

Unfallrisiken von Erdgas: eine umfassende Analyse

Accident risks of natural gas: a comprehensive analysis

Peter Burgherr

Schlagwörter

Schwere Unfälle, Energiesektor, Erdgaskette, Unfalldatenbank ENSAD, Risikoanalyse, Aggregierte Indikatoren, F-N Kurven, Schwachstellenanalyse

Zusammenfassung

Erdgas weist sowohl die tiefsten Unfalltodesraten als auch die geringsten maximal möglichen Konsequenzen aller fossilen Energieträger auf. Westliche Wasserkraft- und Kernkraftanlagen erreichen zwar noch tiefere Todesfallraten, die maximalen Konsequenzen können dafür viel grösser sein. Innerhalb der Erdgaskette sind die Todesfallraten am tiefsten für „Zentraleuropa“ gefolgt von EU15 und OECD, während die Nicht-OECD deutlich unfallträchtiger ist. Schliesslich konnte anhand der detaillierten Statistiken des DVGW zu Erdgasunfällen in Deutschland aufgezeigt werden, dass die normalisierten Raten für Todesopfer und Verletzte in den letzten zwei Jahrzehnten wesentlich zurückgegangen sind.

Summary

Natural gas shows both the lowest accident fatality rates and smallest maximum credible consequences of all fossil energy carriers. Western hydropower and nuclear power have even lower rates, but maximum consequences may be very large. Within the natural gas chain fatality rates are lowest for “Central Europe” followed by EU15 and OECD, whereas non-OECD is substantially more accident-prone. Finally, it could be demonstrated by means of the detailed DVGW-statistics for natural gas accidents in Germany that normalized accident rates for fatalities and injured decreased over the last two decades.

Adressen der Autoren

Peter Burgherr, Dr. sc. nat., Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI, Schweiz

E-Mail: peter.burgherr@psi.ch

Einleitung

In diesem Artikel werden die wichtigsten Resultate einer vergleichenden Betrachtung der Unfallrisiken im Energiesektor unter besonderer Berücksichtigung der Erdgaskette dargestellt, welche im Rahmen einer Studie für den Schweizerischen Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) erarbeitet wurden [1]. Die genaue Identifizierung gasspezifischer Risiken und deren Einordnung in einen grösseren Zusammenhang sind von Bedeutung für den Gassektor. Darüber hinaus sind die gewonnenen Erkenntnisse auch relevant für branchenfremde Interessensgruppen und Entscheidungsträger.

Die Untersuchungen folgten einem dreistufigen Vorgehen. Zuerst wurden *vergleichende Analysen* der verschiedenen Energieträger vorgenommen, gefolgt von einer *spezifischen Analyse* für die Erdgaskette. Auswertungen für diese beiden Phasen basierten auf der umfassenden Unfalldatenbank ENSAD (**E**nergy-related **S**evere **A**ccident **D**atabase) des Paul Scherrer Institut (PSI), wodurch eine ausgewogene und weltweite Abdeckung erreicht werden konnte. Schliesslich wurde eine beispielhafte *Schwachstellenanalyse* für die Erdgaskette in Deutschland durchgeführt. Dazu wurden die umfassenden Unfallstatistiken seitens der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (DVGW) [2] verwendet¹.

Um die Zielsetzungen in den drei genannten Projektphasen zu erreichen, wurden die folgenden Arbeiten ausgeführt: (1) Konsolidierung der vorhandenen ENSAD-Daten; (2) Ermittlung und Auswertung zusätzlicher Informationsquellen; (3) vergleichende Analysen für die verschiedenen Energieketten; (4) spezifische Vergleiche innerhalb der Erdgaskette; (5) detaillierte Auswertungen der DVGW-Daten für schwere und kleinere Erdgasunfälle in Deutschland.

Vorgehen und Methodologie

Die Analysen der Unfallrisiken für die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl, Erdgas und Flüssiggas (LPG) sowie für Wasserkraft basieren auf den in der ENSAD Datenbank enthaltenen historischen Unfalldaten. Da für die Kernenergie keine repräsentative Menge an Unfalldaten vorhanden ist, muss die Risikobewertung, also etwa die Bestimmung der Eintretenswahrscheinlichkeit gewisser Ereignisse und Unfälle, mit der so genannten „Probabilistischen Sicherheitsanalyse“ (PSA) abgeschätzt werden. Im Folgenden wird kurz

¹ Die DVGW-Daten können auch als vollauf repräsentativ für die Situation in der Schweiz betrachtet werden, da sich Technologien, Management, Vorschriften und die generelle Sicherheitskultur stark ähnlich sind. Da das deutsche Gasnetz aber rund 30x grösser ist als jenes in der Schweiz, ergibt sich für Deutschland eine ungleich stärkere statistische Basis.

auf die wichtigsten methodischen Aspekte eingegangen; detaillierte Angaben finden sich in den PSI-Berichten zu ENSAD [siehe 3; 4].

Definition des Begriffs „schwerer Unfall“

In der Literatur existieren verschiedene Definitionen für schwere Unfälle. Im Rahmen der ENSAD Datenbank wurde eine auf mehreren Kriterien basierende Definition gewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass ein Kriterium möglichst konsistent auf die verschiedenen Energieketten anwendbar ist und die gewählten Schwellenwerte für die einzelnen Kriterien derart angesetzt wurden, dass die Vielzahl der für ENSAD ausgewählten Datenquellen auch genutzt werden konnten.

Ein Unfall in ENSAD gilt als schwer, wenn mindestens eines der folgenden Kriterien zutrifft.

- mindestens 5 Todesfälle
- mindestens 10 Verletzte
- mindestens 200 Evakuierte
- ein weit reichendes Verbot des Verzehrs von Lebensmitteln
- eine Freisetzung von mindestens 10'000 Tonnen Kohlenwasserstoffen
- die Säuberung einer Land- oder Wasserfläche von mindestens 25 km²
- wirtschaftliche Schäden von mindestens 5 Millionen USD (Preisstand 2000)

Hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit und der Qualität der Information gibt es Unterschiede zwischen den angewandten Kriterien. Todesfälle sind mit Abstand der zuverlässigste Indikator, während Angaben zu Verletzten und Evakuierten bereits weniger vollständig sind. Deshalb fokussieren die Auswertungen vorwiegend auf die Todesfälle; einzig bei der Schwachstellenanalyse für Deutschland wurden auch Verletzte berücksichtigt.

Auswertung der ENSAD-Unfalldaten

Die ENSAD Datenbank berücksichtigt nicht nur Unfälle bei der eigentlichen Energieerzeugung, sondern die kompletten Energieketten, da sich Unfälle in jedem Kettenglied ereignen, von der Exploration, Förderung, Aufarbeitung, Lagerung und Verteilung bis zur Abfallbehandlung. Zusätzlich wurden die Resultate auch nach bestimmten Ländergruppen und Regionen aufgeschlüsselt, so dass Unterschiede zwischen hoch entwickelten OECD-Ländern, EU15 und „Zentraleuropa“ sowie weniger entwickelten Nicht-OECD Ländern herausgearbeitet werden konnten. Auswertungen für die Todesfälle beziehen

sich bei den fossilen Energieträgern und der Wasserkraft auf so genannt unmittelbare Tote nach dem Ereignis, während für Kernkraftwerke im Rahmen von PSA auch so genannte latente (späte) Todesfälle berücksichtigt werden.

Vergleichende Analysen der verschiedenen Energieketten und innerhalb der Erdgaskette basieren auf ENSAD-Daten für die Jahre 1969-2000. Auf diese Zeitspanne entfallen knapp 90% aller in ENSAD enthaltenen Unfalldaten. Die Wahl der unteren Grenze wurde dadurch beeinflusst, dass die Anzahl der energie-bezogenen Unfälle seit den späten 1960er Jahren zugenommen hatte, wozu nebst den stark gesteigerten Aktivitäten im Energiesektor auch die vollständigere und qualitativ bessere Berichterstattung von Unfällen beitrugen. Schliesslich sind weiter zurückliegende Unfälle auch hinsichtlich der damals verwendeten Technologien und geltenden Sicherheitsstandards nur sehr bedingt vergleichbar. Für die Periode 1969-2000 beinhaltet ENSAD 1870 energiebezogene Unfälle mit insgesamt 81'323 Todesfällen, die als schwer eingestuft wurden, da fünf oder mehr Todesfälle zu verzeichnen waren (*Tab. 1*).

Auswertung der DVGW-Unfallstatistiken

Eine detaillierte Schwachstellenanalyse für verschiedene Unfalltypen, Unfallursachen und Anlagenarten wurde am Beispiel der Deutschen Erdgaskette vorgenommen. Dazu standen die Unfallstatistiken des DVGW für die Jahre 1981-2002 zur Verfügung, in welchen sowohl schwere als auch kleinere Unfälle detailliert erfasst wurden [2]. Die Gesamtzahl von mehr als 1300 Unfällen ermöglicht eine statistisch fundierte Aufschlüsselung nach verschiedenen technischen Aspekten sowie für Todesfälle und Verletzte. Demgegenüber waren entsprechende Daten für die Schweiz erst ab 1995 verfügbar und von den erfassten 140 Ereignissen resultierten nur deren 11 in insgesamt 16 Todesfällen [5]. Gemäss den Branchenkenntnissen des SVGW sind die DVGW-Daten für Deutschland auch für die Situation in der Schweiz repräsentativ.

Vergleichende Untersuchungen verschiedener Energieketten

Aggregierte Indikatoren

Die verschiedenen Energieketten wurden anhand von aggregierten Todesfallraten verglichen. Dazu wurden die Daten im Verhältnis zu ihrer äquivalenten Stromproduktion normalisiert, wozu die Statistiken der Internationalen Energieagentur [6] verwendet wurden. Für die Kernenergie und Wasserkraft geht dies direkt da das Endprodukt Elektrizität ist. Im Fall von Kohle, Erdöl, Erdgas und LPG wurde die thermische Energie mittels eines generischen

Wirkungsgrads von 35% in die entsprechende Stromproduktion umgewandelt. Die Einheit „elektrisches Gigawattjahr“ ($\text{GW}_{\text{e,a}}$) wurde gewählt, da grosse Kraftwerke Kapazitäten um 1 GW elektrische Leistung aufweisen, weshalb das $\text{GW}_{\text{e,a}}$ sich als praktische Einheit für diese Kettenvergleiche anbietet.

Abb. 1 zeigt die berechneten Werte der unmittelbaren Todesfälle pro $\text{GW}_{\text{e,a}}$ in den OECD und Nicht-OECD Ländern im Zeitraum 1969-2000. Unter den fossilen Energieträgern weist Erdgas die tiefsten Raten auf, gefolgt von Erdöl und Kohle, während die Werte für LPG klar am höchsten sind. Mit Ausnahme der Wasserkraft sind die relativen Rangfolgen der Energieketten in der OECD und der Nicht-OECD identisch. Generell sind die unmittelbaren Todesfallraten für alle betrachteten Energieketten deutlich höher in der Nicht-OECD als in der OECD. Bei der Wasserkraft und Kernenergie ist dieser Unterschied sogar drastisch. Basierend auf den historischen Unfalldaten weist die Wasserkraft in der OECD sehr tiefe Todesfallraten auf, vergleichbar repräsentativen PSA-basierten Resultaten für Kernkraftwerke in Europa oder den USA.

Aggregierte Todesfallraten für die Kernenergie sind ausgesprochen tief für die unmittelbaren Todesfälle, während für die latenten Todesfälle state-of-the-art PSA für repräsentative westliche Anlagen als Referenzwerte verwendet wurden (siehe [4]). PSA-basierte latente Todesfallraten für westliche Kraftwerke liegen im Bereich von 10^{-3} bis 10^{-1} Todesfälle pro $\text{GW}_{\text{e,a}}$. Wenn man die latenten Todesfälle für den einzigen schweren nuklearen Unfall mit Gesundheitsschäden (Tschernobyl) zum Vergleich heranzieht, ergeben Schätzungen der latenten Opfer um ein Vielfaches höhere Werte im Bereich von 13.9 bis 51.2 Todesfälle pro $\text{GW}_{\text{e,a}}$. Eine Übertragung der Tschernobyl Erkenntnisse auf Risiken der Kernenergie in der heutigen OECD ist aber nicht zulässig, weil in OECD-Werken andere und sicherere Technologien verwendet werden. Das trifft überwiegend auch für die heutige Situation in der Nicht-OECD zu.

Häufigkeits-Schadensausmass-Kurven

Aggregierte Indikatoren wie Unfalltodesraten erlauben zwar Vergleiche zwischen den Energieketten, die Schwere eines einzelnen Unfalls und die Wahrscheinlichkeit seines Eintretens lassen sich damit aber nicht beurteilen. Häufigkeits-Schadensausmass (F-N)-Kurven zeigen Risiken und erlauben auch Vergleiche von kettenspezifischen Maximalschäden oder der Wahrscheinlichkeit eines Unfalls mit einer bestimmten Anzahl von Opfern.

Abb. 2 und Abb. 3 zeigen die F-N Kurven für die OECD und Nicht-OECD Länder. Die fossilen Ketten weisen für beide Ländergruppen eine ähnliche Rangfolge auf mit Ausnahme der chinesischen Kohlekette, die deutlich höhere Unfallraten aufweist. Unter den fossilen Energieträgern schneidet Erdgas am besten ab, während LPG am unfallträchtigsten ist. Vergleicht man die Unfälle mit den grössten Opferzahlen für die fossilen Energieketten, so weist ebenfalls Erdgas die tiefsten Werte auf mit ungefähr 100 Todesfällen sowohl für die OECD als auch für die Nicht-OECD. Im Vergleich dazu sind die grösstmöglichen Unfälle für Kohle, LPG und Erdöl ca. 3 – 6 Mal grösser für die OECD Länder. In der Nicht-OECD sind die entsprechenden Werte noch grösser, obwohl die relative Rangfolge gleich bleibt.

Westliche Kern- und Wasserkraftwerke haben die tiefsten Unfallraten – ausser in Nicht-OECD Ländern wo Staudammbrüche Tausende von Toten forderten (Banqiao/Shimantan in China). Die Erwartungswerte für die unmittelbaren Todesfälle sind auch im Fall von Tschernobyl relativ gering, von überragender Bedeutung sind jedoch die latenten Todesfälle. Berechnungen für die latenten Todesfälle durch Krebserkrankungen reichen von rund 9000 bis 33'000 in den nächsten 70 Jahren.

Spezifische Analysen für die Erdgaskette

Für den Zeitraum 1969-2000 ereigneten sich weltweit 129 schwere (≥ 5 Todesfälle) Unfälle mit insgesamt 1971 Todesopfern², doch Unfälle mit mehr als 50 Opfern waren selten. In der OECD betraf dies Unfälle in Osaka (JPN, 1970, 92 Tote), Tabasco (MEX, 1978, 58 Tote) und Taegu (KOR, 1995, 109 Tote) und in der Nicht-OECD solche in Israel (1982, 89 Tote), Tiflis (GEO, 1984, 100 Tote), im Pazifik (1989, 93 Tote), Tejerias (VEN, 1993, 80 Tote), Bahoe (CHN, 1993, 70 Tote) und Shenzen (CHN, 1993, 70 Tote).

Seit den 1980er Jahren verharrten die Todesfälle in der OECD auf einem tiefen Niveau, wobei der Höchstwert im Jahr 1995 durch den oben erwähnten Unfall in Südkorea mit 109 Toten verursacht wurde. Dieser Unfall macht alleine rund 30% aller Todesfälle in der OECD in den 1990er Jahren aus. Tendenziell waren die Opferzahlen in der Nicht-OECD in den letzten zwei Jahrzehnten höher als in der OECD.

² Für die spezifischen Analysen innerhalb der Erdgaskette wurden Unfälle mit verflüssigtem Erdgas ausgeschlossen, damit die Daten für OECD und Nicht-OECD mit jenen für EU15, «Zentraleuropa» sowie Deutschland vergleichbar waren. Dies betraf fünf Unfälle in der OECD und einen Unfall in der Nicht-OECD.

Aggregierte Indikatoren

Für die Vergleiche innerhalb der Erdgaskette wurden aggregierte Indikatoren für die schweren (≥ 5 Todesfälle) Unfälle nicht nur für die OECD und Nicht-OECD berechnet, sondern zusätzlich für die EU15 und „Zentraleuropa“³, da diese zwei Gruppen für die aktuelle Studie von besonderem Interesse sind. Obwohl die Anzahl der Unfälle in der OECD deutlich grösser war als in der Nicht-OECD (*Abb. 4a*), wurden in der OECD etwas weniger Todesfälle verzeichnet (*Abb. 4b*). In der Nicht-OECD wurden jedoch beinahe doppelt so viele Todesopfer pro Unfall registriert wie in der OECD (*Abb. 4c*). Die EU15 und vor allem „Zentraleuropa“ wiesen noch tiefere Werte auf als die OECD. Bezüglich der Todesfälle pro GW_e a ergab sich die gleiche Rangfolge (*Abb. 4d*). Die Nicht-OECD wies die höchste Todesfallrate auf gefolgt in grossem Abstand von der OECD und EU15, während „Zentraleuropa“ wieder am besten abschnitt.

Häufigkeits-Schadensausmass-Kurven

Abb. 5 zeigt F-N Kurven für OECD und Nicht-OECD Länder, aber auch für EU15 und „Zentraleuropa“. Insgesamt weist die Nicht-OECD die höchsten Unfallhäufigkeiten auf im Vergleich zu den anderen Ländergruppen. Im Kurvenbereich mit weniger als 10 Todesfällen ist die Nicht-OECD nur ungenügend repräsentiert, da Unfälle dieser Schwere im Vergleich zur OECD weniger vollständig und zuverlässig dokumentiert sind. Die Unterschiede zwischen den Kurven für OECD, EU15 und „Zentraleuropa“ sind eher gering, was die Unfallhäufigkeiten betrifft, sie unterscheiden sich jedoch beim maximalen Schadensausmass. Die maximale Anzahl der Todesopfer ist für die OECD und die Nicht-OECD signifikant grösser als für die EU15 und „Zentraleuropa“. Der grösste Unfall in der OECD ist aber insofern eine Ausnahme als sich nach 1978 kein anderer Unfall mit mehr als 40 Todesfällen ereignet hatte. Im Gegensatz dazu kam es in der Nicht-OECD in den 1980er und 1990er Jahren zu vier Unfällen im Bereich 70 – 90 Tote. Die entsprechenden Maximalwerte für EU15 und „Zentraleuropa“ sind mit 27 und 22 Opfern rund 4 - 5 Mal tiefer als für die OECD.

³ In Absprache mit dem SVGW umfasst der Begriff „Zentraleuropa“ in dieser Studie Länder mit ähnlichen Gasttechnologien und Management: Schweiz, Deutschland, Niederlande, Grossbritannien, Belgien und Dänemark.

Schwachstellenanalyse am Beispiel Deutschland

Übersicht über die DVGW-Unfallstatistiken

Basierend auf den DVGW-Statistiken für Erdgasunfälle konnte eine detaillierte Analyse durchgeführt werden: (1) Berücksichtigung von schweren und kleineren Unfällen; (2) Auswertungen für Todesfälle und Verletzte; (3) spezifische Auswertungen betreffend Unfallarten, -ursachen und betroffener Anlagenarten; (4) Berechnung von normalisierten Unfallraten (bezüglich Rohrnetzlänge, Anzahl Kunden etc).

Die Unfalldaten des DVGW für die Periode 1981-2002 (seit 1991 inkl. neue Bundesländer) wurden den zwei Kategorien *Kundenanlagen (UK)* und *Eigenanlagen (UE)* zugewiesen. Um einen konsistenten Datensatz zu gewährleisten, wurden a priori folgende Unfälle ausgeschlossen:

- Unfälle mit Stadtgas, da sie sich vor der Umstellung auf Erdgas ereigneten und für die heutige Situation nicht mehr relevant sind.
- Unfälle mit Flüssiggas (LPG), die ebenfalls in den DVGW-Statistiken geführt werden.
- Unfälle ohne Angaben zum Gastyp.

Für die detaillierte Schwachstellenanalyse wurden 837 Erdgasunfälle bei Kundenanlagen mit insgesamt 314 Todesfällen und 943 Verletzten sowie 500 Unfälle bei Eigenanlagen mit insgesamt 73 Todesfällen und 671 Verletzten verwendet.

Eine Auswertung der Schwere der Erdgasunfälle in Bezug zur Anzahl Todesfälle zeigte, dass die grosse Mehrzahl der Unfälle keine Opfer forderte sowohl bei den Kundenanlagen (73.8%) wie auch bei den Eigenanlagen (90.4%). Demgegenüber tragen die schweren (= 5 Todesfälle) Unfälle weniger als 1% (0.7% bei UK und 0.4% bei UE) zur Gesamtzahl der Unfälle bei. Trotz dieses geringen Anteils machen sie 11.8% der gesamten Todesfälle bei Kundenanlagen und 23.3% bei Eigenanlagen aus. Kleinere Unfälle mit einem Toten und weniger ausgeprägt mit zwei Toten dominieren jedoch.

In analoger Weise wurde die Schwere der Unfälle in Bezug zur Anzahl Verletzter ausgewertet. Die meisten Unfälle resultierten in maximal 2 Verletzten, wobei Kundenanlagen (88.3%) und Eigenanlagen (86.8%) sich nur geringfügig unterschieden. Die schweren (= 10 Verletzte) Unfälle machen wiederum nur 0.8% (UK) bis 1.0% (UE) aller Unfälle aus, mit entsprechenden Anteilen von 9.1% (UK) und 13% (UE) an der Gesamtzahl der Verletzten.

Dies bestätigt, dass kleinere Unfälle ebenfalls für den Grossteil der Verletzten verantwortlich sind.

Im Folgenden werden die Resultate der detaillierten Analysen exemplarisch für die Kundenanlagen diskutiert. Auf eine gleichartige Darstellung der Ergebnisse für die Eigenanlagen musste aus Platzgründen verzichtet werden, diese sind jedoch anderweitig dokumentiert [7; 1].

Unfälle bei Kundenanlagen

Die Mehrheit der Unfälle bei Kundenanlagen war den Kategorien Explosion (27%), Verpuffung (31%) und Abgasvergiftung (29%) zurechenbar. Explosionen und Abgasvergiftungen forderten auch die meisten Todesfälle und Verletzten, während Verpuffungen zwar viele Verletzte (158) aber kaum Tote (18) verursachten. Im zeitlichen Verlauf wiesen Todesfälle bei Explosionen & Verpuffungen geringere jährliche Schwankungen auf als bei Abgasvergiftungen, ein klarer Trend ist jedoch nicht auszumachen (*Abb. 6*). Im Gegensatz dazu ist bei Abgasvergiftungen seit den 1990er Jahren eine Abnahme zu beobachten, was auf technologische Fortschritte und umgesetzte Sicherheitsmassnahmen hindeutet.

Hinsichtlich der Unfallursachen waren die Kategorien technische Mängel, Bedienungsfehler und vorsätzliche Eingriffe in die Gasanlage am unfallträchtigsten. Diese Ursachen dominierten auch die Todesfall- und Verletztanzahlen, einzig Installationsfehler (173) verursachten mehr Verletzte als Bedienungsfehler (143). Gesamthaft war menschliches Fehlverhalten die mit Abstand häufigste Unfallursache. *Abb. 7* zeigt jedoch auf, dass kontinuierliche Verbesserungen erreicht werden konnten für Bedienungsfehler wie auch Technische Mängel & Installationsfehler, und in geringerem Umfang auch für unzulässige Veränderungen der Aufstellbedingungen von Gasgeräten & unsachgemässe Eingriffe in die Gasanlagen. Im Gegensatz dazu zeigten vorsätzliche Eingriffe in die Gasanlage eine grössere Streuung, obwohl in den letzten Jahren eine leichte Abnahme zu erkennen ist.

Bei den Anlagenarten forderten Gasgeräte mit Abgasanlage sowohl die meisten Unfälle (37%) wie auch die meisten Todesfälle (33%) und Verletzten (28%). Schäden an Rohrleitungen und Rohrverbindungen trugen ebenfalls wesentlich zur Gesamtzahl der Todesopfer und Verletzten bei. In Bezug auf Unfälle der Kategorien Gasgeräte mit Abgasanlage & Abgasanlagen konnten deutliche Verbesserungen erreicht werden, so dass nach 1986 nur einmal mehr als 10 Todesfälle pro Jahr zu verzeichnen waren und seit 1994 nie

mehr als 5 Todesfälle pro Jahr (*Abb. 8*). Unfälle der Kategorie Gasgeräte ohne Abgasanlage verharrten auf einem sehr tiefen Niveau während der gesamten Untersuchungsperiode, trotzdem zeichnete sich eine leichte Abnahme der jährlichen Todesfälle ab.

Schliesslich wurde die zeitliche Entwicklung der Gesamtunfallraten bei Kundenanlagen für Todesfälle und Verletzte während dem Zeitraum 1981-2002 untersucht, die in den *Abb. 9* und *Abb. 10* dargestellt sind. Die Kurven zeigen eine sukzessive Reduktion der Gesamtunfallraten, welche den kumulierten Werten seit 1981 entspricht. Zur besseren Identifizierung von Trends wurde zusätzlich ein gleitender Durchschnitt der letzten fünf Jahre berechnet (1981-1985, 1982-1986 etc) und in den Abbildungen dargestellt.

Obwohl Todesfälle und Verletzte für verschiedene Indikatoren (Anzahl Kunden, Gasabsatz) normalisiert wurden, änderte sich die Hauptaussage nicht, nämlich dass die Gesamtunfallrate über den Beobachtungszeitraum stetig abnahm. Der Rückgang für die Verletztenrate war zwar grösser, dafür waren die Todesfallraten jedoch auf einem gesamthaft deutlich tieferen Niveau als für Verletzte.

Schlussfolgerungen

Vergleiche der verschiedenen Energieträger

- Energiebezogene Unfallrisiken in der OECD sind deutlich tiefer als in der Nicht-OECD.
- Die Erdgaskette zeigt die tiefsten Todesfallraten aller fossilen Energieträger sowohl in der OECD wie in der Nicht-OECD. Erdöl, Kohle und LPG folgen mit deutlich höheren Werten für die Todesfälle pro GW_{e} .
- Die historischen Unfalldaten zeigen, dass die erfahrungsbasierten maximal möglichen Konsequenzen für Erdgas klar am tiefsten von allen fossilen Energieträgern sind.
- Westliche Wasserkraft- und Kernkraftwerke haben zwar noch tiefere Todesfallraten, die maximal möglichen Konsequenzen können jedoch sehr gross sein.

Erdgaskette

- Die durchschnittliche Anzahl Tote war in der OECD in den letzten zwei Jahrzehnten deutlich tiefer als in der Nicht-OECD.
- Die aggregierten Todesfallraten sind am tiefsten für „Zentraleuropa“ gefolgt von EU15 und OECD, wohingegen die Nicht-OECD den höchsten Wert aufweist.

- Auch die erfahrungsbasierten maximal möglichen Konsequenzen sind für „Zentraleuropa“ und die EU15 tiefer als für die OECD und Nicht-OECD.

DVGW-Daten für Deutschland

- Die schweren Unfälle machen zwar nur ca. 1% aller Unfälle aus, dennoch stehen sie meist im Fokus des öffentlichen und medialen Interesses. Trotzdem ist die Summe der kleineren Unfälle gerade auch aus Branchensicht nicht zu vernachlässigen.
- Die Auswertungen von Unfällen bei Kunden- und Eigenanlagen ergaben, dass menschliches Fehlverhalten die dominante Unfallursache ist. Deshalb sollten auch in Zukunft weitere Anstrengungen unternommen werden um die Sicherheit der Bedienung und die Schulung des Personals weiter zu erhöhen.
- Die normalisierten Gesamtunfallraten nahmen im Zeitraum 1981-2002 ab, sowohl für die Todesfälle als auch für die Verletzten. Dies kann als Hinweis für die kontinuierlichen Verbesserungen der Sicherheit in der Gasindustrie interpretiert werden.
- Die aus den DVGW-Unfalldaten gewonnen Erkenntnisse sind auch für die Verhältnisse in der Schweiz repräsentativ, da sich Technologien, Management, Vorschriften und Sicherheitskultur in beiden Ländern stark ähnlich sind.
- Die schwersten Unfälle in Deutschland (12 Todesfälle) und der Schweiz (5 Todesfälle) sind deutlich tiefer als die zuvor erwähnten Werte für „Zentraleuropa“ und EU15.

Danksagung

Dr. Stefan Hirschberg trug während den verschiedenen Projektphasen massgeblich zum guten Gelingen dieser Studie bei. Der SVGW und DVGW stellten länderspezifischen Statistiken zu Erdgasunfällen zur Verfügung, die eine ausführliche und umfassende Auswertung ermöglichten.

Literaturverzeichnis

- [1] *Burgherr, P. und Hirschberg, S.:* Comparative assessment of natural gas accident risks. PSI-Bericht Nr. 05-01. Villigen PSI: Paul Scherrer Institut 2005.
- [2] *DVGW:* DVGW Schaden- und Unfallstatistik Gas für den Zeitraum 1981 bis 2002: Elektronische Daten im Excel-Format. Bonn: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. 2004.

- [3] *Burgherr, P., Hirschberg, S., Hunt, A. und Ortiz, R.A.:* Severe accidents in the energy sector: damage indicators and external costs. Villigen PSI, Switzerland: Paul Scherrer Institut noch nicht erschienen.
- [4] *Hirschberg, S., Spiekerman, G. und Dones, R.:* Severe accidents in the energy sector. First edition. PSI-Bericht Nr. 98-16. Villigen PSI: Paul Scherrer Institut 1998.
- [5] *SVGW:* SVGW Schaden- und Unfallstatistik Gas für den Zeitraum 1995 bis 2003. Zürich: Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches 2004.
- [6] *IEA:* World energy statistics and balances of OECD countries (1960-2000) and non-OECD countries (1971-2000). Paris: International Energy Agency 2002.
- [7] *Burgherr, P.:* Unfallrisiken im Energiesektor. gwa - Gas Wasser Abwasser 9 (2005) S. 683-93.

Tab. 1 Zusammenfassung der schweren Unfälle mit mindestens 5 unmittelbaren Todesfällen, die sich in den verschiedenen Energieketten der OECD und Nicht-OECD Länder im Zeitraum 1969-2000 ereignet hatten. Die Unfälle mit der jeweils grössten Anzahl Todesopfer sind ebenfalls angegeben.

Energiekette	OECD			Nicht-OECD		
	Unfälle	Todesfälle	Unfälle mit maximaler Anzahl Todesfälle	Unfälle	Todesfälle	Unfälle mit maximaler Anzahl Todesfälle
Kohle	75	2259	272	102 1044 ¹	4831 18'017 ¹	434 284 ¹
Erdöl	165	3789	577	232	16'494	4375
Erdgas	90	1043	109	45	1000	100
LPG	59	1905	498	46	2016	600
Wasserkraft	1	14	14	10	29'924 ²	26'000
Kernenergie ³	--	--	--	1	31	31

¹ Erste Zeile: Kohle Nicht-OECD ohne China; zweite Zeile Kohle China.

² Banqiao/Shimantan Dambruch forderte alleine 26'000 Todesopfer.

³ Latente Todesfälle sind separat behandelt.

Abb. 1 Aggregierte, normalisierte Todesfallraten für die verschiedenen Energieketten basierend auf schweren Unfällen, die sich in den OECD und Nicht-OECD Ländern im Zeitraum 1969-2000 ereigneten. Nur unmittelbare Todesfälle sind dargestellt, während latente Todesfälle, die vor allem für die Kernenergie von Bedeutung sind, im Text kommentiert wurden.

Abb. 2 Vergleich der Häufigkeits-Schadensausmass Kurven für die Energieketten in der OECD für den Zeitraum 1969-2000. Die Kurven für Kohle, Erdöl, Erdgas, LPG und Wasserkraft basieren auf historischen Unfalldaten und repräsentieren unmittelbare Todesfälle. Die Resultate für die nukleare Kette stammen von einer Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) und widerspiegeln latente Todesfälle. Die gestrichelten vertikalen Linien beziehen sich auf die maximale Anzahl Todesfälle in den fossilen Energieketten.

Abb. 3 Vergleich der Häufigkeits-Schadensausmass Kurven für die Energieketten in der Nicht-OECD für den Zeitraum 1969-2000. Die Kurven für Kohle ohne China, Kohle China, Erdöl, Erdgas, LPG und Wasserkraft basieren auf historischen Unfalldaten und repräsentieren unmittelbare Todesfälle. Die Resultate für die nukleare Kette beziehen sich auf den Unfall im Kraftwerk Tschernobyl. Die unmittelbaren Todesfälle sind durch einen Punkt dargestellt, während für die geschätzten latenten Todesfälle der obere und untere Schwellenwert angegeben sind. Die gestrichelten vertikalen Linien beziehen sich auf die maximale Anzahl Todesfälle in den fossilen Energieketten.

Abb. 4 Anzahl der (a) Unfälle, (b) Todesfälle, (c) Todesfälle pro Unfall und (d) Todesfälle pro GW_ea in der Erdgaskette im Zeitraum 1969-2000. Die Resultate sind dargestellt für OECD, EU15, „Zentraleuropa“ (CH, DE, NL, GB, BE, DK) und Nicht-OECD.

Abb. 5 Vergleich der Häufigkeits-Schadensausmass Kurven für die Erdgaskette in der OECD, EU15, „Zentraleuropa“ und Nicht-OECD im Zeitraum 1969-2000. Die Jahreszahlen in Klammern verweisen auf spezifische Unfälle in der OECD und Nicht-OECD; Erläuterungen im Text. Die gestrichelten vertikalen Linien beziehen sich auf die maximale Anzahl Todesfälle, wobei in Klammern auch das Jahr angegeben ist, in welchem der entsprechende Unfall stattfand.

Abb. 6 Jährliche Todesfallzahlen für ausgewählte Unfallarten bei Kundenanlagen für den Zeitraum 1981-2002.

Abb. 7 Jährliche Todesfallzahlen für ausgewählte Unfallursachen bei Kundenanlagen für den Zeitraum 1981-2002.

Abb. 8 Jährliche Todesfallzahlen für ausgewählte Anlagenarten bei Kundenanlagen für den Zeitraum 1981-2002.

Abb. 9 Zeitliche Entwicklung der pro Million Kunden normalisierten Gesamtunfallraten (Todesfälle und Verletzte) bei Kundenanlagen für den Zeitraum 1981-2002. Die dünnen Linien stellen gleitende 5-Jahres Durchschnittswerte dar.

Abb. 10 Zeitliche Entwicklung der nach Gasabsatz normalisierten Gesamtunfallraten (Todesfälle und Verletzte) bei Kundenanlagen für den Zeitraum 1981-2002. Die dünnen Linien stellen gleitende 5-Jahres Durchschnittswerte dar.