnungen aus denen gefährlicher Stoff ausströmt oder ausströmen könnte	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [55]	
37.	Entlüften der Kanalisation (bei Explosionsgefahr eines	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam	[54] [56]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff[10]	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
	Gefahrstoff-Luftgemisches)		geplant		
38.	Tieferliegende Räume, Licht-, Luftschächte und Kanaleinläufe gegen Gaseintritt schützen	F+, F	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [55]	
39.	Abdecken von Kanalisationsöffnungen	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [56]	
40.	Information der Wasserbetriebe, falls Eintrag in die Kanalisation möglich wird	T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54][55] [60]	
Löschen, Schutz benachbarter Anlagen					
41.	Freihalten der Löschwasserentnahmestellen		als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [56]	
42.	Vorbereitungen zur Löschwasserentnahme		als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [56]	
43.	Löschen, Lokalisieren von Bränden (Schadstoffe im Rauchgas beachten)	T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [55] [56]	
44.	Bei Schwelbränden in abgeschlossenen Räumen: Abwehrmaßnahmen zum Verhindern von Rauchgasdurchzündungen oder Rauchgasexplosionen durch Luftzutritt	T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [55]	
45.	Tanktasse mit Freiraum für Aufnahme von Löschwasser	F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[1]	
46.	Bei Bränden: Kühlung und Abschirmung benachbarter Tanks mittels Hydroschild, Tankberieselungen	F+, F	als wirksam/teilwirksam geplant	[1] [59] [61] [63] [66]	
47.	Bei Brand kontrolliert austretendes Gas abbrennen lassen	F+	als wirksam/teilwirksam geplant	[66]	
48.	Löschen von Bohrsonden	F+, F	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff[10]	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
49.	Schadloses Beseitigen von Gefahrstoffen	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
50.	Beseitigung von Einsturzgefahren		als wirksam/teilwirksam geplant	[56]	
Passive Maßnahmen					
51.	Leckerkennung durch automatische Gassensoren	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[57] [63]	
52.	Meldeanlagen: Brand, Rauch, Gas, mit Anzeige in der Messwarte und gleichzeitig mit Schaltung auf die Anlage der Feuerwehr	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [59] [62] [63] [64]	
53.	Redundante Warnanlagen	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[59] [65]	
54.	Anbringen eines Windrichtungsanzeigers (Windsack)	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[63]	
55.	Not-Aus-Systeme	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[1] [54] [63]	
56.	Schaffung von Rohrleitungsabschnitten mittels Schnellschlussarmaturen	Ammoniak, druckverflüssigt	als wirksam empfohlen	[165]	
57.	Absperrschieber	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [63]	
58.	Maßnahmen zur Unterbindung jeglicher Funkenquellen (Fahrzeuge u. a.)	F+, F	als wirksam/teilwirksam geplant	[55]	
59.	Arbeitsanweisungen		als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [55] [56] [57] [63]	
60.	Senkung der Einsatzzeiten der Gefahrenabwehrkräfte		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff[10]	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
61.	Regelmäßige Übungen		als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [55] [56] [57] [63]	
62.	Segmentierung (Abschottung/Entleerung von Bereichen, die gefährliche Stoffe führen)	HF	als wirksam geplant	[202]	
63.	Indikatoranstrich mit Kameraüberwachung an Flanschen zur schnellen Erkennung von Undichtigkeiten	HF	als wirksam geplant	[202]	
Zusammenstellung von störfallbegrenzenden Maßnahmen für freigesetzte leichtentzündliche Flüssigkeiten					
64.	Freisetzung von leichtentzündlichen Flüssigkeiten	F+, F, T+, T	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
65.	– Leckerkennungssysteme		als wirksam/teilwirksam geplant	[61]	
66.	– Erkunden der Freisetzung und Prognose		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
67.	– Abdichten von Leckstellen		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
68.	– Abdichten von Straßeneinläufen (wassergefüllte Foliensäcke)		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
69.	– Aufbringen von Schaum		als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [55] [61]	
70.	– Aufwerfen von Erdwällen		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
71.	– Einsatz von Bindemitteln		als wirksam/teilwirksam geplant	[54] [61]	
72.	– Kontrolliertes Abbrennen		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
73.	– Anlegen von Gräben zum Ablauf (Drängräben u. a.)		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff[10]	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
74.	– Bau von Brandwänden		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
75.	Freisetzung von leichtentzündlichen Flüssigkeiten auf Fließgewässern	F, T+, T, N	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
76.	– Stoppen der Ausbreitung, Anlegen einer Hauptsperre (flexibel, starr) und Ableitung auf eine Uferseite		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
77.	– Anlegen einer Nachsperre (z. B. Netzsperre mit Bindemitteln)		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
78.	– Entfernen des Stoffes durch mechanische Aufnahme (Pumpen, Saufschaufel u. a.)		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
79.	– Einsatz von Pumpaggregaten zur Wasserspiegelabsenkung		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
80.	– Trennung des Gefahrstoff-Wasser-Gemisches, Einsatz eines Leichtflüssigkeitsabscheider		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
81.	– Aufnahme von Restmengen mit Bindemitteln		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
82.	– Bau einer kombinierten Speicher- und/oder Abscheideanlage (z. B. als abgedichtetes Erdbecken)		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
83.	– Ableitung von Flüssigkeiten		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
84.	Freisetzung leichtentzündlicher Flüssigkeiten im Hafen	F+, F, T+, T, N	als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
85.	– Anordnen von Schifffahrtsruhe		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
86.	– Abgrenzung des Hafenbereichs durch Sperren, Lastkähne u. a.		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	

Lfd. Nr.	Störfallbegrenzende Maßnahme	Stoff[10]	Angaben zur Wirksamkeit	Quelle	Bemerkungen Sonstiges
87.	– Einstellen der Arbeiten, bei denen mit Funkenbildung zu rechnen ist		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
88.	– Aufnahme mit schwimmendem Aufnahmegerät		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	
89.	– Einsatz von Bindern		als wirksam/teilwirksam geplant	[54]	

9.4 Anhang 4 Anwendung des Artikels 12 der Richtlinie 96/82/EG

AUTONOME PROVINZ BOZEN - SÜDTIROL
Abteilung 26 - Brand- und Zivilschutz

PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO - ALTO ADIGE
Ripartizione 26 - Protezione antincendi e civile

Prot. Nr. 84.07/ 676069

Bozen, 19. 11. 2010

Bearbeitet von:

TÜV Rheinland
Industrie Service GmbH
z.H. Frau Silke Godager
Alboinstraße 56

D - 12103 Berlin

Anwendung des Artikels 12 der Richtlinie 96/82/EG des Rates vom 9. Dezember 1996

Sehr geehrte Damen und Herren,

in Beantwortung Ihrer mündlichen Anfrage, erläutern wir nachstehend in kurzen Zügen die konkrete Anwendung des Artikels 12 der Richtlinie 96/82/EG des Rates vom 9. Dezember 1996 zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen auf dem italienischen Staatsgebiet.

Die raumordnerischen Richtlinien sind mit einem Ministerialdekret festgelegt und sind so gestaltet, dass die "Empfindlichkeit" der urbanistischen Nutzung im Verhältniss zur erwarteten Wahrscheinlichkeit und zur Schwere der Auswirkung der zu erwartenden Störfälle ist. Im Einzelnen wird so vorgegangen, dass die Wahrscheinlichkeit der zu erwatenden Störfälle berechnet wird. Alle Störfälle die eine Eintrittswahrscheinlichkeit von weniger 10E-7 Ereignisse/Jahr haben werden als unwahrscheinlich eingestuft und nicht weiter behandelt, für alle anderen werden die Konsequenzen (Konzentration der Schadstoffwolke, Druckwelle der Explosion, Intensität der Wärmestrahlung usw.) berechnet. Es werden dabei auch all jene Schutzmassnahmen (Eingriff der Werksfeuerwehr, Wasserwände, Schaumteppiche, anlagentechnische Eingriffe, usw.) berücksichtigt, sofern deren Zuverlässigkeit so hoch ist, dass ein Störfall mit zusätzlichem Versagen der Schutzmassnahmen die Eintrittswahrscheinlichkeit von weniger 10E-7 Ereignisse/Jahr nicht übersteigt.

Ist die Folge des Störfalls eine Schadstoffwolke, so ergibt sich die Ausdehnung der Zone mit einer Einschränkung der urbanistischen Nutzung aus der Berechnung der Ausdehnung der Schadstoffwolke. Lässt sich eine solche Schadstoffwolke niederschlagen, so wird die Ausdehnung der Schadstoffwolke unter Berücksichtigung dieser Schutzmassnahme durchgeführt.

In der Praxis erfolgt die Berechnung wie folgt:
- Eintritt Störfall
- Durch das ungestörte Verdampfen/Verbrennen des Gefahrstoffs bildet sich eine Schadstoffwolke die sich in Windrichtung ausbreitet
- Der Störfall wird erkannt und lokalisiert
- Das System zur Niederschlagung der Schadstoffwolke wird aktiviert
- Das System tritt in Betrieb
- Ab diesem Zeitpunkt wird die Verdampfungsrate/Verbrennungsrate des Gefahrstoffes wird rechnerisch um die Wirkung des System zur Niederschlagung reduziert.

Wie man aus dem Beispiel sieht, hat ein System zur Niederschlagung des Schadstoffes immer dann eine Auswirkung auf die urbanistischen Nutzung der Umgebung eines Störfallbetriebes, wenn der Schadstoff

Drususallee 116 - 39100 Bozen
Tel. 0471 41 60 00 - Fax 0471 41 60 19
http://www.provinz.bz.it/zivilschutz/
brand.zivilschutz@provinz.bz.it
Steuer-Nr. 00390090215

Viale Druso 116 - 39100 Bolzano
Tel. 0471 41 60 00 - Fax 0471 41 60 19
http://www.provincia.bz.it/protezione-civile/
protezione.antincendieciviles@provincia.bz.it
Cod.fisc. 00390090215

AUTONOME PROVINZ BOZEN - SÜDTIROL PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO - ALTO ADIGE

Seite/ Pag. 2

nicht plötzlich vollständig verdampft, sondern mehr oder weniger kontinuierlich verdampft.

In konkreten Fällen haben solche Systeme zur Niederschlagung von Schadstoffwolken zur Verkleinerung der Zonen mit einer Einschränkung der urbanistischen Nutzung geführt.

Mit freundlichen Grüßen

Der Abteilungsdirektor
Dr. Hanspeter Staffler

9.5 Anhang 5 Abkürzungen und Begriffe

AEGL Acute Emergency Guideline Levels – Beurteilungswerte für den akuten Störfall

AEGL 1 ist die luftgetragene Stoff-Konzentration (ausgedrückt in ppm oder mg/m³), ab der vorhergesagt wird, dass die Allgemeinbevölkerung ein spürbares Unwohlsein erleiden kann.
Luftgetragene Stoff-Konzentrationen unterhalb AEGL 1 bedeuten Expositionshöhen, die leichte Geruchs-, Geschmacks- bzw. andere sensorische Reizungen oder leichte Irritationseffekte (d. h. beispielsweise leichte Reizung an Augen und/oder Nase) hervorrufen können.

AEGL 2 ist die luftgetragene Stoff-Konzentration (ausgedrückt in ppm oder mg/m³), ab der vorhergesagt wird, dass die Allgemeinbevölkerung irreversible oder andere schwerwiegende, lang andauernde Gesundheitseffekte erleiden kann oder bei der die Fähigkeit zur Flucht beeinträchtigt sein kann.
Luftgetragene Stoff-Konzentrationen unterhalb AEGL 2 aber oberhalb AEGL 1 bedeuten Expositionshöhen, die spürbares Unwohlsein hervorrufen können.

AEGL 3 ist die luftgetragene Stoff-Konzentration (ausgedrückt in ppm oder mg/m³), ab der vorhergesagt wird, dass die Allgemeinbevölkerung lebensbedrohliche oder tödliche Gesundheitseffekte erleiden kann.
Luftgetragene Stoff-Konzentrationen unterhalb des AEGL 3 aber oberhalb des AEGL 2 bedeuten Expositionshöhen, die irreversible oder andere schwerwiegende, lang andauernde Gesundheitseffekte hervorrufen oder die Fähigkeit zur Flucht beeinträchtigen können.

Konzentrationsminderungsfaktor/Verdünnungsfaktor

$$\text{Minderungsfaktor} = \frac{\text{Konzentration ohne störfallbegrenzende Maßnahme}}{\text{Konzentration mit störfallbegrenzender Maßnahme}}$$

(für Messungen an jeweils einem bestimmten Ort)

AFFF-Schäume	filmbildender Löschschaum
ATF	Analytische Task Forces (eine Katastrophenschutzkomponente der Bundesregierung)
BASF	ehemals: Badische Anilin und Soda Fabrik, heute: BASF Aktiengesellschaft
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BF	Berufsfeuerwehr
BMFT	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CSB	United States Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Washington DC
F	Gefahrenbezeichnung für leichtentzündlich
F+	Gefahrenbezeichnung für hochentzündlich
FID	Flammenionisationsdetektor

GC	Gaschromatographie
HCl	Chlorwasserstoff
HF	Fluorwasserstoff
HSE	Health and Safety Executive (United Kingdom)
k. A.	keine Angaben
KAS	Kommission für Anlagensicherheit
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
LNG	Liquefied natural gas (Erdgas)
LPG	Liquefied petroleum gas (Flüssiggas)
MAHB	Major Accident Hazard Bureau
MARS	Major Accident Reporting System
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
PID	Photoionisationsdetektor
SFK	Störfallkommission
T	Gefahrenbezeichnung für giftig
T+	Gefahrenbezeichnung für sehr giftig
TAA	Technischer Ausschuss für Anlagensicherheit
TUIS	Transport-Unfall-Informations- und Hilfeleistungssystem
UZG	Untere Zündgrenze
ZEMA	Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen

10 Danksagung

Diese Studie erforderte in den Monaten September bis November 2010 umfangreiche Recherchen in Publikationen zu Forschungsergebnissen, in Dokumentationen zu Störfällen, in Unterlagen zur Notfallplanung von Betriebsbereichen und Behörden sowie Konsultationen über praktischen Erfahrungen zur Störfallbegrenzung.

Unser Dank für die Unterstützung der umfangreichen Recherchen und der Vermittlung von Erfahrungen zu den Problemen der Störfallbegrenzung gilt insbesondere dem Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, der Dokumentationsstelle des TÜV Rheinland, den Berufsfeuerwehren, die im Transport-Unfall-Informations- und Hilfeleistungssystem (TUIS) wirken, weiteren ausgewählten Werk- und Berufsfeuerwehren sowie den Analytischen Task Forces des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe.