

**BVEG**

Leitfaden

# Auswirkungen von Störfällen im Speicherbetrieb auf die Nachbarschaft

Stand 09/2017

Bundesverband Erdgas,  
Erdöl und Geoenergie e. V.

Inhaltsverzeichnis:

0	Vorwort	3
1	Einleitung	4
2	Inhalt der Betrachtungen	4
3	Berechnungsgrundlagen	6
3.1	Randbedingungen	6
3.1.1	Gaszusammensetzung	6
3.1.2	Meteorologie	7
3.1.3	Untere Zündgrenze	9
3.1.4	Wärmestrahlungswerte	9
3.2	Berechnung der Freisetzungsraten	10
3.3	Berechnung der Auswirkungen einer Gasfreisetzung	14
3.3.1	Gasausbreitungsberechnungen	14
3.3.2	Wärmestrahlungsberechnungen	15
4	Ergebnisse der Berechnungen	17
4.1	Freisetzungsraten	17
4.2	Gasausbreitungsberechnungen	18
4.3	Wärmestrahlungsberechnungen	20
4.4	Darstellung der berechneten Abstände	22
5	Zusammenfassung	23
6	Literaturverzeichnis	23
7	Anlagenverzeichnis	23

Anhang

## **0 Vorwort**

Dieser Leitfaden bietet Fachleuten der Speicherindustrie sowie den zuständigen Fach- und Aufsichtsbehörden eine Orientierungshilfe bei der Ermittlung von Sicherheitsabständen von Untertage-Erdgasspeichern nach der Störfallverordnung.

Die Berechnungen wurden mit anerkannten Methoden unter Ansatz konservativer, d.h. besonders strenger Rahmenbedingungen durchgeführt und beruhen auf der Ermittlung von Wärmestrahlungswerten in Abhängigkeit vom austretenden Gas-Massenstrom. Dabei wurde eine große Bandbreite von Bohrungsdurchmessern und Drücken betrachtet, und es wurden verschiedene Szenarien abgedeckt.

Die Ergebnisse können als Richtwerte für die Ermittlung ausreichender Sicherheitsabstände im Rahmen von Störfallbetrachtungen und für die Beschreibung der Auswirkungen auf die Nachbarschaft herangezogen werden.

Standortspezifische Gegebenheiten wie Bohrungsausrüstung, Tiefe der Bohrung, Betriebsdruck und Umfeld des Speichers werden in diesem Leitfaden nicht betrachtet. Diese sind vom jeweiligen Betreiber im Rahmen des standortspezifischen Sicherheitsberichtes zu berücksichtigen und führen in der Regel zu geringeren Sicherheitsabständen.

## 1 Einleitung

Seit der Novellierung der Zwölften Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung - 12. BImSchV) im Mai 2000 fallen Untertagegasspeicher bei Erreichen oder Überschreiten der im Anhang I dieser Verordnung genannten Mengenschwellen unter deren Anwendungsbereich. Dieses ist unabhängig davon, ob es sich aufgrund der obertägig installierten Anlagen um eine genehmigungsbedürftige oder eine nicht genehmigungsbedürftige Anlage im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes handelt. Beim Erreichen oder Überschreiten der in Spalte 5 des Anhangs I genannten Mengenschwellen sind neben den Grundpflichten auch die erweiterten Pflichten der §§ 9-12 zu erfüllen. Dazu gehört auch die Erstellung eines Sicherheitsberichts. In diesem Sicherheitsbericht soll unter anderem dargelegt werden, wie die Gefahren von Störfällen ermittelt sowie alle erforderlichen Maßnahmen zur Verhinderung derartiger Störfälle ergriffen werden.

Dieser Abschlussbericht dient als Orientierung bei der Betrachtung von Dennoch-Störfällen an Bohrungen hinsichtlich Wärmestrahlung und Gasausbreitung. Zwischenzeitlich wurde die EU Richtlinie 2012/18/EU (Seveso III) durch eine Neufassung der Störfall-Verordnung – 12. BImSchV vom 15. März 2017 in nationales Recht umgesetzt, wodurch sich aber die Anforderungen an die Ermittlung von Gasausbreitungs- und Wärmestrahlungsradien nicht geändert haben.

Im Dezember 2000 wurde auf einer gemeinsamen Sitzung des AKK, DVGW und WEG (heute BVEG) eine firmenübergreifende Arbeitsgruppe mit dem Auftrag einberufen, um hinsichtlich des Sicherheitsberichtes die Auswirkungen von Störfällen auf die Nachbarschaft zu beschreiben. Hierzu sollte eine einfache, pragmatische, nachvollziehbare Lösung erarbeitet werden, um den Abstand der Wärmestrahlungsdichte und der Gasausbreitung darstellen zu können. Die Arbeitsgruppe hat im Oktober 2001 einen Leitfaden zur Ermittlung von anzustrebenden Abständen zwischen Speicherbohrungen und Nachbarschaft vorgelegt. Auf Initiative des damaligen WEG wurde 2012 erneut eine firmenübergreifende Arbeitsgruppe mit der Aufgabe gebildet, diesen Leitfaden hinsichtlich der beschriebenen Szenarien und Randbedingungen sowie der verwendeten Rechenprogramme zu überprüfen.

Grundlage der Betrachtungen ist die DVGW-Empfehlung "Sicherheitsbericht gemäß EU-Richtlinie 96/82/EG". In dieser sind die Szenarien möglicher schwerer Unfälle auf folgende Betrachtungen konzentriert:

1. Blowout einer Bohrung
2. Leitungsbruch mit Austritt großer Mengen des Speichermediums
3. Behälterversagen

Mögliche Auswirkungen dieser Szenarien auf die Nachbarschaft einer Speicherbohrung sind:

1. Ausbreitung einer zündfähigen Gaswolke ohne Zündung
2. Wärmebelastung bei Zündung der Gaswolke

Zur Beschreibung der Auswirkungen dieser beiden Fälle wurden Gasausbreitungs- und Wärmestrahlungsrechnungen durchgeführt.

Um das Spektrum der auch zukünftig möglichen speicherspezifischen Randbedingungen wie Druck, Temperatur, Teufe und Verrohrungsdurchmesser in der Betrachtung abzudecken und die Ausgleichskurve berechnen zu können, wurden 10 verschiedene Szenarien zu Grunde gelegt.

Der vorliegende BVEG Leitfaden beschreibt einen Vorschlag für

- die Beschreibung möglicher Szenarien und
- die Ermittlung / graphische Darstellung (Anlagen 3 - 6) möglicher Auswirkungen von Störfällen im Speicherbetrieb auf die Nachbarschaft.

Grundsätzlich kann diese Betrachtung auf alle Speicher in Deutschland angewandt werden.

Ziel dieser Betrachtung ist es, nur mit Hilfe eines ermittelten maximalen Massenstroms, der aus den speicherspezifischen Daten des zu betrachtenden Speichers errechnet wird, eine konservative Abschätzung für die Auswirkungsradien der Wärmestrahlung und Gasausbreitung zu erhalten.

Als Ergebnis wird allgemein dargestellt, in welchem Abstand zu einer Speicherbohrung im Falle eines Gasaustritts die untere Zündgrenze und einige Richtwerte für die Wärmestrahlung überschritten werden. Diese Ergebnisse dienen als Grundlage der Betrachtungen für einzelne Speicher und müssen ggf. von den Unternehmen einzelfallspezifisch ergänzt werden. So wurden beispielsweise im Einzelfall mögliche Wechselwirkungen oder Domino-Effekte sowie Aussagen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten nicht berücksichtigt. Auf Grund der allgemeingültigen, konservativ angenommenen Randbedingungen ergeben sich für die Modellrechnungen relativ große Radien. Sollte also für einen Speicher eine Einzelfallberechnung mit den tatsächlich vorhandenen Randbedingungen notwendig sein, so ist davon auszugehen, dass die sich daraus ergebenden Gasausbreitungs- und Wärmestrahlungsradien keinesfalls größer werden, als die Abschätzung es vorgibt.

In diesem Leitfaden wird nicht festgelegt, welche konkreten Schlussfolgerungen sich aus den berechneten Abständen ableiten. Diese sind im Einzelfall in Abstimmung mit der Aufsichtsbehörde festzulegen. Auf jeden Fall müssen aber gem. § 11 der 12. BImSchV die Personen, die von einem Störfall betroffen sein könnten, vom Anlagenbetreiber über die Sicherheitsmaßnahmen und das richtige Verhalten im Falle eines Störfalles informiert werden.

## 2 Inhalt der Betrachtungen

Auf Grundlage des in Abschnitt 1 beschriebenen Arbeitsauftrages hat die Arbeitsgruppe folgendes festgelegt:

- Die Berechnungen für die Ausbreitung der Gaswolke (Erreichen der unteren Zündgrenze) und der Wärmestrahlung sollen mit einem Berechnungsprogramm durchgeführt werden, das zugänglich und allgemein anerkannt ist.
- Die Betrachtungen werden auf einen Gasaustritt an einer Speicherbohrung beschränkt, da die E-Kreuze obertägig die Anlagenteile mit dem höchsten Betriebsdruck sind. Dieser Fall stellt nach Meinung der Mitglieder der Arbeitsgruppe den Worst-Case dar. Weitere Szenarien wie ein Leitungsbruch oder ein Behälterversagen werden nicht betrachtet.
- Es werden mögliche Speicher-Szenarien ausgewählt, für die dann beispielhaft Berechnungen durchgeführt werden. Bei diesen Berechnungen werden sowohl Kavernenspeicher als auch Porenspeicher berücksichtigt.
- Bei den Szenarien wird zum einen eine vertikale Ausströmung (Blowout) über einen vollständig geöffneten Rohrquerschnitt und zum anderen ein Stutzenabriss im Bohrlochkeller betrachtet. Letzterer ist z.B. denkbar, wenn bei Arbeiten auf dem Bohrungsplatz Einrichtungen am E-Kreuz beschädigt werden. Dabei ist der Querschnitt der angenommenen Leckstelle an der Rohrtour bzw. am Sondenkopf wesentlich kleiner als der relevante Querschnitt beim Blowout.
- Der Fall, dass es zu einem abgelenkten (also nicht senkrechten) Blowout mit maximaler Ausströmgeschwindigkeit über die volle Querschnittsfläche kommt, wird hier nicht betrachtet. Er kann bei der heutigen Konstruktion der Sondenköpfe ausgeschlossen werden.

### 3 Berechnungsgrundlage

#### 3.1 Randbedingungen

##### 3.1.1 Gaszusammensetzung

Bei den betrachteten Gasarten handelt es sich um typischerweise in Untertagespeichern eingelagertes Erdgas. Mit der Wahl der Gasarten Nordsee H und Holland L soll eine realistische Bandbreite der Gaszusammensetzung und –beschaffenheit abgedeckt werden. Im Vorfeld der Auswirkungsbetrachtungen wurde auch der Einfluss eines erhöhten Wasserstoffanteils im Gas betrachtet. Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass sich für Gas mit 10 % Wasserstoff im Vergleich zu reinem Erdgas marginal geringere Freisetzungsraten berechnen.

Im Folgenden sind die Gaszusammensetzung und die Gaskenngößen der betrachteten Gasarten Nordsee H und Holland L aufgeführt.

##### Gasart: Nordsee H:

###### Gaszusammensetzung:

	Mol.-%
CO <sub>2</sub>	1,91
N <sub>2</sub>	0,93
CH <sub>4</sub>	86,25
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8,56
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,89
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,39
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,05
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> +	0,02
Summe	100

###### Gaskenngöße

	11,905 kWh/m <sup>3</sup>
H <sub>i,n</sub>	10,766 kWh/m <sup>3</sup>
D (Luft=1)	0,64476
ρ <sub>n</sub>	0,83363 kg/m <sup>3</sup>
M	18,626 kg/kmol
W <sub>s,n</sub>	14,826 kWh/m <sup>3</sup>

##### Gasart: Holland L:

###### Gaszusammensetzung

	Mol.-%
CO <sub>2</sub>	1,57
N <sub>2</sub>	10,08
CH <sub>4</sub>	83,16
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4,04
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,81
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,23
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,06
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> +	0,05
Summe	100

###### Gaskenngöße

H <sub>s,n</sub>	10,344 kWh/m <sup>3</sup>
H <sub>i,n</sub>	9,340 kWh/m <sup>3</sup>
D (Luft=1)	0,64512
ρ <sub>n</sub>	0,8341 kg/m <sup>3</sup>
M	18,648 kg/kmol
W <sub>s,n</sub>	12,878 kWh/m <sup>3</sup>

### 3.1.2 Meteorologie

Den Ausbreitungsrechnungen lagen 2001 die unten aufgeführten meteorologischen Parameter zugrunde. Bei der Überarbeitung des Berichts wurden sie überprüft und unverändert übernommen.

Hintergrund der Überlegungen war, dass es zwar auch in den vergangenen Jahren einzelne, örtlich begrenzte Witterturbulenzen gegeben hat, diese aber bei der Betrachtung langjähriger Wetterstatistiken keine erkennbaren Auswirkungen zeigen. Da der vorliegende Leitfaden eine allgemeine Vorgehensweise für die in Deutschland betriebenen Untertagegasspeicher beschreibt, stellt die den Betrachtungen zugrundeliegende Meteorologie nach Einschätzung der Arbeitsgruppe nach wie vor eine belastbare Grundlage dar.

a) durchschnittliche Jahresverteilung der Stabilitätsklassen:

Stabilitätsklasse			Häufigkeit [%]		
Pasquill	Klug / Manier	Beschreibung	Station Ahlhorn	Station Hamburg-Fuhlsbüttel	Station Vogtareuth (Rosenheim)
A	V	sehr labil	2	2	9
B	IV	labil	5	5	10
C	III 2	neutral	13	14	9
D	III 1	neutral	53	56	16
E	II	stabil	14	15	25
F	I	sehr stabil	11	8	30

- b) Windgeschwindigkeiten (in 10 m Anemometerhöhe):  
1 m/s (Berechnung einer Schwachwindsituation)  
3 m/s (an den beiden Stationen die häufigste Windgeschwindigkeit mit 9 bzw. 10,5 %)  
10 m/s (Berechnung für eine Starkwindsituation)

Die mittlere Windgeschwindigkeit im Raum Rosenheim beträgt 2-3 m/s.

- c) mittlere Lufttemperatur:  
Annahme: 15 °C

Beispiele:

- Raum Bremen und Visbek: im Jahresmittel 8,8 °C
- Raum Rosenheim: im Jahresmittel 8 °C

- d) mittlere relative Luftfeuchtigkeit:  
Für den Raum Bremen und Visbek beträgt diese im Jahresmittel 80 %.

Bei der Berechnung der Gasausbreitung wurde die neutrale Stabilitätsklasse D angenommen, da diese im norddeutschen Raum die mit Abstand häufigste meteorologische Situation beschreibt. Für die Ermittlung der max. Höhe der Gaswolke bzw. der 4 %-Kontur wurde eine Windgeschwindigkeit von 1 m/s und für den max. Radius 10 m/s angesetzt. Hierbei handelt es sich um eine Abweichung des 2001 zugrunde gelegten Ansatzes. Dieser Ansatz entspricht aber der heute in vielen Fällen mit den zuständigen Behörden abgestimmten Vorgehensweise und wurde daher von der Arbeitsgruppe herangezogen.

Bei der Berechnung der Wärmestrahlung wurden Windgeschwindigkeiten von 1m/s, 3 m/s und 10 m/s berücksichtigt. Die gewählte Stabilitätsklasse hat keinen Einfluss auf die Ausdehnung des ermittelten Bereiches.

### 3.1.3 Untere Zündgrenze

Die untere Zündgrenzen oder untere Explosionsgrenze entspricht der minimalen Gasmenge im Gemisch mit Umgebungsluft, bei der seine Entzündung (beim Vorhandensein einer Zündquelle) erfolgt. Die untere Zündgrenze von Erdgas liegt, je nach Zusammensetzung bei ca. 5 Vol.-%, die von Methan bei 4,4 Vol.-%.

Bei den Berechnungen für die Gasausbreitung wurde ein Wert von 4 Vol.-% für die ermittelten Konturen zugrunde gelegt. Diese Überlegungen sind unverändert zu denen im Bericht 2001.

### 3.1.4 Wärmestrahlungswerte

Die im Bericht von 2001 genannten Wärmestrahlungswerte wurden überprüft. Dabei wurden unter anderem ergänzend der KAS-Leitfaden 18 /1/ und die EN ISO 23251 /2/ (als Nachfolge Richtlinie der API RP521) herangezogen. In der folgenden Tabelle sind Werte für die Wärmestromdichte dargestellt, die den beiden genannten Dokumenten sowie einem Rahmenbericht der schweizerischen Erdgaswirtschaft /3/ entnommen wurden.

Wärmestromdichte [kW/m <sup>2</sup> ]	Beschreibung / Wirkung
1,3	maximale Sonneneinstrahlung
<b>1,58</b>	zulässiger Wert bei kontinuierlichem Aufenthalt von Personen
1,6	Immissions-Toleranzwert gem. KAS-18 (Grenze des Beginns nachteiliger Wirkungen für den Menschen)
4,5	kritische Bestrahlungsstärke für öffentliche Straßen
<b>4,73</b>	maximaler Wert für Bereiche, in denen durch das Betriebspersonal in seiner üblichen Arbeitsschutzbekleidung kurzzeitig (2-3 Minuten) Maßnahmen gem. Notfallplanung durchgeführt werden können
6,31	maximaler Wert für Bereiche, in denen durch das Betriebspersonal in seiner üblichen Arbeitsschutzbekleidung sehr kurzzeitig (bis 30 Sekunden) Maßnahmen gem. Notfallplanung durchgeführt werden können
8	Grenze für wahrscheinliche Feuerübertragung
<b>12 / 12,6</b>	typische in Deutschland anzutreffende Gewerbebebauung bietet unbegrenzt Schutz
12,5 / 13,4	induzierte Entzündung von Holz, Pflanzen möglich
25	Gebäude bieten Schutz für ca. 15 Minuten Entzündung von Holz nach ca. 5 – 15 Minuten
37,5	ausreichend, um Schäden an Anlagenteilen hervorzurufen

Die in der Tabelle hervorgehobenen Wärmestrahlungswerte wurden für die Wärmestrahlungsberechnungen als Referenzwerte herangezogen. Diese Auswahl entspricht unverändert der Auswahl, die bei der Erstellung des Berichts von 2001 getroffen wurde.

### 3.2 Berechnung der Freisetzungsraten

Bei der Definition möglicher Austrittsszenarien wurden die im Bericht von 2001 beschriebenen Szenarien Blowout und Abriss eines Stutzens im Bohrlochkeller überprüft und weiterentwickelt. Als Ergebnis wurden folgende Fälle definiert:

a) Vertikales Ausströmen (Blowout)

Die in nachfolgender Tabelle aufgeführten Beispiele decken das Spektrum der in Deutschland momentan betriebenen Untertagegasspeicher ab. Dabei wurden zum einen unterschiedliche Verrohrungen (Durchmesser, Teufe) als auch unterschiedliche Speicherparameter (Druck, Temperatur) berücksichtigt. Hier wurden im Vergleich zu 2001 die Szenarien Nr. 8-10 ergänzt.

Szenario Nr.	Verrohrung	$d_i$ [mm]	Tiefe des Rohrschuhs [m]	Druck am Rohrschuh [bar]	Temperatur am Rohrschuh [°C]
1	9 5/8"	220	1400	270	75
2	9 5/8"	220	1000	190	45
3	8 5/8"	200	1000	190	45
4	7"	158	1000	190	45
5	7"	158	2100	320	85
6	7"	158	2600	410	115
7	3 1/2"	70	450	40	28
8	10 3/4"	250	1280	230	53
9	11 3/4"	276	1000	190	45
10	13 3/8"	315	1400	270	75

b) Stutzenabriss (im Bohrlochkeller)

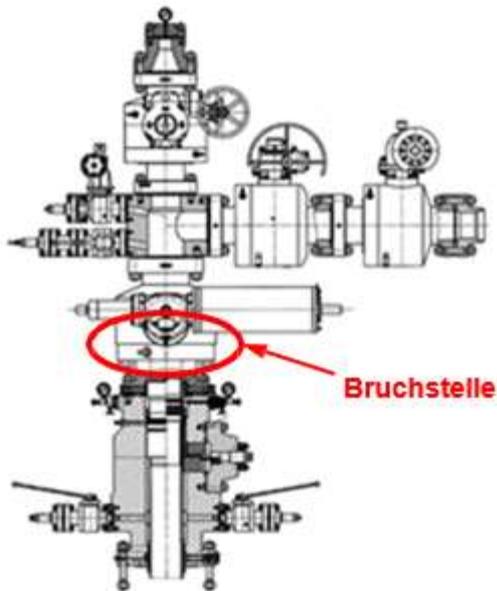
Für die unter a) aufgeführten Speicherbohrungen wurde für dieses Szenario davon ausgegangen, dass Gas aus einer Leckstelle in den Bohrlochkeller strömt. Zur Abschätzung der Größe der Leckstelle wurde angenommen, dass ein seitlicher Ringraumabgang mit einem Durchmesser von 2 1/16" abreißt bzw. abgeschlagen wird und durch diesen Gas über einen Austrittsquerschnitt von ca.  $A_{Leck} \approx 21,5 \text{ cm}^2$  strömt. Ein Durchmesser von 2 1/16" wurde gewählt, da im Allgemeinen im Bereich des Bohrlochkellers keine Stutzen größer 2" und auch keine größeren Dichtflächen vorhanden sind.

Dabei wurde der 2001 für Szenario b) hilfsweise konstruierte Ansatz, dass es in diesem Fall zum Ausströmen mit einer verringerten Ausströmgeschwindigkeit über den gesamten Querschnitt des Bohrlochkellers kommt, hinterfragt. Auch damals war sich die Arbeitsgruppe schon bewusst, dass ein solches Szenario die Realität nur sehr unzureichend abbildet, wollte aber den Fall betrachten, das ausströmende Gas oberflächennah „wabert“ und nicht mit einer hohen Geschwindigkeit aus der Leckage senkrecht „herausschießt“. Dieser Fall wird durch die aktuellen Berechnungen nicht mehr abgebildet. Vielmehr wurde nun die sich tatsächlich bei einem Stutzenabriss im Bohrlochkeller ausbildende Gaswolke simuliert. Diese Simulation gibt die Realität besser wieder, weshalb sich die Arbeitsgruppe auch für diese Modifikation des Szenario b) entschied.

Im Weiteren soll nun kurz die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Freisetzungsraten für die Szenarien a) und b) beschrieben werden.

Darstellung der betrachteten Szenarien Blowout a) und Stutzenabriss b)

a) Vollabriss des E-Kreuzes und ungehindertes, vertikales Ausströmen

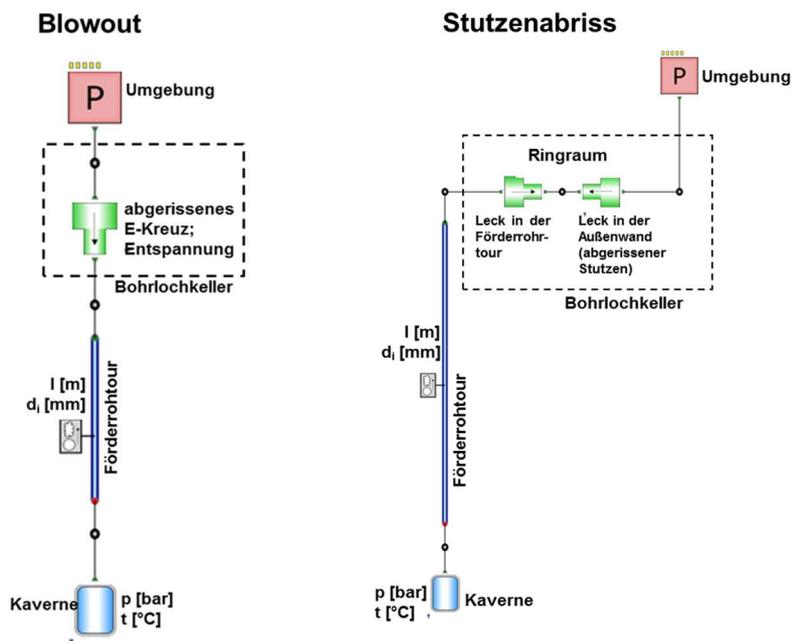


b) Abriss des 2 1/16"-Stutzens (Ringraumentlüftung), Ausströmen in den Bohrlochkeller



Die Berechnung der Massenströme wurde nicht gem. der Vorgehensweise von Marx und Vogel /4/ durchgeführt, sondern mit dem Programm „Flowmaster“. Es wurden aber zu Beginn Vergleichsberechnungen durchgeführt. Beide Verfahren liefern annähernd gleiche Ergebnisse, wobei bei der Verwendung von Flowmaster das Realgasverhalten implizit berücksichtigt wird.

## Schematische Darstellung der Berechnungsfälle in Flowmaster



Auf Basis des berechneten Massenstroms können Gasfreisetzungen analysiert werden, die nach der Freisetzung aus einer Quelle mit definiertem Durchmesser, vertikal oder unter einem Winkel relativ zur Vertikalen ungestört erfolgen – wie der Blowout des Szenarios a). Hierzu können kommerziell verfügbare, vereinfachte, halbempirische Effektberechnungsverfahren eingesetzt werden.

Wechselwirkungen mit dem Boden bei quasi horizontalen Freisetzungen und die damit einhergehende Entstehung von Wandstrahlen lassen sich mit diesen Werkzeugen ebenfalls berechnen – wie beim Stutzenabriss des Szenarios b). Die vereinfachten Verfahren bieten aber nicht die Möglichkeit, Wechselwirkungen mit Hindernissen abzubilden, die komplizierte dreidimensionale Strömungszustände hervorrufen.

Strömungszustände dieser Art würden zum Beispiel im hier betrachteten Fall auftreten, wenn es zu einer Gasfreisetzung über einen Rohrstutzen am Eruptionskreuz von Speicherbohrungen unterhalb der Geländeoberfläche kommt. In solchen Fällen würde das freiwerdende Gas zunächst mit hohem Impuls auf die Wand des Bohrlochkellers treffen und dort in beliebiger Richtung parallel zur Wand umgelenkt werden. Nach der Umlenkung besitzt die Gasströmung Eigenschaften, die sich mit den Methoden der Effektberechnungsprogramme nicht abbilden lassen.

In einem ersten Schritt kann angenommen werden, dass sich die freiwerdende Gasmenge, gleichmäßig über den Bohrlochkellerquerschnitt verteilt und dann vertikal austritt. Unter dieser Voraussetzung lassen sich kommerzielle Berechnungsprogramme zur Beschreibung der Auswirkungen der Gasfreisetzung einsetzen, sofern die typischen, relativ großen horizontalen Abmessungen des Bohrlochkellers als Austrittsdurchmesser der Gasquelle vom Berechnungsprogramm als Eingabewert akzeptiert werden (dieses Vorgehen wurde 2001 gewählt).

Um das Szenario b) realitätsnäher beschreiben zu können, wurde der Fall der Gasfreisetzung im Bohrlochkeller über einen typischen 2 1/16"-Stutzen ohne Verbrennung numerisch simuliert. Verwendet wurde hierzu der CFD-Code FLUENT.

Die Simulation der Gasfreisetzung über den 2 1/16"-Stutzen bringt die Erkenntnis, dass sich ein einzelner vertikaler Strahl aus dem Bohrlochkeller heraus bildet, der allerdings verglichen mit dem gesamten Bohrlochkellerquerschnitt einen deutlich geringeren Querschnitt aufweist. Folgendes lässt sich als Ergebnis festhalten:

- Die Gasfahne infolge einer Bohrlochkeller-Leckage lässt sich durch einen einzelnen, vertikal nach oben gerichteten und rotationsymmetrischen Strahl annähern.
- Der Strahldurchmesser ergibt sich aus der Forderung nach sonischen Bedingungen im fiktiven Strahlaustritt.
- Diese Näherung gilt nicht in unmittelbarer Bohrlochzellernähe.

Die Gasfreisetzung im Bohrlochkeller kann nach diesem Konzept unter Verwendung eines fiktiven Austrittsdurchmessers ähnlich dem Blowout behandelt werden. Im betrachteten Fall des Abrisses eines 2 1/16" Stutzens beträgt dieser fiktive Durchmesser  $\sim 0,5$  m. Dies betrifft sowohl die Berechnung der Ausbreitung des Gases ohne Zündung als auch die der Wärmestrahlung der Flamme bei Entzündung des austretenden Gases.

#### Anmerkung

In diesem Abschnitt ist beispielhaft eine Möglichkeit beschrieben worden, um die Freisetzungsraten für die beschriebenen Szenarien als Grundlage der weiteren Betrachtungen für die Auswirkungen der Gasfreisetzung zu berechnen.

Wenn für die Berechnung der Freisetzungsraten beim Blowout die von Marx und Vogel beschriebene Vorgehensweise /4/ verwendet wird, gelten folgende Annahmen und Voraussetzungen:

- Druck / Temperatur im Speicher werden als konstant betrachtet, d.h. die zeitliche Änderung der Blowoutrate wird nicht betrachtet; durch die Verwendung des maximalen Speicherdruckes ist bereits der Extremfall abgedeckt.
- Die Strömung ist stationär und reibungsbehaftet (turbulent).
- In der Bohrung erfolgt kein Wärmeaustausch zwischen Gas und äußeren Medien.
- Die Strömung erfolgt nur über die vertikale Förderrohrtour, deren Querschnitt über die Bohrung konstant ist.
- Der Isentropenexponent ( $\kappa$ ) wird gemittelt zwischen Speicher- und Kopfbedingungen. Dies führt zu geringen Temperaturen an der Ausströmstelle. Ggf. muss der  $\kappa$ -Wert iteriert werden.
- Porenspeicher werden analog zu Kavernenspeichern behandelt (Annahme eines „Idealkessels“)

Bei Berechnung der Freisetzungsraten beim Stutzenabriss kann ebenfalls die Vorgehensweise von Marx und Vogel angewandt werden. Die Gleichungen müssen dann jedoch so modifiziert werden, dass Durchmesseränderungen der Bohrung berücksichtigt werden können, in diesem Fall die Reduzierung des Rohrquerschnitts auf den Leckquerschnitt ( $21,5 \text{ cm}^2$ ). Die Gase können als ideal betrachtet werden. Um der Änderung des Isentropenexponenten in Abhängigkeit von Druck und Temperatur dennoch in etwa gerecht zu werden, kann die Rechnung mit einem zwischen Sondenkopf und Rohrschuh gemittelten Wert dieser Größe erfolgen.

Die Freisetzungsraten können im Rahmen einer Einzelfallbetrachtung aber auch mit anderen Methoden berechnet werden.

### 3.3 Berechnung der Auswirkungen einer Gasfreisetzung

Für die berechneten Freisetzungsraten wurden als mögliche Konsequenzen die Ausbreitung einer zündfähigen Gaswolke und, im Falle einer Entzündung, die Wärmestrahlung betrachtet. Dieses geschah für den Bericht 2001 unter Nutzung der damals kommerziell zur Verfügung stehenden Softwaretools TECJET und FRED. Beide Programmpakete stehen mittlerweile aber nicht mehr am Markt zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde nach einem neuen Berechnungstool gesucht und verschiedene Verfahren verglichen. Die Wahl der Arbeitsgruppe fiel dabei auf das Programmpaket PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) der Firma Det Norske Veritas (DNV).

Bei dieser Wahl wurden zwei Aspekte besonders berücksichtigt, zum einen die Ergebnisse durchgeführter Vergleichsrechnungen (s.a. 3.3.2). Zum anderen handelt es sich bei DNV um einen allgemein anerkannten Anbieter und es gibt seitens der beteiligten Firmen gute Erfahrungen bezüglich der Akzeptanz dieses Programmpakets bei den zuständigen Behörden.

#### 3.3.1 Gasausbreitungsberechnungen

Die verschiedenen kommerziell verfügbaren Softwarepakete verwenden von den Grundlagen her sehr ähnliche Verfahren zur Berechnung der strahlförmigen Gasausbreitung. Es handelt sich dabei um sogenannte Integralverfahren, die die Entwicklung von Größen wie einer geeignet gemittelten Geschwindigkeit, eines typischen Strahldurchmessers, einer mittleren Gaskonzentration usw. entlang der Strahlachse verfolgen.

Während Shell Fred z.B. auf HGSYSTEM, ein im Detail veröffentlichtes theoretisches Konzept zurückgreift, verwendet die Software PHAST von DNV mit UDM (Unified Dispersion Modell) ein eigenes Verfahren. Wie die Untersuchung verschiedener Dispersionsmodelle durch CERC (Cambridge Environmental Research Consultants, UK) im Auftrag der Europäischen Union gezeigt hat, weisen UDM und HGSYSTEM aber weitgehende Parallelen auf. Für beide Ansätze wurden ausführliche Validierungen durch die Hersteller und Dritte durchgeführt.

Der Vergleich der mit Shell Fred und PHAST erzielbaren Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen lieferte für den relevanten Parameterbereich außerdem eine im Rahmen der Genauigkeit der Verfahren gute Übereinstimmung. Da die Zuverlässigkeit der Integralverfahren für einfache Freisetzungsephänomene (strahlförmig, kreisrunder Austrittsquerschnitt) als gesichert angesehen werden kann, wurden die hier erforderlichen Berechnungen der Strahlausbreitung mit dem am Markt weiterhin verfügbaren Werkzeug PHAST vorgenommen.

Die Gasausbreitungsberechnungen wurden mit dem „Dispersion“-Modul des Softwarepakets PHAST 7.2.1, der Firma Det Norske Veritas durchgeführt.

Es wurden folgende Eingangsdaten zugrunde gelegt:

- Massenstrom                      entsprechend der berechneten Freisetzungsraten für den Blowout und den Stutzenabriss
- Ausströmkoeffizient            1
- Windgeschwindigkeit          1 m/s zur Bestimmung der vertikalen Ausdehnung und  
10 m/s zur Bestimmung der horizontalen Ausdehnung  
des betroffenen Bereiches
- rel. Luftfeuchtigkeit          80 %
- Umgebungstemperatur         15 °C
- Oberflächenrauigkeit         0,1 (offene Landschaft)
- Stabilitätsklasse                D (neutral)

### 3.3.2 Wärmestrahlungsberechnungen

Für die Wärmestrahlungsrechnungen wurden neben PHAST Module des Softwaretools Shell FRED sowie die Software Flaresim und DISMA in den Verfahrensvergleich einbezogen. Die folgende Tabelle zeigt die miteinander verglichenen Softwaremodule mit weiteren Details.

Nr.	Modell	Theoretischer Hintergrund
1	Shell Fred, Pressurised Release, <b>Generalised Jet Fire Model</b>	Chamberlain Modell, firmeneigene Modifikation, ohne veröffentlichte Dokumentation
2	Shell Fred Gas Jet Flame, <b>Gas Jet Fire Model</b>	Chamberlain, modifiziert
3	Flaresim	API Methode, API-RP-521, DIN EN 23251
4	PHAST (DNV)	Chamberlain, modifiziert
5	DISMA (TÜV Rheinland)	Chamberlain, modifiziert nach TNO Yellow Book

Diese Software-Werkzeuge können in Grenzen anhand der jeweils dokumentierten Implementierung miteinander verglichen werden. Die Genauigkeit der individuellen Formulierungen lässt sich anhand des Vergleichs jedoch nicht abschätzen.

Der Vergleich von Rechenergebnissen, die mit den angegebenen Verfahren ermittelt wurden, zeigt eine erhebliche Spanne der prognostizierten Gefährdungsradien.

		Reichweite der 12 kW/m <sup>2</sup> -Kontur	
Nr.	Modell	Bodenoberfläche	10 m über Grund
1	Shell Fred, Pressurised release	Kein Bodenkontakt	54 m
2	Shell Fred Modell: Gas Jet Flame	88 m	93 m
3	Flaresim	50 m	70 m
4	PHAST	96 m	100 m
5	DISMA	88 m	93 m

Infolge dieser festgestellten erheblichen Unterschiede konnte nicht unmittelbar entschieden werden, welche Software zur weiteren Betrachtung herangezogen werden sollte, daher wurden weitergehende Betrachtungen durchgeführt, die an dieser Stelle nicht weiter dargestellt werden sollen. Das Ergebnis der Betrachtungen lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Modellierung von Shell Fred Pressurised Release basiert offenbar an verschiedenen Stellen auf nicht ausreichend konservativen Annahmen, so dass dieses Verfahren für die hier relevanten Fälle nicht eingesetzt werden sollte.
- Die Ergebnisse von Shell Fred Gas Jet Flame und PHAST sind plausibler und in guter Übereinstimmung mit experimentell ermittelten Daten.
- Verfahren zur Bestimmung der Wärmestrahlungsimmission großer Gasfreisetzungen sollten ähnliche Ergebnisse wie diese beiden Modelle liefern

Auf dieser Grundlage wurde durch die Arbeitsgruppe die Entscheidung getroffen, das Softwarepaket PHAST für die Berechnung der Wärmestrahlung einzusetzen.

Die Berechnung der Wärmestrahlungsverteilung wurde mit dem „Jet Fire“-Modul und dem „Cone-Model“ des Softwarepakets PHAST 7.2.1 durchgeführt.

Für die Berechnungen wurden folgende Eingangsdaten angenommen:

- |                         |  |
|-------------------------|--|
| ▪ Massenstrom           | entsprechend der berechneten Freisetzungsraten für den Blowout und den Stutzenabriss |
| ▪ Temperatur            | entsprechend der Ergebnisse aus der Berechnung der Raten                             |
| ▪ Quellhöhe             | 0 m beim Blowout / 1 m beim Stutzenabriss  |
| ▪ Ausströmkoefizient    | 1  |
| ▪ Windgeschwindigkeit   | 1 m/s, 3 m/s, 10 m/s   |
| ▪ rel. Luftfeuchtigkeit | 80 %   |
| ▪ Umgebungstemperatur   | 15 °C  |
| ▪ Oberflächenrauigkeit  | 0,1 (offene Landschaft)  |

## 4 Ergebnisse der Berechnungen

### 4.1 Freisetzungsraten

(a) Vertikales Ausströmen (Blowout)

Gasart Nordsee H:

Szenario Nr.	Druck am Sondenkopf [bar]	Temperatur am Sondenkopf [°C]	Temperatur nach atm. Entspannung [°C]	Massenstrom [kg/s]	Geschwindigkeit [m/s]
1	22,3	22,2	-10,0	269,0	408,9
2	17,1	-6,3	-42,4	218,3	388,1
3	16,3	-2,9	-37,5	170,7	391,4
4	14,3	-2,6	-35,4	92,7	392,7
5	18,2	28,2	0,2	111,3	414,6
6	20,4	58,9	30,5	118,5	432,1
7	2,5	-12,7	-37,9	3,1	392,1
8	20,7	2,1	-34,6	338,2	393,4
9	34,8	-4,0	-41,4	392,7	388,9
10	48,8	20,2	-15,6	681,3	406,0

Gasart Holland L:

Szenario Nr.	Druck am Sondenkopf [bar]	Temperatur am Sondenkopf [°C]	Temperatur nach atm. Entspannung [°C]	Massenstrom [kg/s]	Geschwindigkeit [m/s]
1	20,6	19,8	-11,6	253,6	409,6
2	16,2	-5,2	-40,3	209,6	391,3
3	15,4	-5,0	-39,5	163,9	391,7
4	13,5	-4,7	-37,8	89,1	392,6
5	16,7	25,7	-2,2	104,4	414,4
6	18,7	51,0	27,9	111,2	431,6
7	2,6	-14,9	-42,3	3,1	389,3
8	19,4	0,0	-35,8	321,8	394,5
9	33,1	-5,8	-42,6	377,0	390,1
10	45,5	18,2	-16,1	642,1	407,7

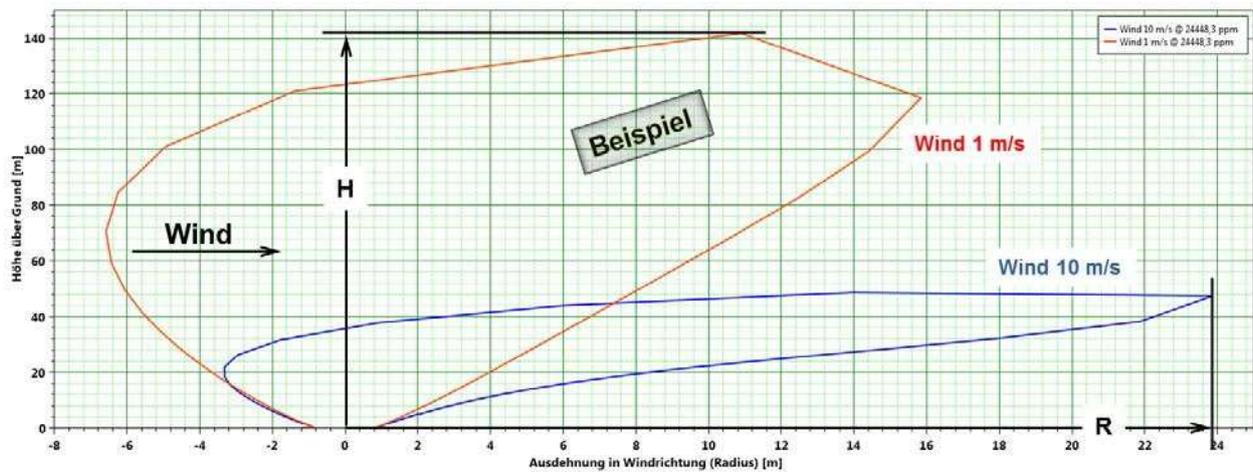
(b) Stutzenabriss (im Bohrlochkeller)

	Gasart Nordsee H	Gasart Holland L
Szenario Nr.	mittl. Massenstrom [kg/s]	mittl. Massenstrom [kg/s]
1, 5, 8, 10	74,0	71,9
2,3,9	60,1	55,9
4	54,5	50,2
6	84,5	81,3
7	3,5	3,0

### 4.2 Gasausbreitungsberechnungen

Beispiel für die Abmessungen des explosionsgefährdeten Bereiches

Anmerkung: Die Skalierungen in dem dargestellten Diagramm sind für die beiden Achsen unterschiedlich



Radius R und Höhe H bis zum Erreichen / Unterschreiten der unteren Zündgrenze

(a) Vertikales Ausströmen (Blowout)

Gasart Nordsee H	Szenario Nr.	Druck am Sondenkopf [bar]	Temperatur am Sonden- kopf [°C]	Temperatur nach atm. Entspannung [°C]	Massenstrom [kg/s]	Geschwindig- keit [m/s]	4 %-Grenze	
							max. Radius R	max Höhe H [m]
vertikales Ausströmen (Blowout)	1	22,3	22,2	-10,0	269,0	408,9	14,0	105,0
	2	17,1	-6,3	-42,4	218,3	388,1	13,0	96,0
	3	16,3	-2,9	-37,5	170,7	391,4	11,0	85,0
	4	14,3	-2,6	-35,4	92,7	392,7	8,0	64,0
	5	18,2	28,2	0,2	111,3	414,6	9,0	68,0
	6	20,4	58,9	30,5	118,5	432,1	9,5	70,0
	7	2,5	-12,7	-37,9	3,1	392,1	1,5	13,0
	8	20,7	2,1	-34,6	338,2	393,4	16,0	118,0
	9	34,8	-4,0	-41,4	392,7	388,9	17,0	127,0
	10	48,8	20,2	-15,6	681,3	406,0	23,5	164,0

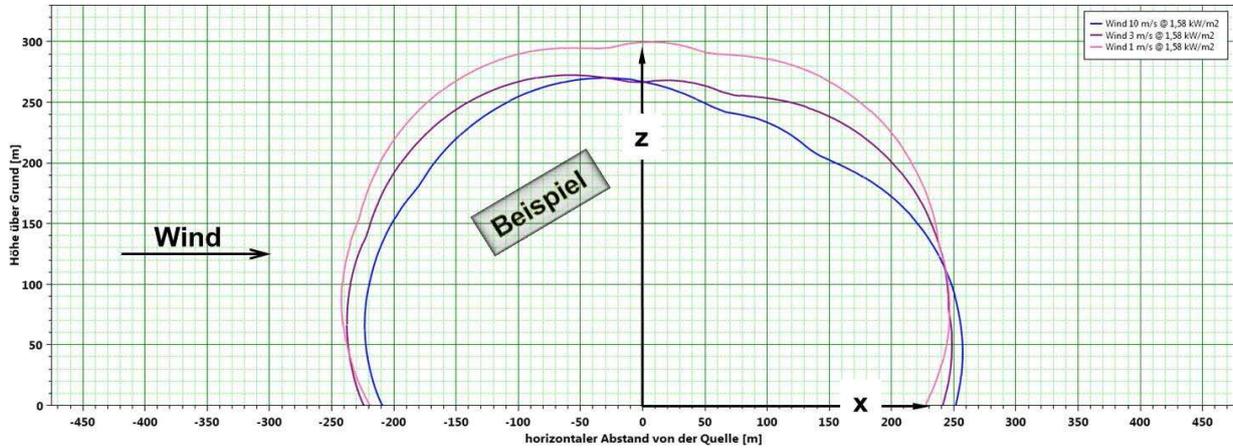
Gasart Holland L	Szenario Nr.	Druck am Sondenkopf [bar]	Temperatur am Sonden- kopf [°C]	Temperatur nach atm. Entspannung [°C]	Massenstrom [kg/s]	Geschwindig- keit [m/s]	4 %-Grenze	
							max. Radius R	max Höhe H [m]
vertikales Ausströmen (Blowout)	1	20,6	19,8	-11,6	253,6	409,6	14,0	100,0
	2	16,2	-5,2	-40,3	209,6	391,3	12,0	92,0
	3	15,4	-5,0	-39,5	163,9	391,7	10,0	82,0
	4	13,5	-4,7	-37,8	89,1	392,6	8,0	61,0
	5	16,7	25,7	-2,2	104,4	414,4	8,5	65,0
	6	18,7	51,0	27,9	111,2	431,6	8,4	66,5
	7	2,6	-14,9	-42,3	3,1	389,3	1,4	12,5
	8	19,4	0,0	-35,8	321,8	394,5	15,0	113,0
	9	33,1	-5,8	-42,6	377,0	390,1	16,0	121,5
	10	45,5	18,2	-16,1	642,1	407,7	21,0	157,0

(b) Stutzenabriss (im Bohrlochkeller)

Gasart Nordsee H				Gasart Holland L			
Szenario Nr.	mittlerer Mas- senstrom [kg/s]	4%-Grenze		Szenario Nr.	mittlerer Mas- senstrom [kg/s]	4%-Grenze	
		max. Radius R	max Höhe H			max. Radius R	max. Höhe H
		[m]				[m]	
1, 5, 8, 10	74,0	132,0	61,0	1, 5, 8, 10	71,9	129,0	60,0
2,3,9	60,1	117,0	55,5	2,3,9	55,9	111,0	53,0
4	54,5	110,5	53,0	4	50,2	104,5	50,0
6	84,5	141,5	65,0	6	81,3	137,5	63,0
7	3,5	14,5	15,0	7	3,0	12,5	14,0

### 4.3 Wärmestrahlungsberechnungen

Beispiel für die Abmessungen der Wärmestrahlungskonturen



(a) Vertikales Ausströmen (Blowout)

Entfernung x und Höhe z bis zum Erreichen / Unterschreiten einer Wärmestromdichte von  $1,58 \text{ kW/m}^2$

Szenario Nr.	Gasart Nordsee H						Gasart Holland L					
	Windgeschwindigkeit						Windgeschwindigkeit					
	1 m/s		3 m/s		10 m/s		1 m/s		3 m/s		10 m/s	
x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	
1	276	323	278	298	287	297	247	300	249	273	257	270
2	254	297	254	274	263	273	228	278	230	253	238	250
3	226	266	227	244	235	244	203	249	205	226	213	224
4	170	202	171	185	177	185	153	190	154	172	161	170
5	182	217	184	199	190	198	162	201	163	182	170	179
6	186	222	187	203	194	202	166	205	167	186	174	183
7	34	43	34	39	36	38	32	42	32	38	34	36
8	310	361	312	333	322	332	278	336	280	306	290	303
9	333	386	335	357	346	357	300	361	301	330	312	327
10	427	490	428	453	440	453	381	455	383	415	395	411

Entfernung x und Höhe z bis zum Erreichen / Unterschreiten einer Wärmestromdichte von 4,73 kW/m<sup>2</sup>

Szenario Nr.	Gasart Nordsee H						Gasart Holland L					
	Windgeschwindigkeit						Windgeschwindigkeit					
	1 m/s		3 m/s		10 m/s		1 m/s		3 m/s		10 m/s	
	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
1	166	251	170	218	178	202	148	236	152	204	160	185
2	152	231	156	201	164	186	137	218	140	189	149	171
3	135	207	138	179	146	166	122	196	125	169	133	153
4	102	157	104	136	111	125	92	150	94	129	101	116
5	109	169	112	147	119	135	97	158	100	136	106	123
6	112	173	114	150	121	137	99	162	102	139	108	126
7	21	20	21	29	23	26	19	34	20	28	22	25
8	187	280	190	244	200	226	167	264	171	228	180	208
9	201	300	205	261	215	243	180	284	185	245	194	224
10	258	380	262	331	273	308	229	356	234	309	245	283

Entfernung x und Höhe z bis zum Erreichen / Unterschreiten einer Wärmestromdichte von 12 kW/m<sup>2</sup>

Szenario Nr.	Gasart Nordsee H						Gasart Holland L					
	Windgeschwindigkeit						Windgeschwindigkeit					
	1 m/s		3 m/s		10 m/s		1 m/s		3 m/s		10 m/s	
	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
1	107	213	112	180	120	153	95	201	100	169	109	142
2	98	196	102	165	111	140	87	186	92	157	101	131
3	87	175	91	148	100	125	78	167	82	141	91	117
4	65	133	69	112	76	95	58	128	62	107	69	89
5	70	144	74	121	81	102	62	135	66	114	73	94
6	72	146	75	124	82	104	63	138	67	116	74	97
7	13	29	14	24	17	19	12	29	13	24	16	19
8	120	237	125	201	135	171	107	225	113	190	122	159
9	129	254	135	215	144	183	111	242	122	204	132	171
10	166	321	173	273	184	234	147	303	154	256	165	216

(b) Stützenabriss (im Bohrlochkeller)

Entfernung x und Höhe z bis zum Erreichen / Unterschreiten der angegebenen Wärme-stromdichten

		Gasart Nordsee H						Gasart Holland L					
Wärmestrom- dichte [kW/m <sup>2</sup> ]	Szenario Nr.	Windgeschwindigkeit						Windgeschwindigkeit					
		1 m/s		3 m/s		10 m/s		1 m/s		3 m/s		10 m/s	
		x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
1,58	1, 5, 8, 10	154	184	155	167	161	168	140	175	141	159	148	157
	2,3,9	140	167	140	154	146	153	124	156	125	141	131	139
	4	133	160	134	146	139	146	118	149	119	135	125	133
	6	164	195	164	179	172	179	148	184	149	167	156	165
	7	36	46	37	42	39	41	31	42	32	38	34	37
4,73	1, 5, 8, 10	92	143	95	124	101	114	84	138	86	119	93	107
	2,3,9	84	131	86	113	92	104	74	123	76	106	82	95
	4	80	125	82	108	87	99	71	118	73	101	79	91
	6	98	152	101	132	107	121	89	145	91	125	98	113
	7	22	36	23	31	25	28	19	34	20	29	22	25
12	1, 5, 8, 10	59	122	62	103	69	86	53	118	57	99	64	82
	2,3,9	54	111	57	94	63	78	47	106	50	89	57	73
	4	51	106	54	89	60	74	45	101	48	85	54	70
	6	63	129	66	109	74	91	57	125	60	105	68	86
	7	14	31	15	26	18	21	12	30	13	25	16	19

#### 4.4 Darstellung der berechneten Abstände

Auf Basis der dargestellten Ergebnisse der Gasausbreitungs- und Wärmestrahlungsberechnungen kann in Abhängigkeit von der Freisetzungsrate (Massenstrom) der Abstand bestimmt werden, bei dem ein vorgegebener Richtwert unterschritten wird.

Für die praktische Anwendung der hier beschriebenen Vorgehensweise sind in den Anlagen 1-4 Nomogramme zur grafischen Bestimmung der Abstände von Speicherbohrungen zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus sind dort auch entsprechende Funktionen zur rechnerischen Ermittlung der Abstandswerte angegeben.

Für die Darstellung der Ergebnisse in den Nomogrammen wurden die Abstandswerte gewählt, die sich bei Einsatz der Gasart Nordsee H ergeben, da diese zu größeren Abständen führen und damit auch die Abstandswerte bei Einsatz der Gasart Holland L mit abdecken.

Bei der Bewertung der Berechnungsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die berechneten und dargestellten Entfernungen keine absoluten Werte darstellen, sondern von den gewählten Modellen abhängig sind und Berechnungen mit anderen Programmen Abweichungen ergeben können.

## 5 Zusammenfassung

Zur Ermittlung der Auswirkungen eines Gasaustritts an Speicherbohrungen wurden geeignete und konservative Berechnungsansätze und Berechnungstools ausgewählt. Die ermittelten und dargestellten Ergebnisse zeigen die Abhängigkeit der Abstände von der Blowoutrate / Leckrate, den Witterungsbedingungen und den Bewertungskriterien (untere Zündgrenze, Richtwerte der Wärmestromdichte). Es wird deutlich, dass

- beim Blowout das Bewertungskriterium „Wärmestromdichte“ zu deutlich größeren Abständen führt, als das Kriterium „Gasausbreitung“ und
- sich für den getroffenen Ansatz des Stutzenabrisses beim Kriterium „Gasausbreitung“ trotz der geringeren Ausströmraten größere Abstände ergeben, als beim Blowout.

Die im Rahmen der Erarbeitung dieses Leitfadens getroffenen Annahmen sind grundsätzlich so gewählt, dass im Zweifelsfall ein konservativer Ansatz gewählt wurde. Bei Einzelfallbetrachtungen (Maximaldruck, Teufe der Bohrung, Durchmesserhältnisse, Speichermedium, überwiegende Wetterverhältnisse, Charakter der zu schützenden Bebauung in der Umgebung usw.) für bestimmte Standorte werden sich abweichende Abstände ergeben, die in der Regel geringer sein sollten.

## 6 Literaturverzeichnis

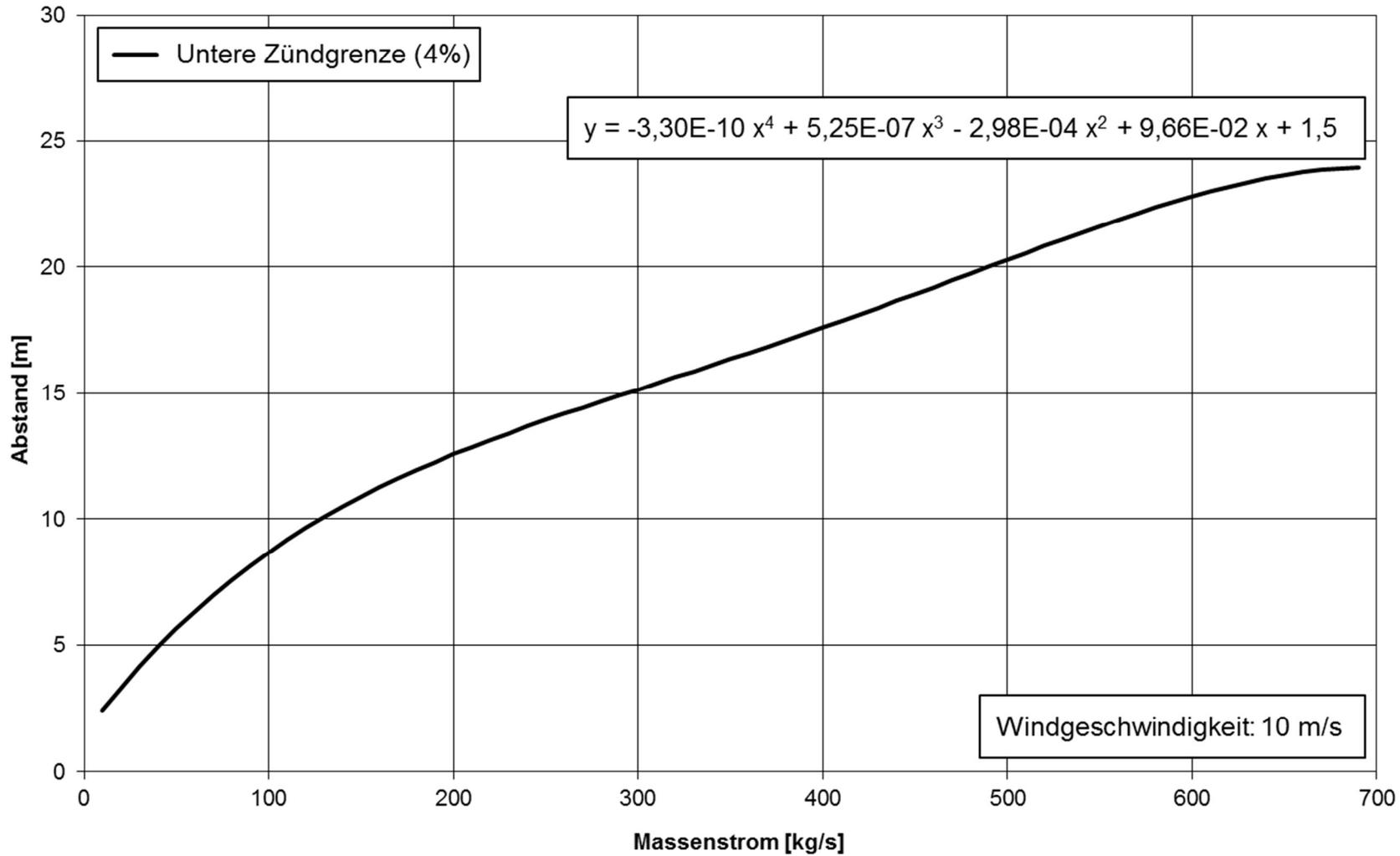
- /1/ KAS-18 „Empfehlung für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung – Umsetzung § 50 BImSchG“  
Kommission für Anlagensicherheit beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
2. überarbeitete Fassung, November 2010
- /2/ EN ISO 23251  
Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries - Pressure-Relieving and Depressuring Systems  
Ausgabe 2007
- /3/ Sicherheit von Erdgas-Hochdruckanlagen (Rahmenbericht)  
Schweizerische Erdgaswirtschaft  
Revidierte Ausgabe 1997
- /4/ Berechnung von Blowoutraten in Erdgassonden  
P. Vogel, C. Marx  
Erdoel-Erdgas, 101. Jg., Heft 10, Oktober 1985

## Anlagenverzeichnis

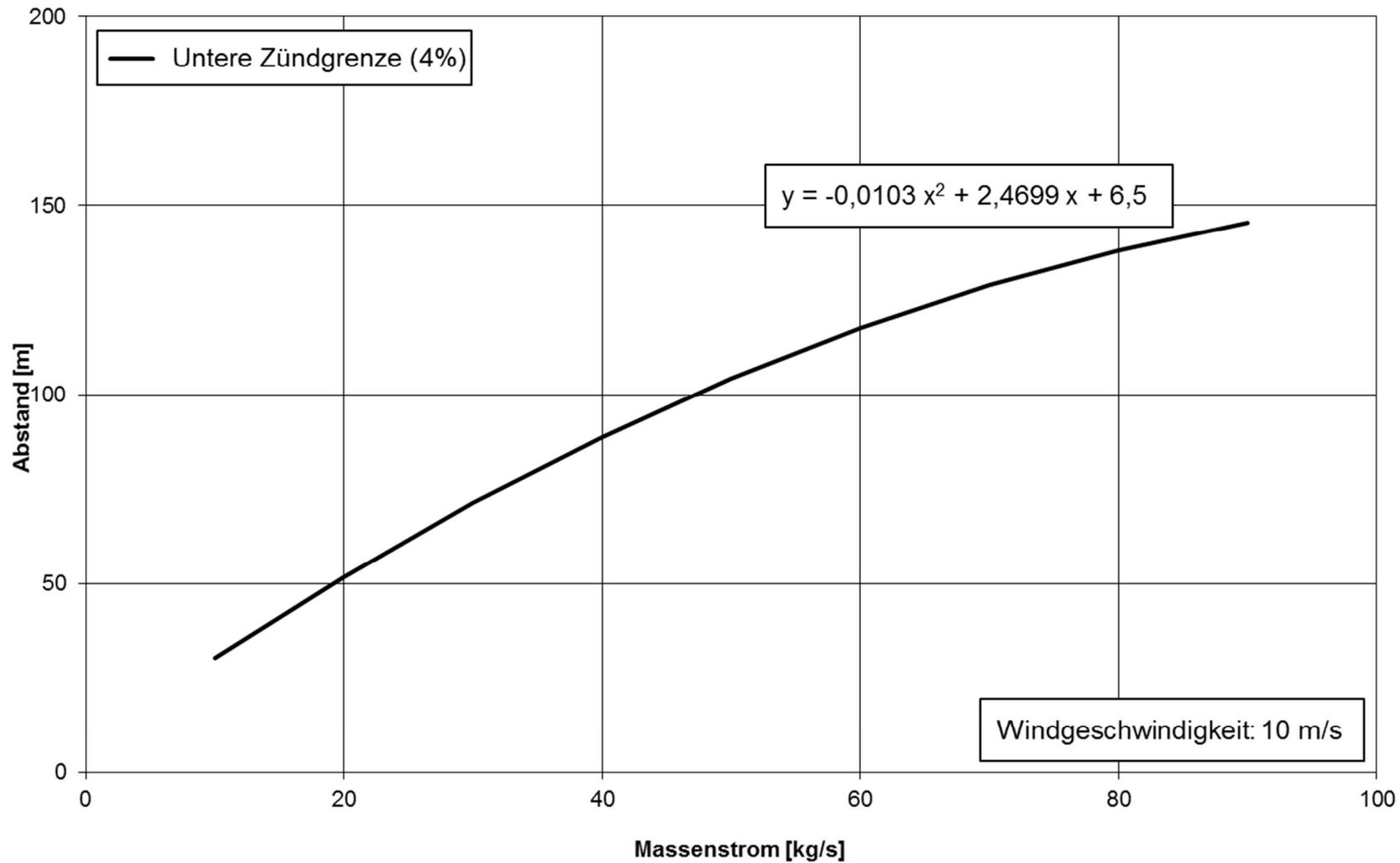
- Anlage 1 : Gasausbreitung an einer Speicherbohrung – Blowout
- Anlage 2 : Gasausbreitung an einer Speicherbohrung – Stutzenabriss
- Anlage 3 : Wärmestrahlung an einer Speicherbohrung – Blowout oder Stutzenabriss – Windgeschwindigkeit: 3 m/s
- Anlage 4 : Wärmestrahlung an einer Speicherbohrung – Blowout oder Stutzenabriss – Windgeschwindigkeit: 10 m/s

## Anhang

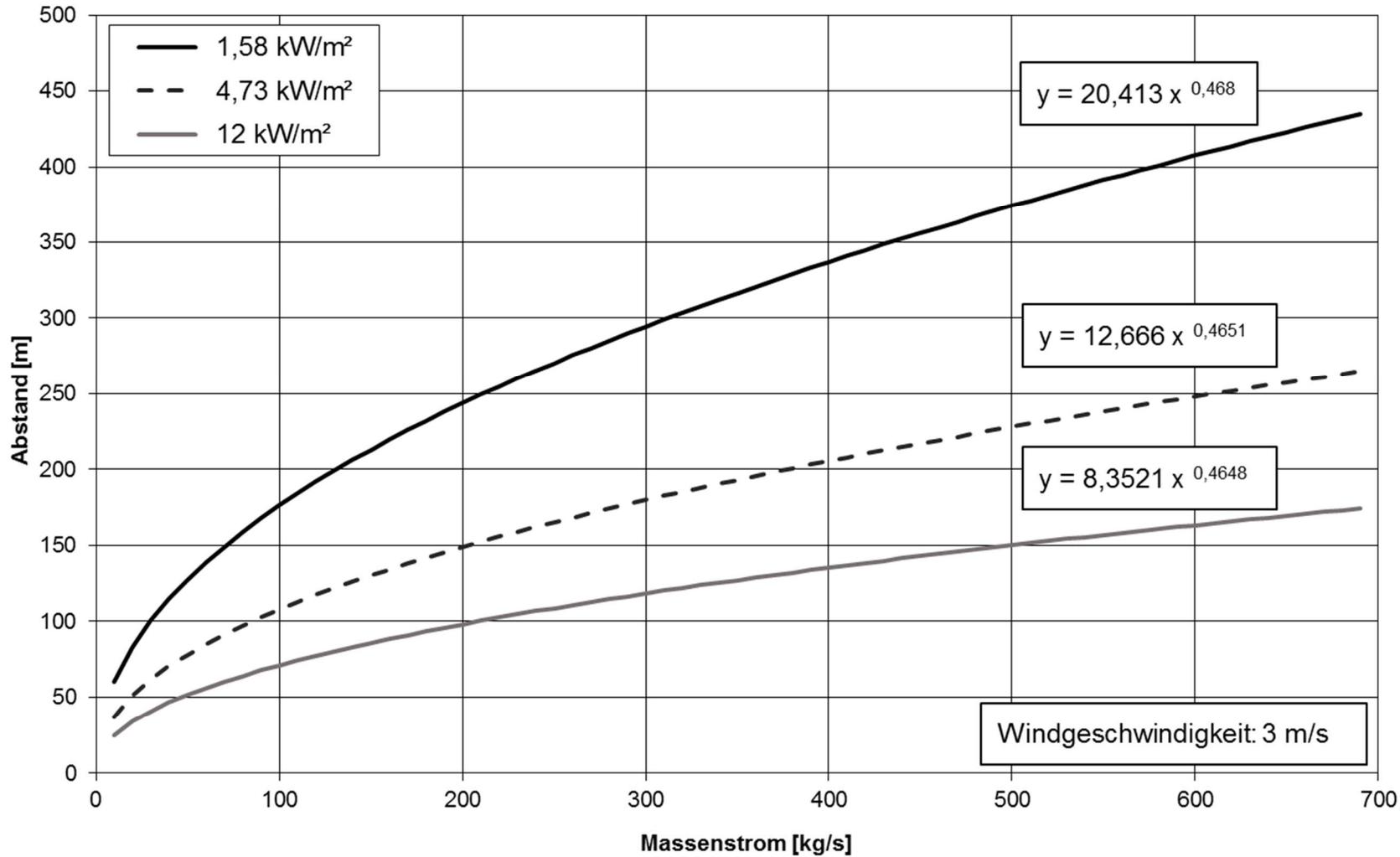
Anlage 1 Gasausbreitung an einer Speicherbohrung - Blowout



Anlage 2 Gasausbreitung an einer Speicherbohrung – Stutzenabriss



**Anlage 3:** Wärmestrahlung an einer Speicherbohrung – Blowout oder Stutzenabriss – Windgeschwindigkeit 3 m/s



Anlage 4: Wärmestrahlung an einer Speicherbohrung – Blowout oder Stutzenabriss – Windgeschwindigkeit 10 m/s

