

### Quantitative Risikoanalyse unter Berücksichtigung des Standes der Sicherheitstechnik bei Störfallanlagen in Deutschland (QRAD) – Methodik und Anwendungsbeispiele

Dr.-Ing. Yvonne Drewitz

TÜV Rheinland Industrie Service GmbH

Standort Berlin

# Gliederung des Vortrags

1. Einleitung
2. Prinzipielles Konzept einer QRA
3. Abgrenzung zu anderen Methoden
4. Methodik der entwickelten QRA für Deutschland (QRAD)
5. Anwendungsbeispiele
6. Vergleich mit int./eur. Risikogrenzwerten
7. Zusammenfassung
8. Schlussfolgerungen

# 1. Einleitung

## International/Europa:

- Quantitative Risikoanalysen (QRA) werden international und in Europa zur Bewertung von Anlagen in Genehmigungsverfahren und zur Flächennutzungsplanung herangezogen
- Beispielhaft in den Niederlanden, Schweiz, Frankreich, UK
- QRA werden seit vielen Jahren in der chem. Industrie genutzt
- sie sind erprobt und gelten als „Stand der Technik“
- Anlagenrisiko ergibt sich aus der Abschätzung der Auswirkungen möglicher Ereignisse und Häufigkeiten (**probabilistischer Ansatz**)
- Vergleich des Anlagenrisikos mit Risikoakzeptanzkriterien:
  - gesellschaftlich akzeptierte Beurteilungsmaßstäbe
  - in Niederlanden z. B. per Verordnung vorgegeben

# 1. Einleitung

## Deutschland:

- Etablierung des **deterministischen Ansatzes** für Störfall-Anlagen
- Erstellung eines **Sicherheitsberichtes** nach § 9 StörfallV:
  - systematische Gefahrenanalyse wird durchgeführt
  - alle erforderlichen Maßnahmen zur Verhinderung von Störfällen und zur Begrenzung ihrer Auswirkungen wurden ergriffen
- Beschreibung der Szenarien möglicher Störfälle nebst ihrer Wahrscheinlichkeit oder den Bedingungen für ihr Eintreten
- Abschätzung des Ausmaßes und der Schwere der Folgen der ermittelten Störfälle
- Störfallablaufszenarien:
  - Vernünftigerweise nicht auszuschließende Gefahrenquellen
  - Vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen (Dennoch-Störfälle)
  - Exzeptionelle Störfälle für die Katastrophenschutzplanung

# 1. Einleitung

- Deterministik erlaubt keinen quantitativen Vergleich von unterschiedlichen Sicherheitskonzepten hinsichtlich ihrer Wirksamkeit
- sicherheitstechnische Beurteilung von Designalternativen
- Einfluss von zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen kann nicht beurteilt werden
- QRA auch in Deutschland ein bekanntes Instrumentarium
- in Deutschland wird über die Einsatzmöglichkeiten der QRA diskutiert
- nach der Auffassung der KAS können QRA deterministische Methoden sinnvoll ergänzen bzw. zusätzlichen Nutzen bringen

## 2. Prinzipielles Konzept einer QRA

1. Was kann gefahrbringend geschehen?

→ durch die Erkennung der Gefahren

2. Was sind die Ursachen?

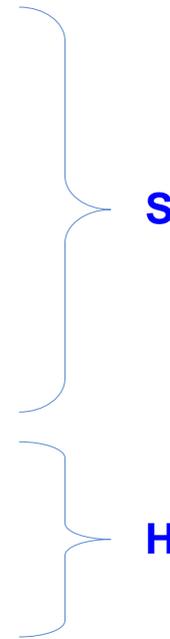
→ durch die Ermittlung der Gefahrenquellen

3. Welcher Schaden kann entstehen?

→ durch eine Auswirkungsbetrachtung

4. Wie wahrscheinlich ist solch ein Ereignis?

→ durch eine Analyse der Eintrittswahrscheinlichkeit



**Risiko = Schadensausmaß (S) x Häufigkeit (H)**

## 2. Prinzipielles Konzept einer QRA - Ergebnisdarstellung

### Probabilistik:

- Quantitativ mit Zahlenangabe, d.h.
  - Bestimmung des individuellen und kollektives Risikos (Risikoplots)

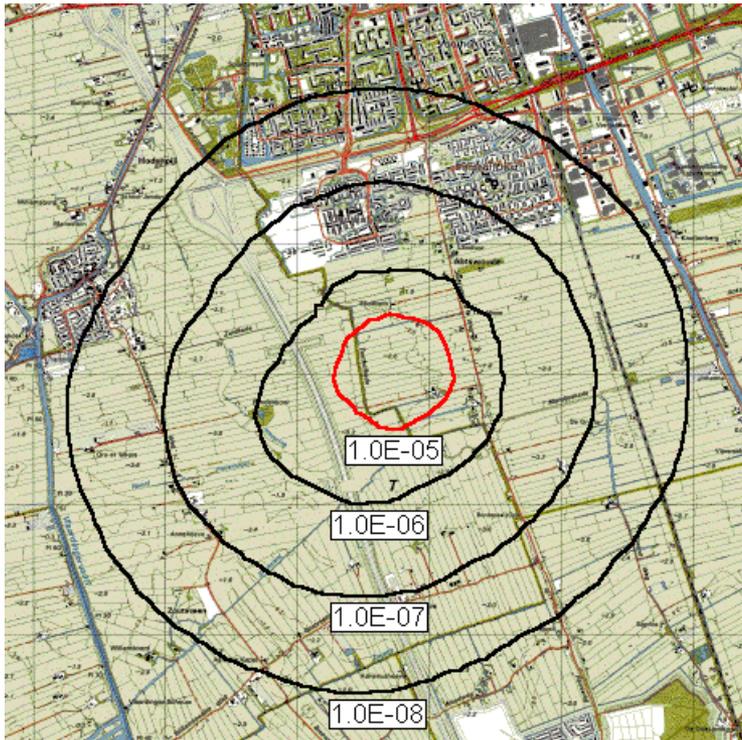
### Deterministik:

- qualitativ **ohne** Zahlenangaben zu Eintrittshäufigkeiten, Personenschäden und dem daraus resultierenden Risiko
- Störfallbeurteilungswerte werden unterschritten

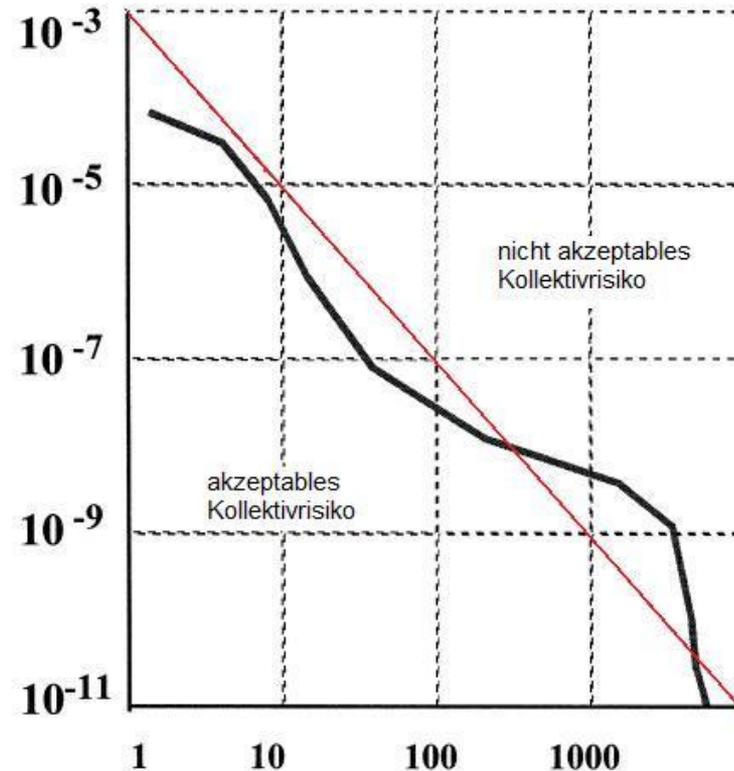
*„Eine ernste Gefahr im Sinne der Störfallverordnung kann vernünftigerweise ausgeschlossen werden.“*



## 2. Prinzipielles Konzept einer QRA - Risikoplots



Individualrisiko [1/a]



Kollektives Risiko

Quelle: P. Bottelberghs, „Risk analysis and safety policy developments in the Netherlands“, *Journal of Hazardous Materials*, Bd. 71, Nr. 1-3, S. 59-84, Jan. 2000.

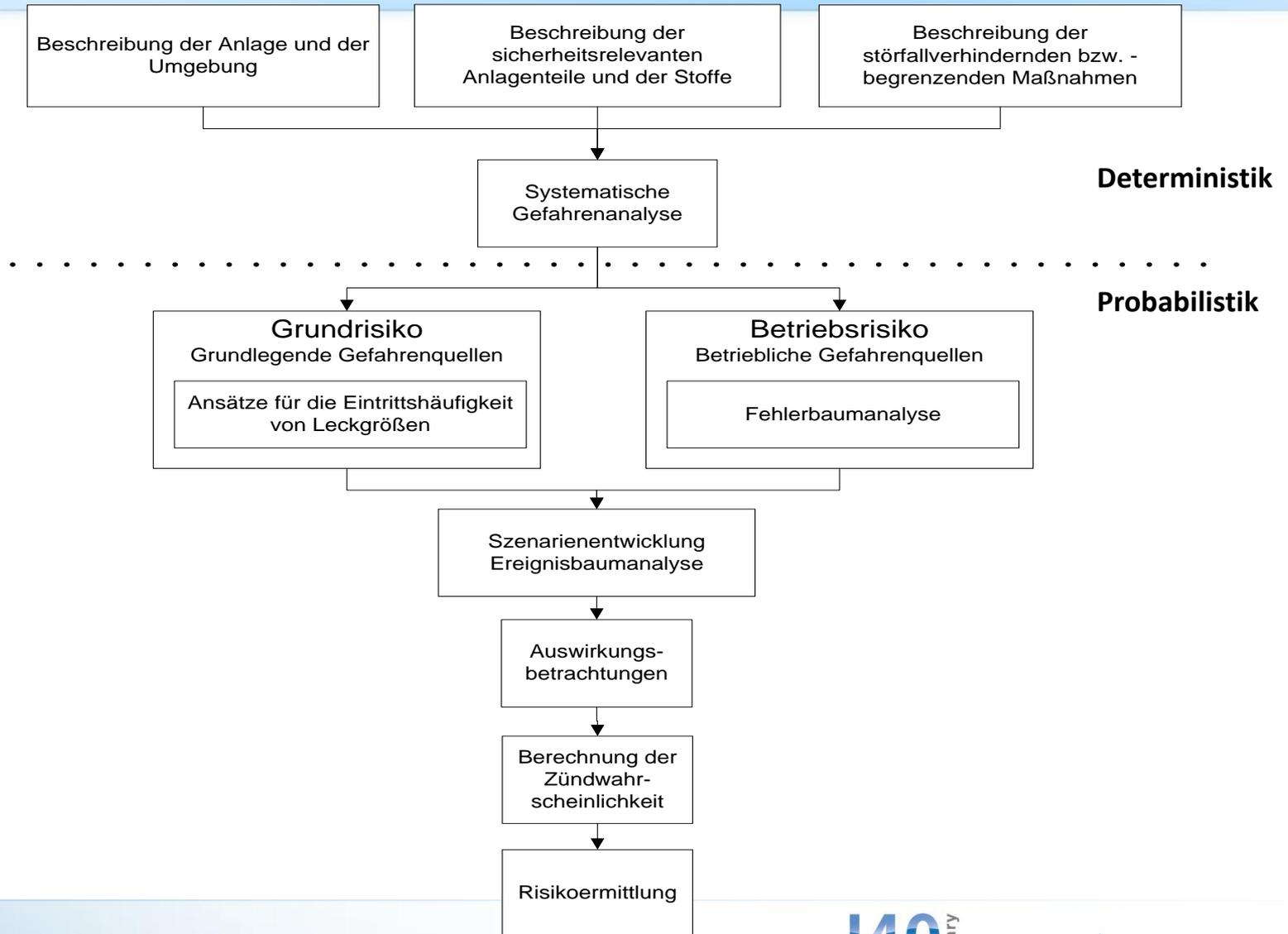
### 3. Abgrenzung zu anderen quantitativen Methoden

- Semiquantitative und quantitative Methoden, wie z. B. LOPA, ARAMIS, Purple Book, Schweizer Vorgehen oder auch ROGA
- Methoden unterscheiden sich erheblich und können nicht uneingeschränkt übernommen werden
- ARAMIS – Forschungsprojekt auf EU-Ebene, sehr komplex
- Purple Book berücksichtigt z. B. die sicherheitstechnische Ausrüstung der Anlage nicht
- LOPA betrachtet nur Einzelszenarien
  - störfallverhindernden – und begrenzende Maßnahmen werden Versagenswahrscheinlichkeiten zugewiesen
  - Risikobewertung: Gegenüberstellung Wahrscheinlichkeit Szenario mit Versagenswahrscheinlichkeiten der Schutzbarrieren
- Jede Methode muss im Zusammenhang mit dem Anwendungsbereich/ Zielsetzungen und mit dem Bewertungsmaßstab gesehen werden

## 4. Methodik der entwickelten QRAD

- Zielstellung:
- Diese Methodik sollte:
  - Stand der Sicherheitstechnik in Deutschland abbilden
  - praxisorientiert, transparent, vertretbares Kosten-/Nutzen-Verhältnis
- Schwerpunkte dabei sind:
  - Erstellung eines konsistenten Datensatz
  - Zündwahrscheinlichkeitsmodell, indem die Anforderungen der BetrSichV berücksichtigt werden können
  - Vorschlag für geeignete Beurteilungskriterien in QRAD
  - Validierung der Methodik an verschiedenen Anlagentypen

# 4. Methodik der entwickelten QRAD



## 4. Methodik der entwickelten QRAD

- Voraussetzung für alle Verfahren ist eine systematische Gefahrenanalyse
- Zentraler Schritt – nicht erkannte Gefahrenquellen bleiben unberücksichtigt
- Zur Verfügung stehen verschiedene Verfahren:
  - PAAG, HAZOP,
  - Checklisten,
  - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA),
  - What-If-Methode.
- Anwendung des „erweiterten Checklistenverfahrens“
  - ein mit Fragestellungen des PAAG-Verfahrens erweitertes Checklistenverfahren,
  - Gute Differenzierung der Gefahrenquellen mit Beitrag zum Grund- und Betriebsrisiko.

# 4. Methodik der entwickelten QRAD

Lfd. Nr.	Generelle Gefahrenquelle	Auf die Anlage bezogene Gefahrenquelle	Auswirkungen	Sicherheitsvorkehrungen
1.1.	Mechanisches Versagen des Funktionselementes	Konstruktionsfehler	Behälterbersten Freisetzung von 175 t	Auslegung der Lagerbehälter nach DruckbehV / AD-Regelwerk (12,1 bar, 30 °C) unter Berücksichtigung der Zusatzlasten (Wasserbefüllung, Erddeckung, Setzungsdifferenzen) Vorprüfung durch Sachverständigen nach § 31 DruckbehV Prüfung der Statik durch Prüfstatiker Werkstoff StE 355
1.2.	Mechanisches Versagen des Funktionselementes	Zu hoher Druck z. B. durch -Einschleppen von Inertgas - Verdichter fördert auf vollen Behälter -Einfüllen bei niedriger Außentemperatur und Ausdehnung - Stoffverwechslung	Ansprechen SV, Massenstrom: 13 kg/s Oder Behälterbersten mit Freisetzung von 175 t	Druckbegrenzer des Behälters mit Voralarm und Unterbrechung der Befüllung 2 Sicherheitsventile mit Wechselventil (Ansprechüberdruck 12,1 bar) Füllstandsüberwachung und Auslegung auf einen Temperaturdifferenz von 50 K Eingangskontrolle der EKW

# 4. Methodik der entwickelten QRAD

Nr.	Generelle auf die Anlagentechnik bezogene Gefahrenquelle
<b>1.</b>	<b>Freisetzung gefährlicher Stoffe durch mechanisches Versagen der Umschließung von Funktionselementen</b>
1.1	Konstruktionsfehler
1.2	Fertigungsfehler
1.3	Fehler bei der Aufstellung
1.4	Unzulässiger Druck
1.5	Örtlich unzulässige Temperatur
1.6	Schädigung durch Korrosion, Erosion, Verschleiß, Kavitation
1.7	Schädigung durch Schwingungen
1.8	Schwachstellen an Flanschen, Armaturen, Dichtungen, Messstellen, Verschlüssen
1.9	Lagerversagen
1.10	Lösen bewegter Komponenten
<b>2.</b>	<b>Freisetzung gefährlicher Stoffe durch Entstehung oder unkontrollierten Übergang in andere Teilanlagen durch Versagen der Anlagensteuerung</b>
2.1	Die Reaktion ist gestört
2.2	Stoff entsteht bei Störung des bestimmungsgemäßen Betriebes
2.3	Die Steuerung ist gestört
2.4	Der Stofffluss ist gestört

Grundrisiko

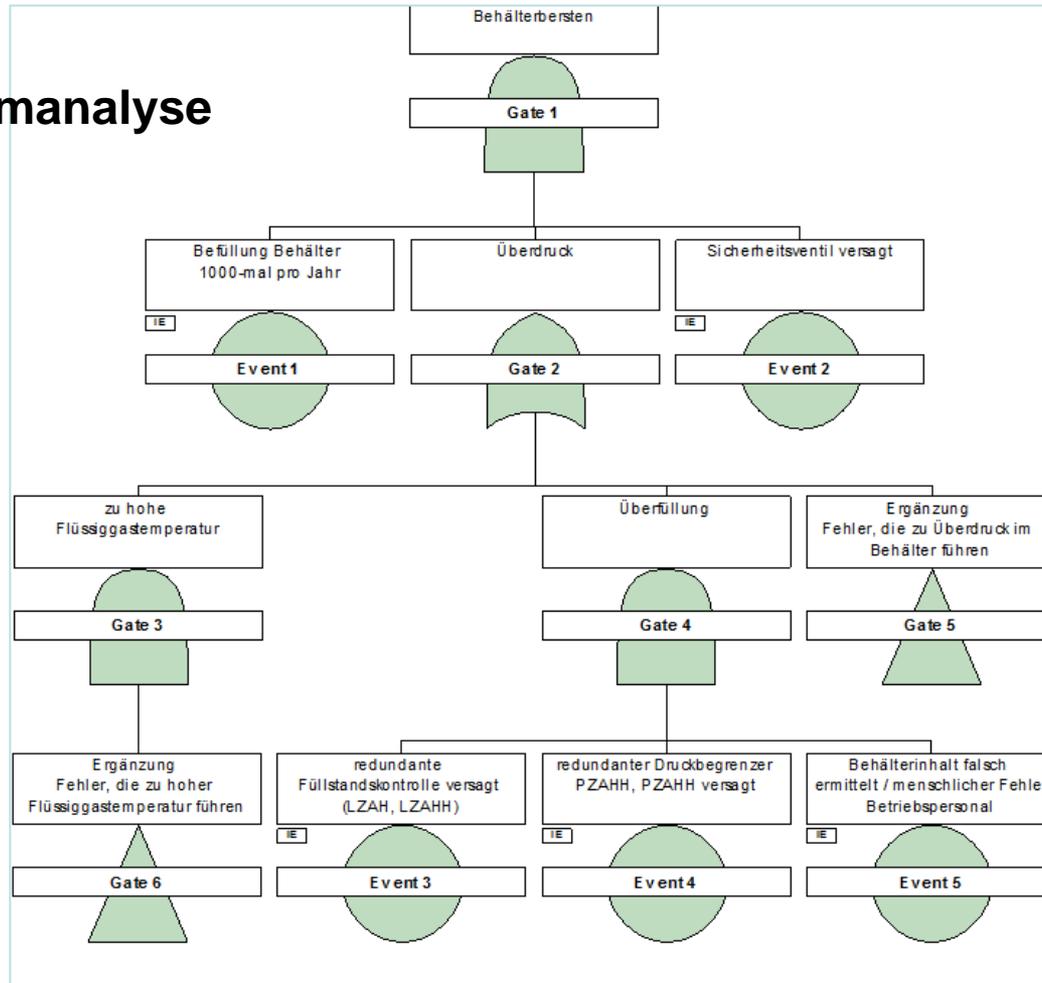
Betriebsrisiko

## 4. Methodik der entwickelten QRAD - Grundrisiko

- Vorgabe von standardisierte Kombinationen aus Leckflächen und Leckagehäufigkeiten für verschiedene Anlagenkomponenten
- **Rohrleitungen:**
  - Für die Rohrleitungen wurden 6 Rohrklassen gebildet
  - Abdeckende Leckgrößen für jede Rohrklasse
  - Leckagehäufigkeiten abgeleitet aus der HSE-Datenbank
- **Behälter:**
  - für kleine Leckagen wird ein Leckdurchmesser von 5 mm gewählt
  - zusätzlich werden die Leckdurchmesser 10 mm und 25 mm für die Behälterleckagen in Anlehnung an Leitfaden KAS-18 vorausgesetzt
  - Leckagehäufigkeit wird aus der Literatur abgeleitet

# 4. Methodik der entwickelten QRAD - Betriebsrisiko

## Fehlerbaumanalyse



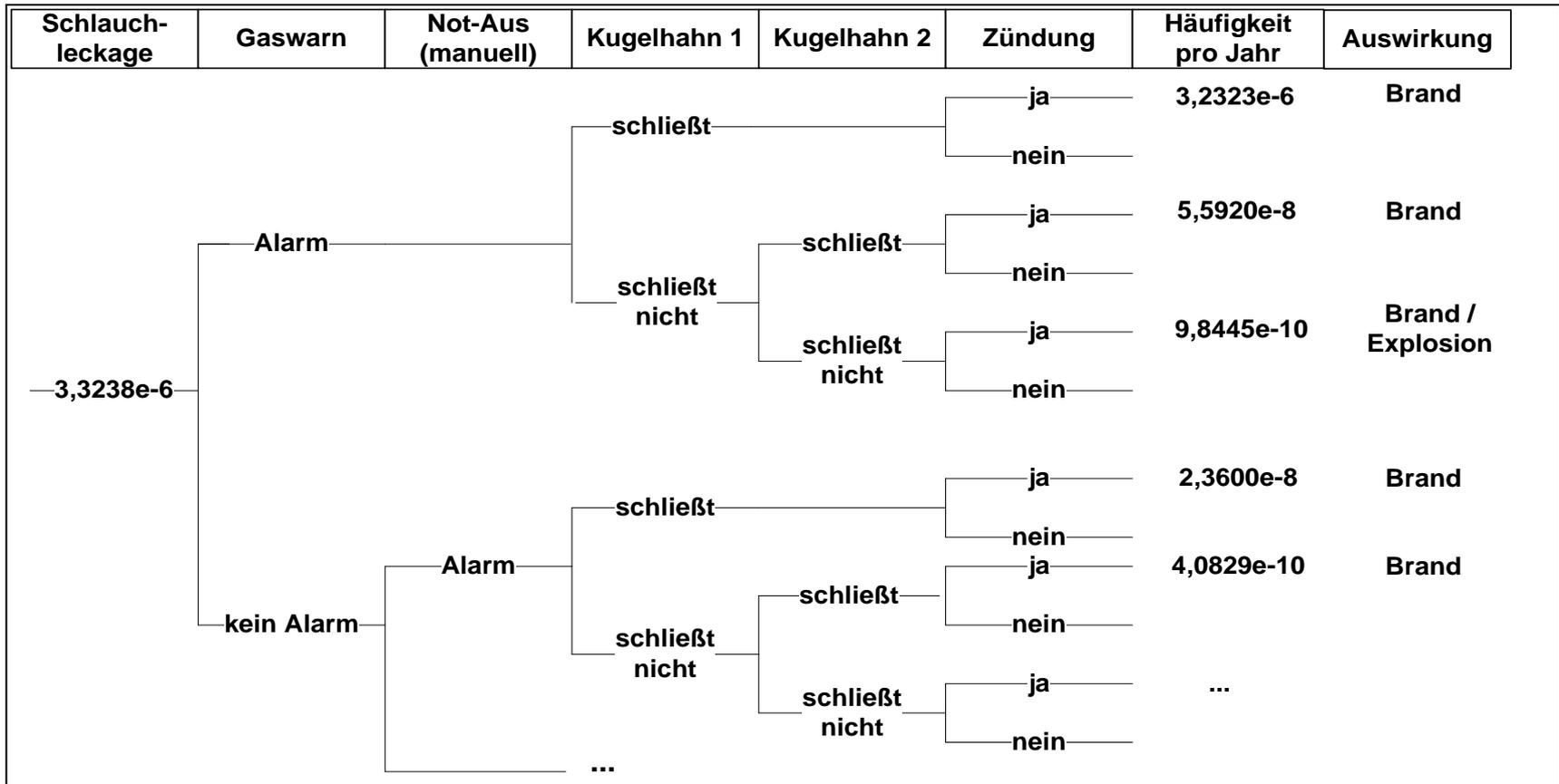
# 4. Methodik der entwickelten QRAD - Betriebsrisiko

## Ausfalldaten

- Kritiker sehen Mangel an anlagenspezifischen Daten als wesentliches Hindernis für die Durchführung von QRA
- Prinzipiell stehen verschiedene Datenbanken zur Verfügung, wie z. B. EXIDA und OREDA
- Zusammenstellung eines in sich konsistenten Datensatzes auf Basis der Datenbanken, der für alle Anlagen verwendet wurde
- Kein Anspruch „richtige“ Daten zu verwenden
- Ziel: Vergleichbarkeit der Anlagenrisiken

# 4. Methodik der entwickelten QRAD - Szenarientwicklung

## Ereignisbaumanalyse



## 4. Methodik der entwickelten QRAD - Auswirkungsbetrachtungen und Beurteilungswerte

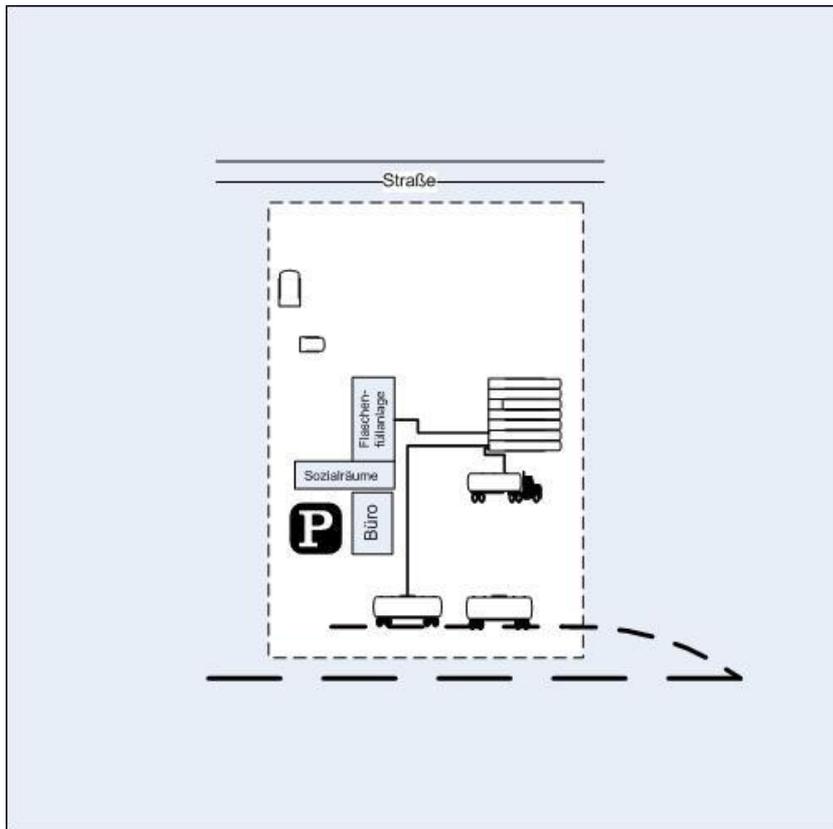
- Für die Berechnung der Auswirkungen eines Szenarios werden bekannte Modelle eingesetzt:
  - Gasausbreitung, z. B.
    - Freistrahlnach Schatzmann
    - VDI-Richtlinie 3783 Blatt 1 und 2
  - Gaswolkenexplosion Multi-Energy-Modell
  - Lachenbrandmodell OSRAMO II
- Auswirkungen von Stofffreisetzungen werden in Deutschland mit Grenzwerten verglichen, wie z. B.: AEGL und ERPG-Werte, Explosionsüberdruck, Bestrahlungsstärke
- Alternativ Probit-Funktion:
  - Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Schädigung in Abhängigkeit der Dosis und der Entfernung zum Freisetzungsort

## 4. Methodik der entwickelten QRAD

### Zündwahrscheinlichkeitsmodell

- Berechnung der Zündwahrscheinlichkeit besonders wichtig wenn brennbare Stoffe freigesetzt werden
- Modell von Daycock aufgegriffen
- Unterteilung des Betriebsgeländes in verschiedene Nutzungstypen
- Für diese Nutzungstypen sind die Anzahl der Zündquellen pro Fläche und Zündquellenparameter durch Daycock festgelegt worden.
- Dieses Modell wurde weiterentwickelt und an die in Deutschland vorliegenden Gegebenheiten angepasst:
  - Ergänzung von verschiedenen Nutzungstypen, insbesondere für die Zone 1 und Zone 0 sowie Straßen, Eisenbahnschienen usw.
  - Einführung eines Zündwilligkeitsfaktors zur Berücksichtigung der Eigenschaften brennbarer Stoffe

# 5. Anwendungsbeispiele - Flüssiggasanlage



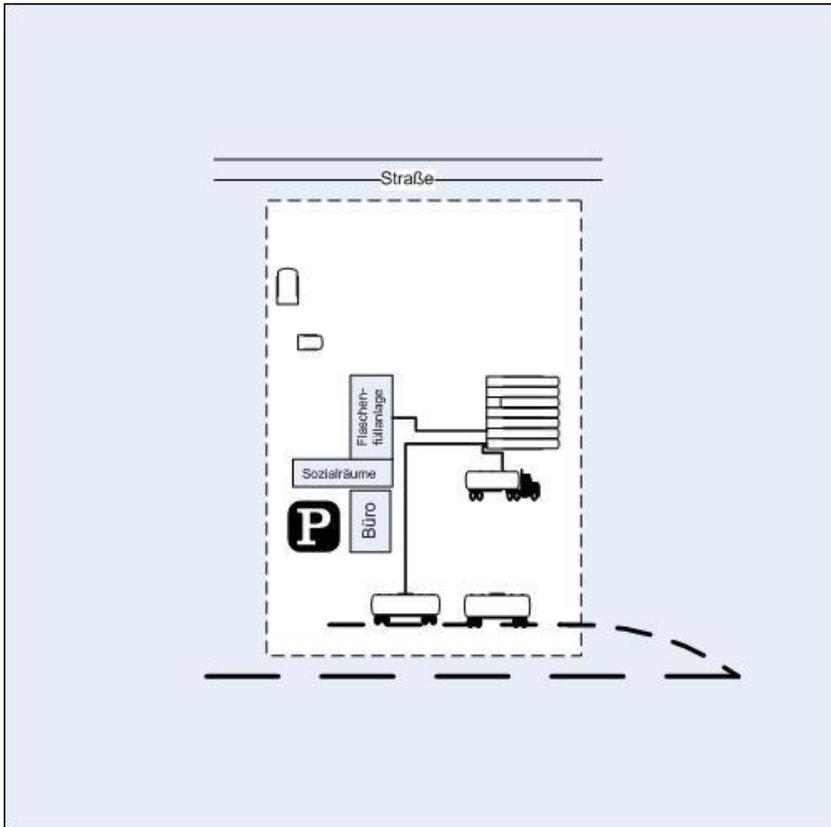
## Grundoperationen:

- Entleerung der angelieferten EKW
- Lagern des Flüssiggases
- Umfüllung in TKW
- Abfüllen in Flaschen
- Lagerung der gefüllten Flaschen

## Gefahrenpotential:

- Freisetzung von Flüssiggas

# 5. Anwendungsbeispiele - Flüssiggasanlage



Rechenaufwand:

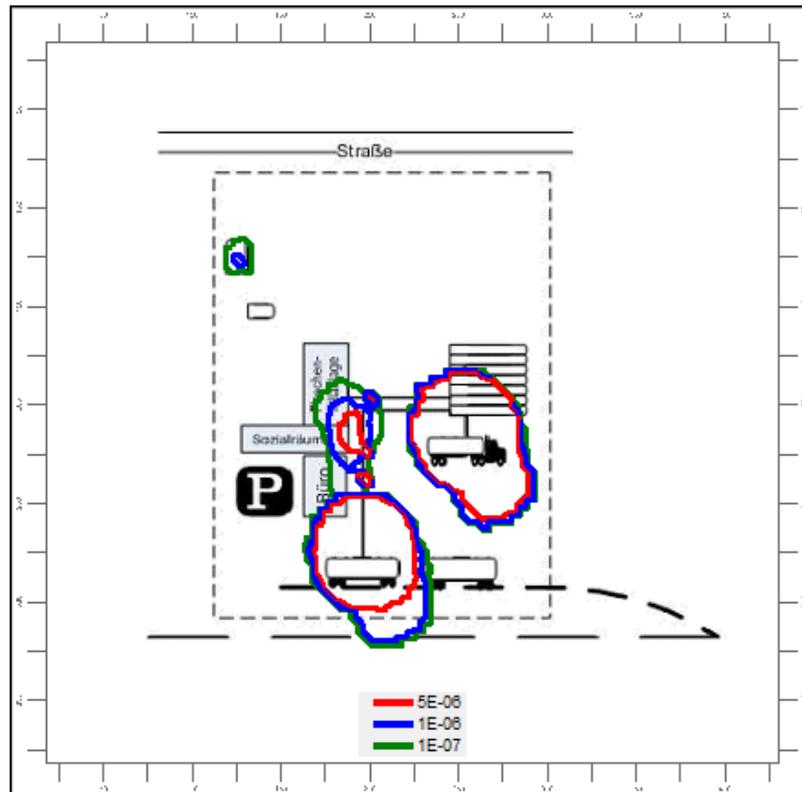
Grundrisiko:

- 14 Szenarien für die Leckagen aus Behältern, Rohrleitungen, etc.

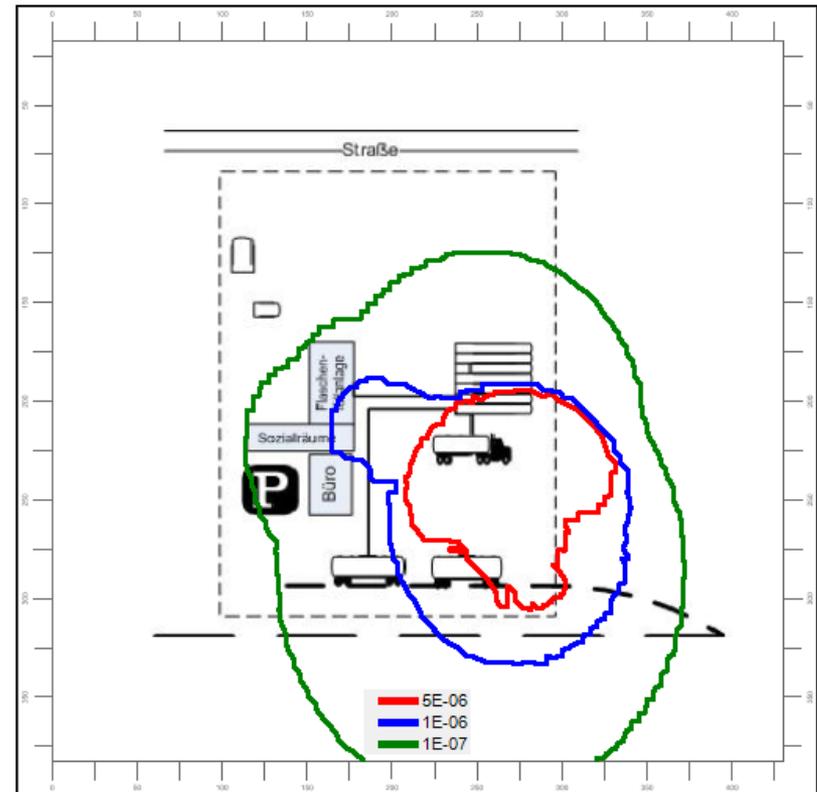
Betriebsrisiko:

- ca. 49 Fehlerbäume
- Anwendung des Abschneidekriteriums (Eintrittshäufigkeit  $< 10^{-8}/\text{Jahr}$ ) → Reduzierung der zu berechnenden Fehlerbäume für das Betriebsrisiko auf 16

# 5. Anwendungsbeispiele - Flüssiggasanlage

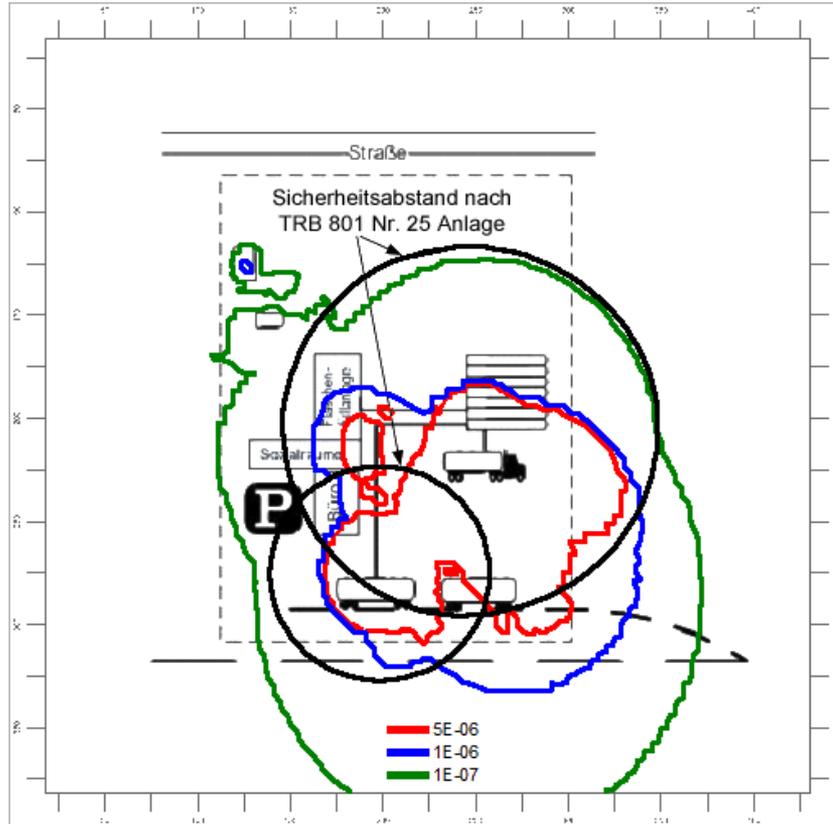


Grundrisiko, max. RW:  $5,6 \cdot 10^{-5}$  [1/a]



Betriebsrisiko, max. RW:  $2,4 \cdot 10^{-4}$  [1/a]

# 5. Anwendungsbeispiele - Flüssiggasanlage



- Sicherheitsabstand ist zu Schutzobjekten einzuhalten
- Grundlage: Flanschleckage für eine Flüssigphase führende Rohrleitung der größten Nennweite
- für die betrachtete Flüssiggasanlage wurden Sicherheitsabstände nach TRB 801 Nr. 25 Anlage berechnet:
- Pumpenstation: ca. 93 m
- EKW-Station: ca. 51 m

# 5. Anwendungsbeispiele - Flüssiggasanlage



## Fazit:

- Der Risikowert von  $5 \cdot 10^{-6}$  /Jahr entspricht somit dem akzeptierten Risiko für diese Flüssiggasanlage.
- Der erarbeitete Datensatz führt zu plausiblen Ergebnissen und kann für die weiteren Berechnungen angewendet werden.
- Das weiterentwickelte Zündwahrscheinlichkeitsmodell nach Daycock kann ebenfalls für die Risikoberechnungen verwendet werden.

- Sicherheitsabstand ist zu

zuhalten

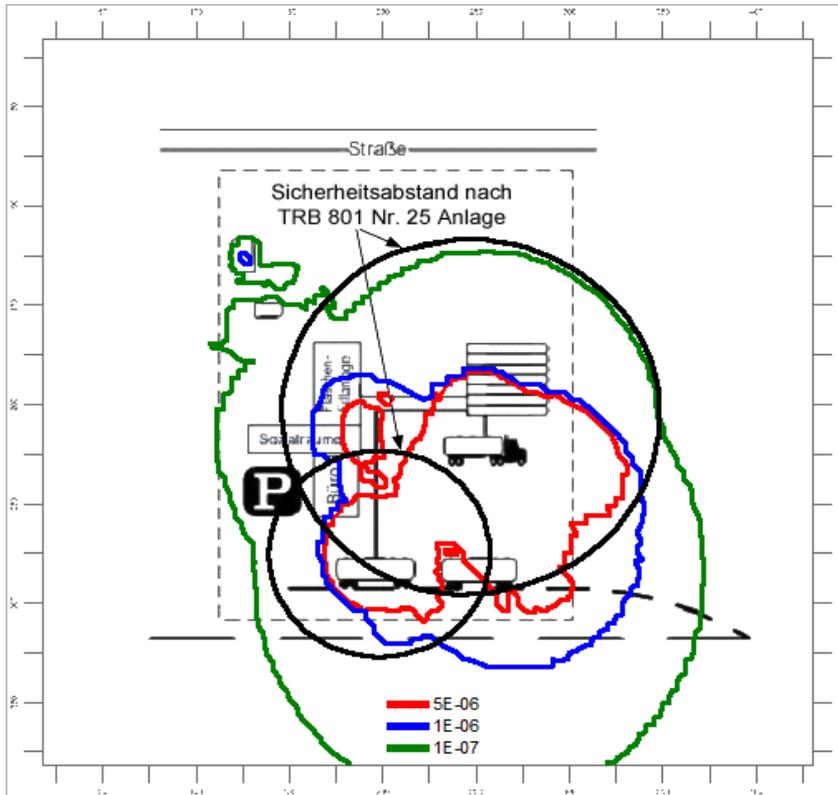
Leckage für eine  
ende Rohrleitung der

Flüssiggasanlage  
abstände nach TRB  
berechnet:

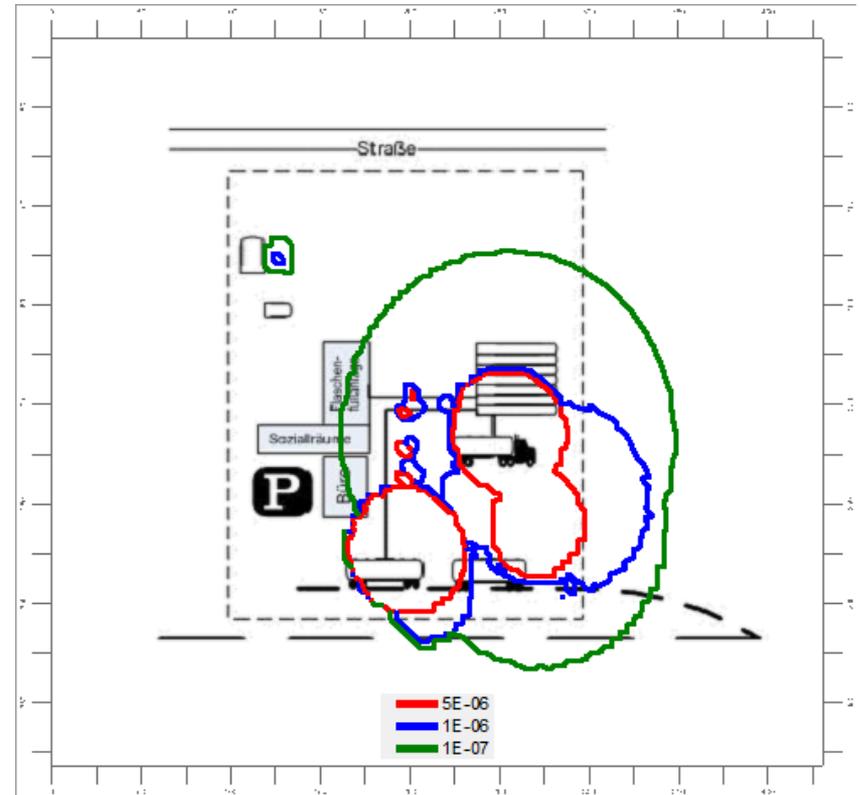
. 93 m

51 m

# 5. Anwendungsbeispiele - Flüssiggasanlage

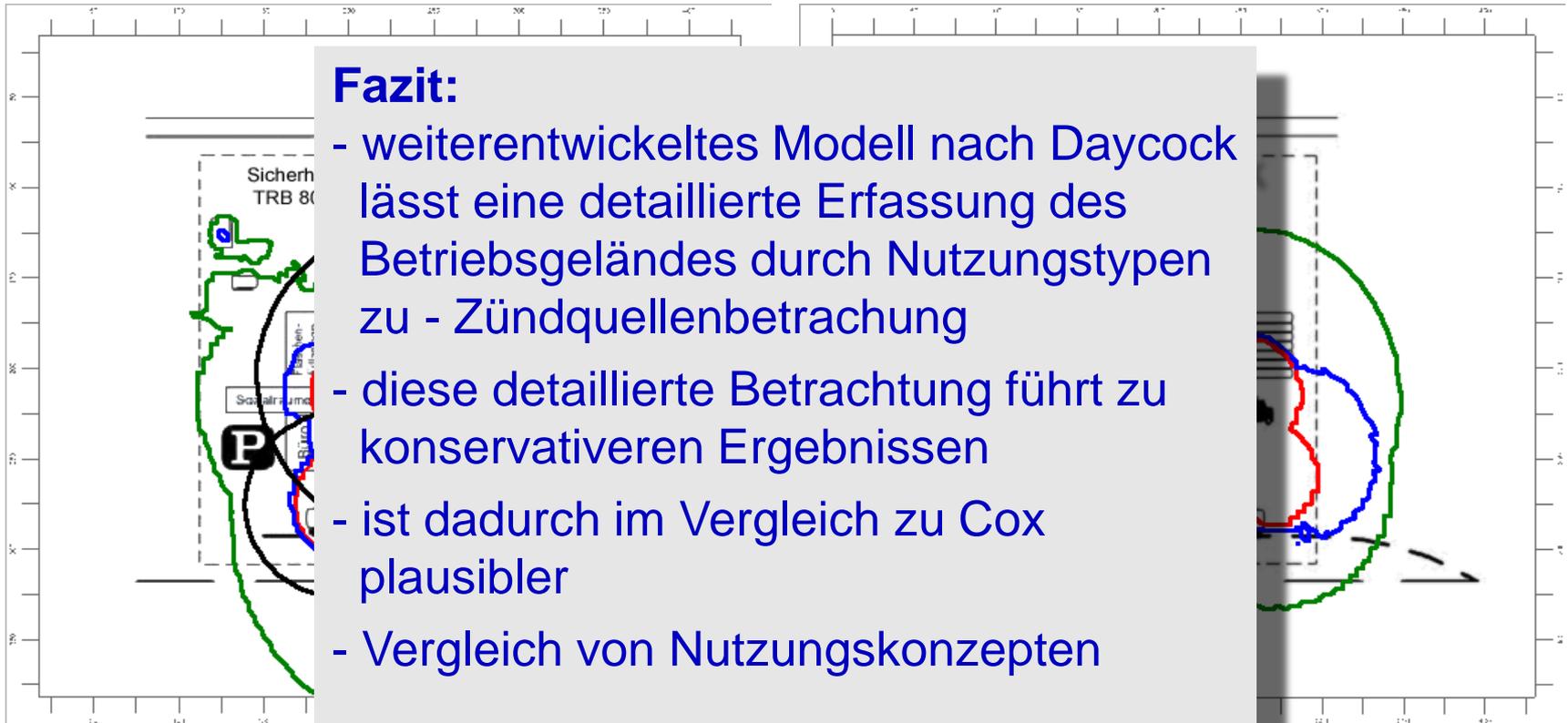


Anlagenrisiko mit erweitertem  
Zündwahrscheinlichkeitsmodell nach  
Daycock



Anlagenrisiko mit  
Zündwahrscheinlichkeitsmodell nach Cox

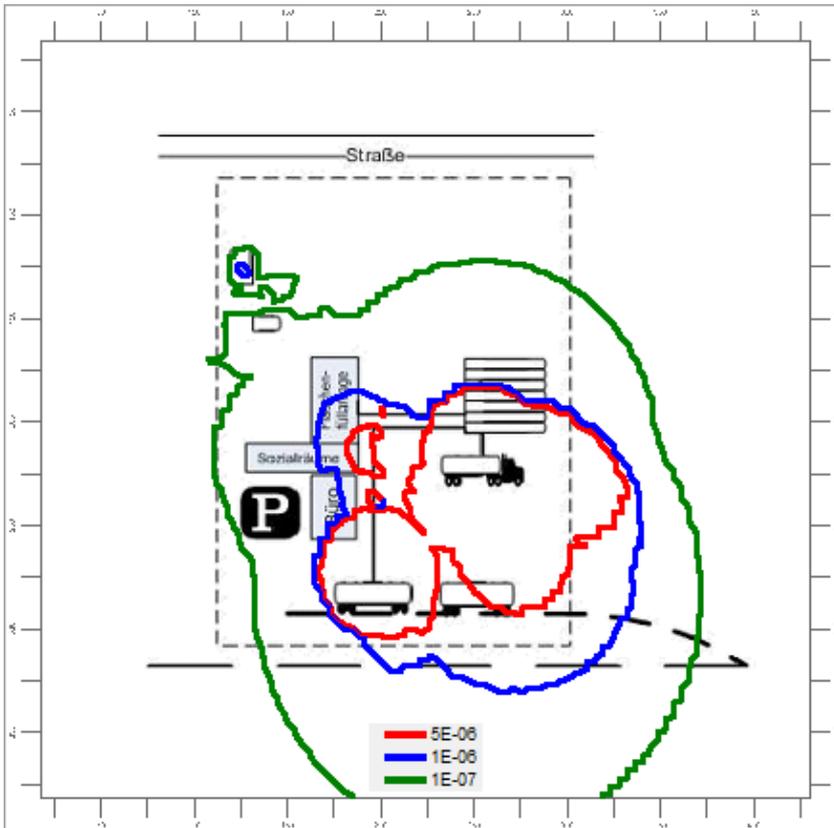
# 5. Anwendungsbeispiele - Flüssiggasanlage



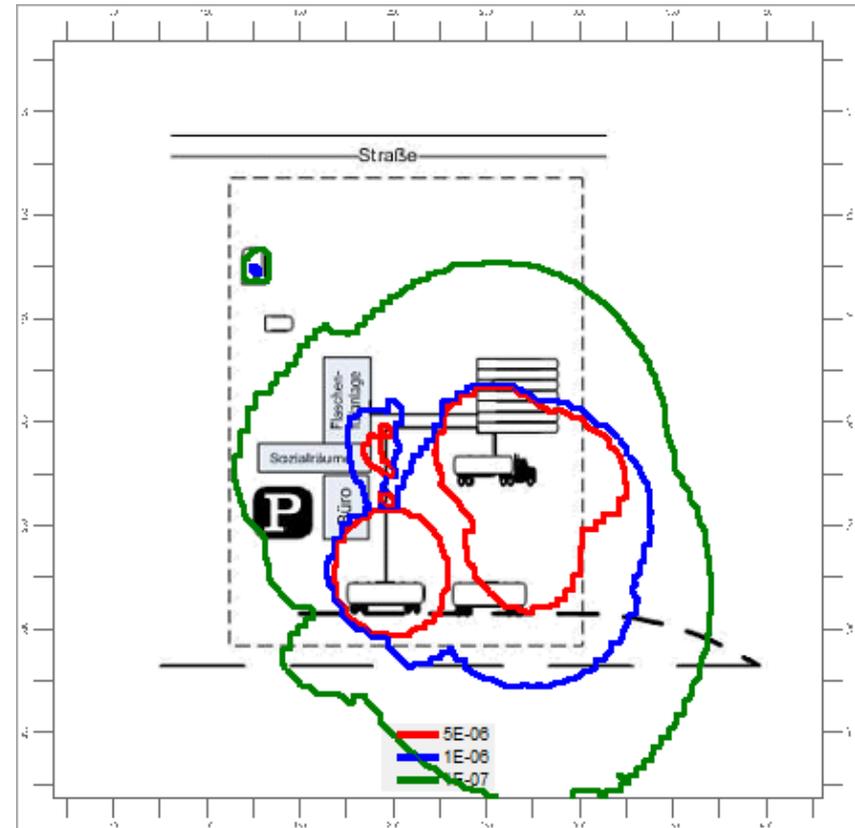
Anlagenrisiko mit erweiterten  
Zündwahrscheinlichkeitsmodell nach  
Daycock

Anlagenrisiko mit  
Zündwahrscheinlichkeitsmodell nach  
Cox

# 5. Anwendungsbeispiele - Flüssiggasanlage



Anlagenrisiko - störfallbegrenzende Maßnahmen durch die Feuerwehr

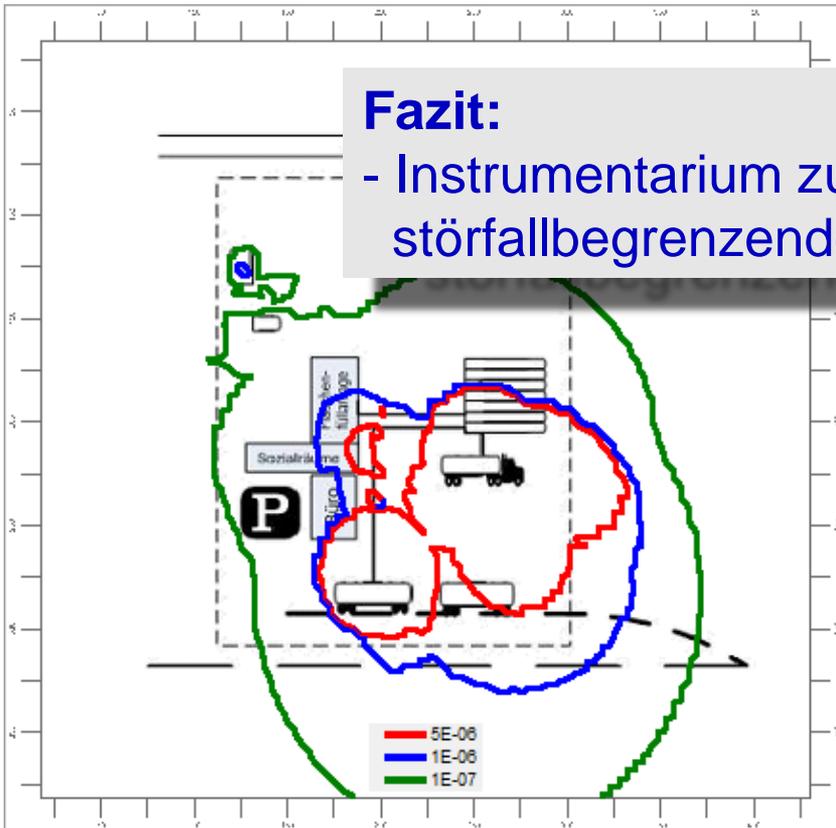


Anlagenrisiko - störfallbegrenzende Maßnahmen durch das Personal

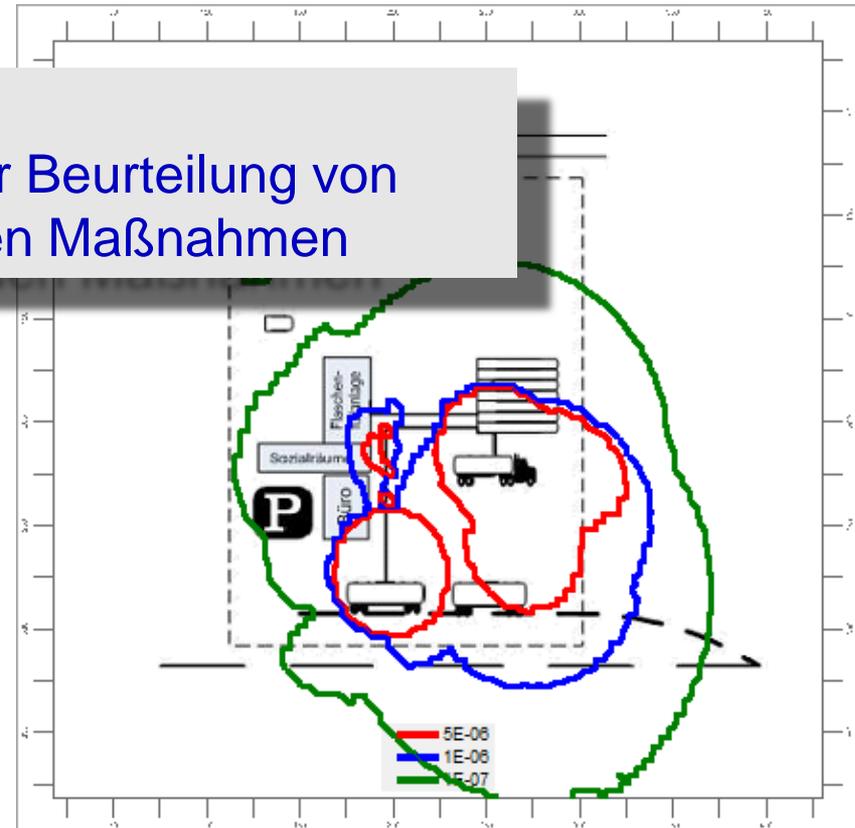
# 5. Anwendungsbeispiele - Flüssiggasanlage

## Fazit:

- Instrumentarium zur Beurteilung von störfallbegrenzenden Maßnahmen

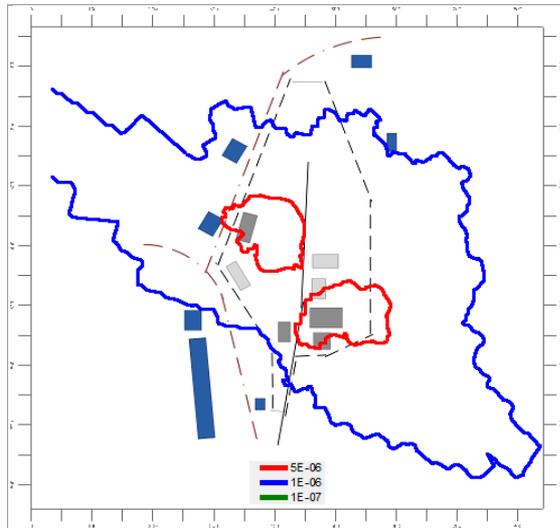


Anlagenrisiko - störfallbegrenzende Maßnahmen durch die Feuerwehr

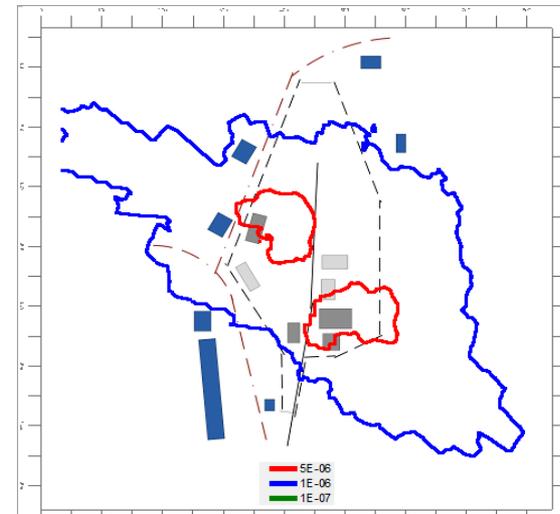


Anlagenrisiko - störfallbegrenzende Maßnahmen durch das Personal

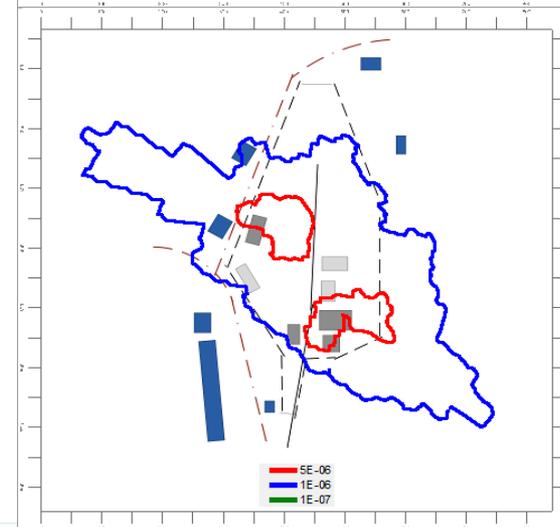
# 5. Anwendungsbeispiele - HF-Anlage



Ohne  
Berieselungs-  
anlage

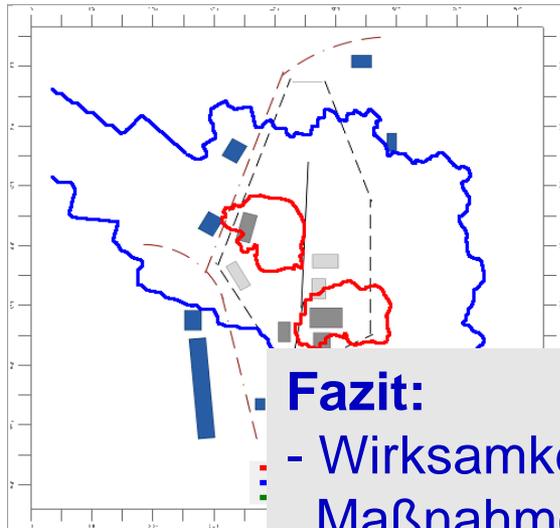


Bedienung  
von Hand



Bedienung  
per Gas-  
warnanlage

# 5. Anwendungsbeispiele - HF-Anlage



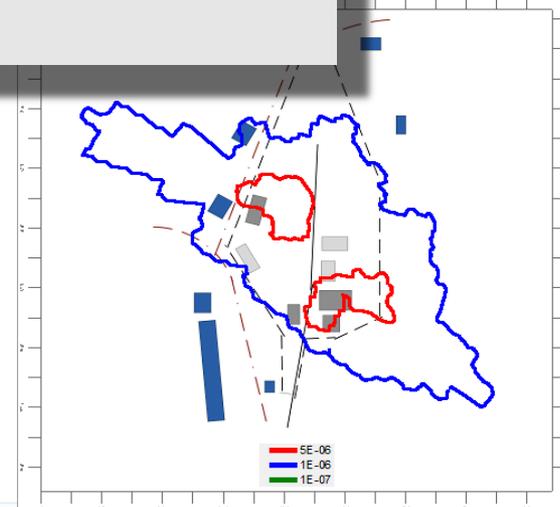
Ohne  
Berieselungs-  
anlage



Bedienung  
von Hand

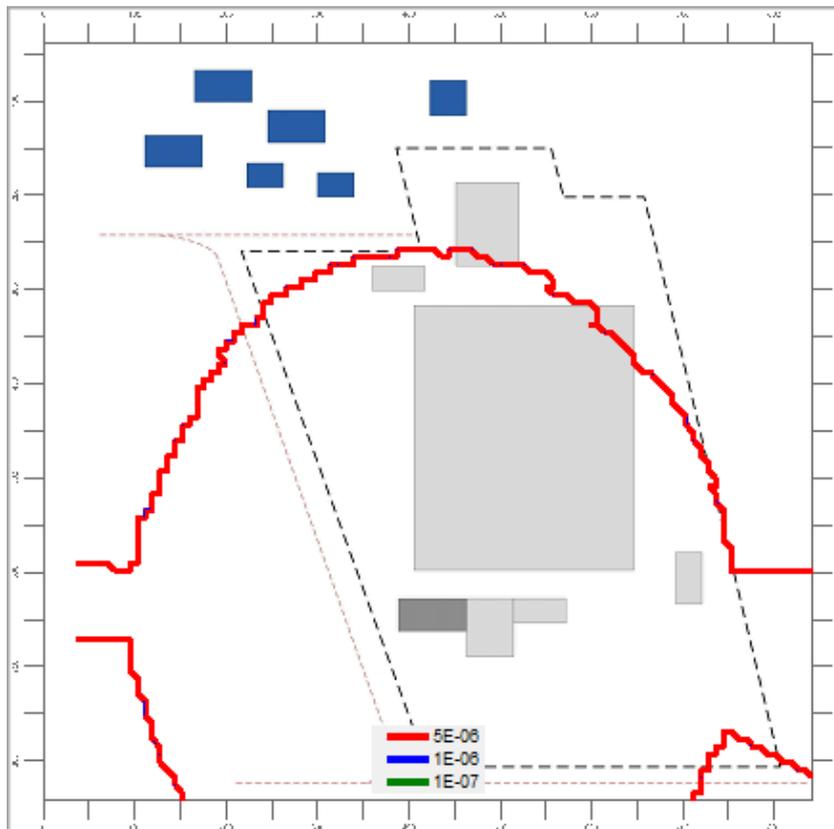
## Fazit:

- Wirksamkeit von störfallbegrenzenden Maßnahmen kann beurteilt werden
- Entscheidungsgrundlage

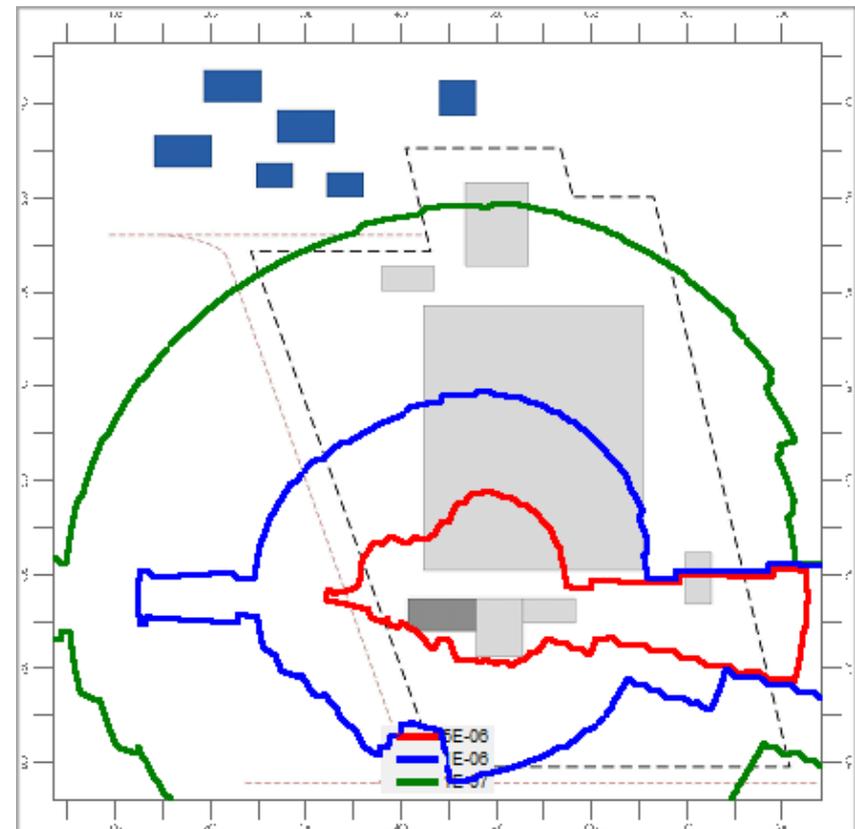


Bedienung  
per Gas-  
warnanlage

# 5. Anwendungsbeispiele - NH<sub>3</sub>-Kälteanlage



Anlagenrisiko ohne §29a BImSchG-Prüfung



Anlagenrisiko mit § 29a BImSchG-Prüfung

## 6. Vergleich mit Risikogrenzwerten

- Flüssiggasanlage:  $5 \cdot 10^{-6}$  [1/a]
- NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen:  $1 \cdot 10^{-6}$  bzw.  $1 \cdot 10^{-7}$  [1/a]
- Produktionsanlage für Fluorwasserstoff:  $5 \cdot 10^{-6}$  [1/a]
  
- Risikogrenzwerte im Kontext von Genehmigungsverfahren sind vorgegeben in:
  - Niederlande:  $10^{-5}$  [1/a] an bestehende Gebäude bzw.  $10^{-6}$  [1/a] an besonders schutzwürdigen Objekte
  - Großbritannien: ALARP-Bereich zwischen  $10^{-4}$  und  $10^{-6}$  [1/a] gewisses Maß an Risiko wird als vertretbar angesehen

## 6. Vergleich mit Risikogrenzwerten

- Flüssiggasanlage:  $5 \cdot 10^{-6}$  [1/a]
  - NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen:  $1 \cdot 10^{-6}$  bzw.  $1 \cdot 10^{-7}$  [1/a]
  - Produktionsanlage für Fluorwasserstoff:  $5 \cdot 10^{-6}$  [1/a]
- Risikogrenzwerte im Kontext von Genehmigungsverfahren sind vorgegeben in:

- Niederlande: **Fazit:** Anlagen erreichen im Zusammenhang mit der Methodik im internationalen /europäischen Vergleich akzeptable Risikowerte, die als Diskussionsbasis für Risikogrenzwerte verwendet werden können.
- Großbritannien:  $10^{-6}$  [1/a]

angesehen

# 7. Zusammenfassung

- Es wurde eine QRA-Methodik, die den Stand der Sicherheitstechnik in Deutschland abbildet, entwickelt.
- Die störfallverhindernden und - begrenzenden Maßnahmen fließen über die FTA/ETA ein.
- Dabei wurde praxisorientiert vorgegangen, um mit bekannten Ansätzen eine breite Akzeptanz zu erzielen.
- Anhand der vorgestellten Methodik der QRA konnte mit verhältnismäßigem Aufwand das Risiko der Anlagen berechnet werden.
- Der Vergleich des ermittelten Risikos in Bezug zu international verwendeten Risikogrenzwerten ergab einen akzeptablen Wert.

## 8. Schlussfolgerungen - Diskussion

- QRA erfordern einen höheren Arbeitsaufwand durch Erstellung der Fehler- und Ereignisbäume
- Hierfür werden mehr Informationen als in einem Sicherheitsbericht üblicherweise vorhanden sind benötigt
- Es werden alle Szenarien berechnet

Aber:

- großer Informationsgewinn über die Anlagen
- Hinterfragung der störfallverhindernden und –begrenzenden Maßnahmen
- Bewertung der Wirksamkeit von störfallbegrenzenden Maßnahmen
- Entscheidungsgrundlage für Nutzungskonzepte des Betriebsgeländes

TÜV Rheinland Industrie Service GmbH  
Dr.-Ing. Yvonne Drewitz  
Sachverständige nach § 29a BImSchG  
Alboinstraße 56  
12103 Berlin  
Tel.: 030-7562-1764  
[Yvonne.Drewitz@de.tuv.com](mailto:Yvonne.Drewitz@de.tuv.com)

Download Dissertation:

[http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2012/3399/pdf/drewitz\\_yvonne.pdf](http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2012/3399/pdf/drewitz_yvonne.pdf)