

Physikalische Explosionen

Explosionen aufgrund schneller thermischer Wechselwirkungen

B. Lafrenz

**Forschung
Projekt F 2097**

**Forschung
Projekt F 2097**

B. Lafrenz

Physikalische Explosionen
Explosionen aufgrund schneller thermischer
Wechselwirkungen

Dortmund/Berlin/Dresden 2007

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Aktualisierung des Forschungsberichtes Fb 771 „Physikalische Explosionen““ - Projekt F 2097 - der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Autorin: Dipl.-Ing. Bettina Lafrenz
Gruppe „Anlagen und Verfahren, optische Strahlung“

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund
Telefon: 0231 9071-0
Telefax: 0231 9071-2454
E-Mail: poststelle@baua.bund.de
Internet: www.baua.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40-42, 10317 Berlin
Telefon: 030 51548-0
Telefax: 030 51548-4170

Dresden:
Proschhübelstr. 8, 01099 Dresden
Telefon: 0351 5639-50
Telefax: 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.
Aus Gründen des Umweltschutzes wurde diese Schrift auf Recyclingpapier gedruckt.

ISBN 978-3-88261-064-2

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat.....	5
Abstract	6
1 Einleitung	7
2 Allgemeine Betrachtung	8
3 Unfälle.....	15
4 Wissenschaftliche Untersuchungen	17
4.1 Experimentelle Untersuchungen zu den Auslösebedingungen	18
4.2 Theoretische Modelle und vertiefende experimentelle Untersuchungen zur Vorvermischung	22
4.3 Vertiefende Untersuchungen zum Vorgang der Auslösung und Fortpflanzung von physikalischen Explosionen	27
4.4 Untersuchungen zur Überlagerung einer physikalischen Explosion mit einer chemischen Reaktion	32
4.5 Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den Wärmeübertragungsvorgängen und Druckwellen.....	33
4.6 Untersuchungen zu den Wärmeübertragungsvorgängen und Druckwellen speziell im Rahmen der Reaktorsicherheit in Kernkraftwerken	34
5 Gesetzliche Vorschriften und technische Regeln	37
6 Schutzmaßnahmen	40
7 Zusammenfassung.....	42
8 Literatur.....	44
9 Abbildungsverzeichnis	50
10 Tabellenverzeichnis	51

Physikalische Explosionen

Explosionen aufgrund schneller thermischer Wechselwirkungen

Kurzreferat

Physikalische Explosionen sind schnellablaufende Ereignisse unter der Freisetzung von u. U. sehr hohen Energien. Diese Ereignisse können ausgelöst werden, wenn eine heiße Schmelze (i. a. eine Metallschmelze) mit einem Kühlmittel (i. a. Wasser) in Berührung kommt. Das auslösefähige Stoffsystem ist ein grobverteiltes Gemisch aus heißen Schmelzpartikeln und Kühlmittel. Der Vorgang wird durch einen Triggerimpuls (z. B. einen Druckstoß) ausgelöst, durch den es zu einem Zusammenbruch des Dampffilms zwischen Schmelze und Kühlmittel und zu einer Fragmentation der Schmelze kommt. Die resultierende rasche Wärmeübertragung führt zu einer spontanen Verdampfung und dem Aufbau einer Druckwelle, die ihrerseits die Bedingungen für eine weitere Aufrechterhaltung der Spontanverdampfung erzeugt.

In dem Bericht werden eine Reihe von Unfällen zum Teil mit Todesfolge, in denen es aufgrund eines Kontakts von Schmelze mit Wasser zu physikalischen Explosionen kam, beschrieben und somit die Gefährdungen ausgehend von diesen Explosionen verdeutlicht.

Des Weiteren wird ein Überblick über wichtige experimentelle und theoretische Untersuchungen zu physikalischen Explosionen gegeben. Dabei handelt es sich um Untersuchungen zur Bestimmung der Auslösebedingungen zu diesen Explosionen, zur Verbesserung des Verständnisses der Abläufe während dieser Explosionen sowie zur Entwicklung von Berechnungsmodellen zur Bestimmung der Wärmeübertragungsvorgänge und Druckverläufe.

Abschließend werden die Anforderungen an Schutzmaßnahmen gegen physikalische Explosionen nach den gesetzlichen Vorschriften und technischen Regeln dargelegt sowie Schutzstrategien und konkrete Schutzmaßnahmen vorgestellt.

Schlagwörter:

Physikalische Explosion, Dampfexplosion, Schmelze, Metallschmelze, Dampffilm, Fragmentation, Wärmeübertragung, Druckwelle, Unfall, Schutzmaßnahme

Physical Explosions

Explosions of course fast thermal interactions

Abstract

Physical explosions are fast-running events, possibly involving the release of very high levels of energy. These events can be triggered when a hot molten bath (in general molten metal) comes into contact with a coolant (in general water). The triggerable substance system is a coarsely distributed mixture of hot molten particles and coolant. The process is set off by a trigger impulse (e. g. a pressure surge), which causes the vapour film between the molten material and coolant to collapse and the molten material to fragment. The resulting rapid heat transfer leads to a spontaneous vaporisation and the build-up of a pressure wave, which in turn creates the conditions for ongoing maintenance of the spontaneous vaporisation.

In this report the accidents (partly fatal accidents), in which hot smelt came into contact with cold water and an explosion took place, are discussed, in order to explain the risks of physical explosions.

Giving a review about important theoretical and experimental analysis the report describes tests related to the release conditions, to a better understanding about the events during these explosions and to the development of models to the heat transfer and the pressure distribution.

Presenting the requirements according to regulations and technical rules, the report contains detailed safety strategies and safety measures.

Key words:

physical explosion, vapor explosion, molten material, molten metal, vapor film, fragmentation, heat transfer, pressure wave, accident, safety measures

1 Einleitung

Auf der 12. Sitzung der Störfall-Kommission vom 26.09.1994 übernahm die Bundesanstalt für Arbeitsschutz die Aufgabe, eine Untersuchung zu „physikalischen Explosionen“ durchzuführen. Es sollte geklärt werden:

- welche Unfälle sich dazu ereigneten,
- ob die Vorgänge bei solchen Explosionen für eine sichere Praxis hinreichend gut bekannt sind,
- welche Vorschriften und Regelungen diese Unfälle berücksichtigen und
- ob diese Ereignisse überwiegend Auswirkungen auf die Arbeitssicherheit oder auf die Umweltsicherheit haben.

Hierzu wurden umfangreiche Literaturrecherchen in den Fachliteraturdatenbanken der FIZ-Technik (Datenbanken für Technik und Management zu Technik, Wirtschaft etc., z. B. DOMA, COMP und META) vorgenommen sowie Unfallberichte von Berufsgenossenschaften und Meldungen zu tödlichen Arbeitsunfällen gesichtet und ausgewertet. Als Ergebnis der Arbeiten wurde 1997 der Bericht Fb 771 „Physikalische Explosionen“ veröffentlicht.

Zwischenzeitlich lieferten weitere Unfälle und experimentelle Untersuchungen neue Erkenntnisse zu diesen Explosionen im Hinblick auf den generellen Ablauf, die Wärmeübertragungsvorgänge und die technischen Schutzmaßnahmen. Des Weiteren änderten sich die gesetzlichen Vorschriften und die technischen Regeln. Aufgrund dieser Änderungen war eine Überarbeitung des Fb 771 erforderlich.

Im Rahmen der Überarbeitung wurde zur Ermittlung und Diskussion der aktuellen Textreihen zunächst wieder in mehreren Datenbanken der FIZ-Technik und zusätzlich im übrigen Internet recherchiert.

Die aus der Literatur gewonnenen Erkenntnisse wurden mit den Fachleuten der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH und des Instituts für Kernenergie und Energiesysteme Universität Stuttgart (IKE Stuttgart) diskutiert.

Für die letzten fünf Jahre liegen nur zu wenigen tödlichen Unfällen mit Metallschmelzen konkrete Informationen vor, die aber einige neue Erkenntnisse liefern. Allgemeine Hinweise auf Unfälle bei der Granulierung werden in Fachberichten kurz erwähnt.

Seit Inkrafttreten des Arbeitsschutzgesetzes muss der Arbeitgeber eine Gefährdungsbeurteilung erstellen. Zwischenzeitlich traten mehrere Verordnungen zur Konkretisierung in Kraft oder wurden novelliert. Außerdem wurden mehrere Anleitungen zur Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung veröffentlicht, in denen auf die Gefährdungen, ausgehend von physikalischen Explosionen, hingewiesen wird. Diese sollen nachfolgend kurz erläutert werden. Seit 1997 wurde die Störfall-Verordnung zweimal geändert. Auf diese gesetzlichen Änderungen wird ebenfalls eingegangen.

2 Allgemeine Betrachtung

Physikalische Explosionen – wie sie hier betrachtet werden – können überall dort auftreten, wo kalte Flüssigkeiten auf heißere Medien (meist Flüssigkeiten, aber in Ausnahmefällen wie bei Glas auch Feststoffe) treffen. Eine wichtige Voraussetzung für die Ausbildung einer solchen Explosion ist, dass die Temperatur des heißen Mediums über dem Siedepunkt der kalten Flüssigkeit liegt. Je höher die Temperatur des heißen Mediums (häufig heiße Schmelze) über dem Siedepunkt der kalten Flüssigkeit (Kühlmittel, häufig Wasser) liegt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine physikalische Explosion stattfindet. Eine weitere Voraussetzung für eine physikalische Explosion (wegen der spontanen heftigen Verdampfung auch Dampfexplosion genannt) ist eine Grobvermischung beider Medien miteinander (SCHWALBE, 1982). Es kommt dabei zu einer schnellen Wärmeübertragung von Schmelze zum Kühlmittel mit Druckaufbau¹. Eine rechnerische Abschätzung (FRÖHLICH, 1977 und 1978) hat ergeben, dass das Maximum der Druckwelle bei entsprechenden Temperaturen der Schmelze im Bereich von mehreren 100 MPa liegen kann. In den nachfolgenden Untersuchungen mit Kernschmelzeverbindungen und Wasser wurden diese Drücke ebenfalls erreicht.

Die Beschreibung des Ablaufs einer physikalischen Explosion lässt sich in drei Modellierungen einteilen (FRÖHLICH und UNGER, 1985; BÜRGER et al., 1985; CARACHALIOS et al., 1985):

1. Einschlussreaktion (Entrapment reaction)
2. Inkohärente Interaktion (instationäre (transiente) Detonation)
3. Kohärente Interaktion (quasi-stationäre Detonation).

Bei der erstgenannten Reaktion handelt es sich um Vorgänge, bei denen geringe Mengen an Wasser in heißer Schmelze eingeschlossen werden. Es kommt zunächst zur Überhitzung des entstehenden eingeschlossenen Wasserdampfes. Durch Aufbruch des Einschlusses kommt es zur Grobvermischung und aufgrund der schnellen Wärmeübertragungs- und hydrodynamischen Vorgänge zum Aufbau einer Druckwelle.

Schwalbe beschreibt den Ablauf einer sehr starken Dampfexplosion – die einer inkohärenten Interaktion entspricht – folgendermaßen (siehe auch Abb. 2.1; SCHWALBE, 1982):

Eine heiße Schmelze (z. B. Metallschmelze) und Kühlmittel (z. B. Wasser) treffen zusammen. Es kommt – z. B. in Folge des Einschlusses von einem flüssigen Medium – zu einer Grobvermischung, wobei sich ein Dampffilm an der Grenzfläche zwischen heißem und kaltem Medium bildet, der eine schnelle Wärmeübertragung verhindert (Leidenfrost-Phänomen). Tritt nun ein Druckimpuls (Triggerimpuls) auf, so wirkt er als Auslösemechanismus der physikalischen Explosion. Dieser Impuls kann beispielsweise durch einen Dampfblasenkollaps, das Einsetzen von spontaner Keimbildung (als Beginn des Phasenwechsels von einer Flüssigkeit zum Feststoff), durch einen spontanen Filmzusammenbruch an einer Stelle oder durch eine weitere lokale Einschlussreaktion ausgelöst werden. Äußere Einflüsse können

¹ Weil es sich beim heißen Medium in der Praxis häufig um heiße Schmelzen handelt und bei der kalten Flüssigkeit um Wasser als Kühlmittel, wird nachfolgend häufig von Schmelze und Kühlmittel gesprochen.

ebenfalls die Auslösung einleiten. Nach dem Zusammenbruch des Dampffilms führt der extreme Wärmefluss aus der heißen Phase zur Feinfragmentation (feine Zerteilung) derselben. Aufgrund der größeren Oberfläche zwischen den beiden Medien kommt es zu einer erhöhten Dampfbildung, einem starken Druckaufbau innerhalb der Druckwelle und zur Ausbreitung dieser Welle.

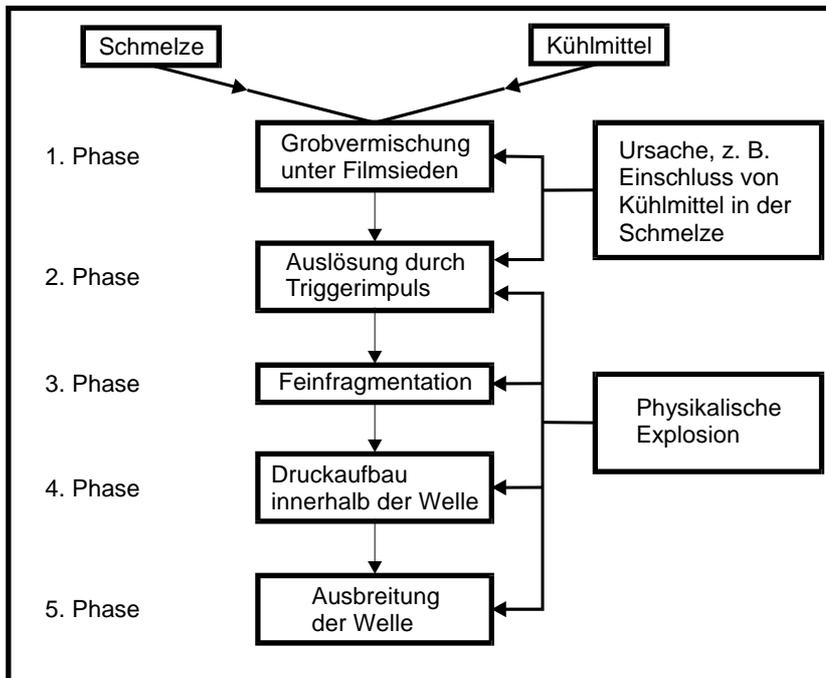


Abb. 2.1 Schematischer Ablauf einer physikalischen Explosion (SCHWALBE, 1982)²

² In den Abbildungen dieses Berichtes wurden die Wörter „Zündung“ durch „Auslösung“, „Detonation“ durch „Explosion“ und „Reaktion“ durch „physikalische Explosion“ ersetzt, um Irritationen aufgrund einer anderen Verwendung dieser Begriffe im Fachbereich der chemischen Verfahrenstechnik zu vermeiden. Die Abbildungen in diesem Bericht wurden (ohne Informationsänderung) aufgearbeitet.

Für den Fall, dass heiße Schmelze in Wasser fällt, ist dieser Ablauf in Abb. 2.2 schematisch dargestellt.

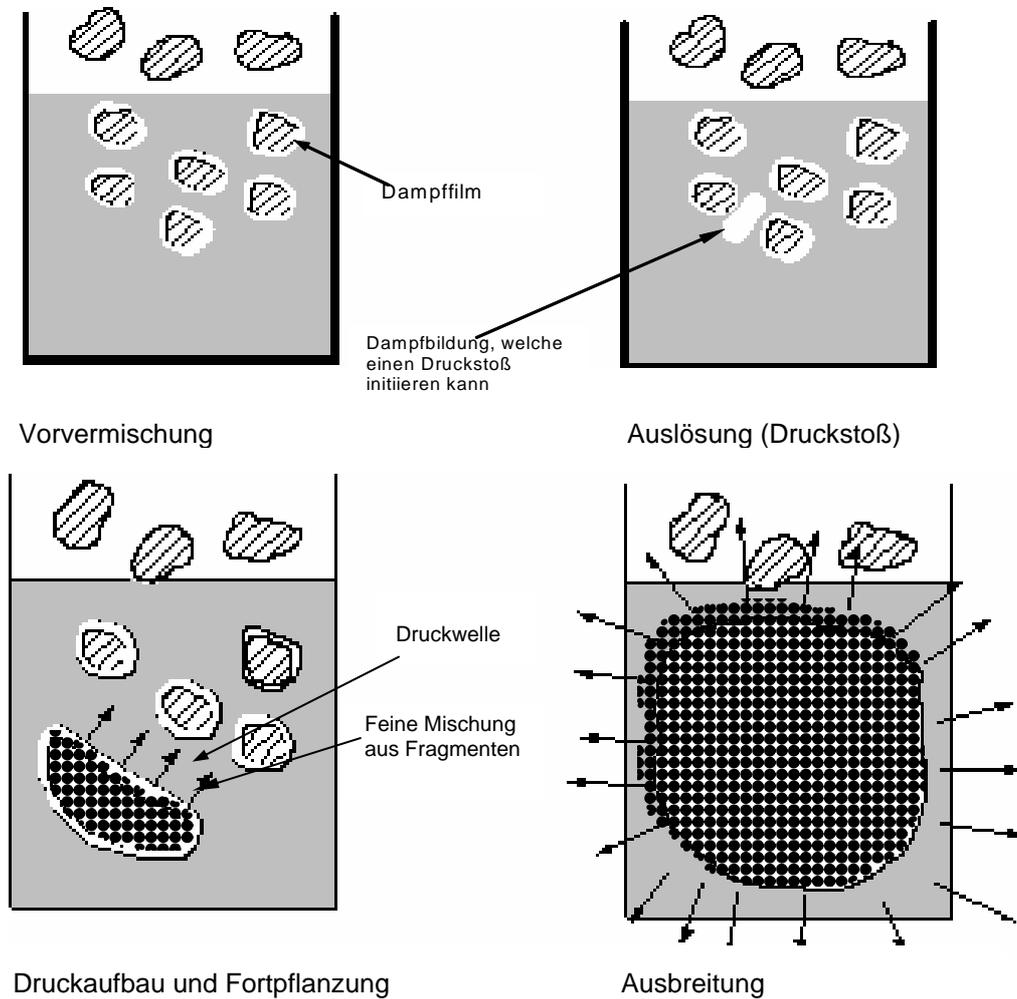


Abb. 2.2 Schematische Darstellung des Ablaufs einer physikalischen Explosion für eine mögliche Art des Kontaktes zwischen heißer Schmelze und Wasser (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997)

Zum Einschluss des kalten Mediums (Ursache für die Grobvermischung und Auslösung der physikalischen Explosion) kann es ebenfalls kommen, wenn Kühlmitteltropfen auf ein heißes Medium fallen und darin eindringen. In Abb. 2.3 sind einige mögliche Kontaktarten zwischen Schmelze und Wasser dargestellt.

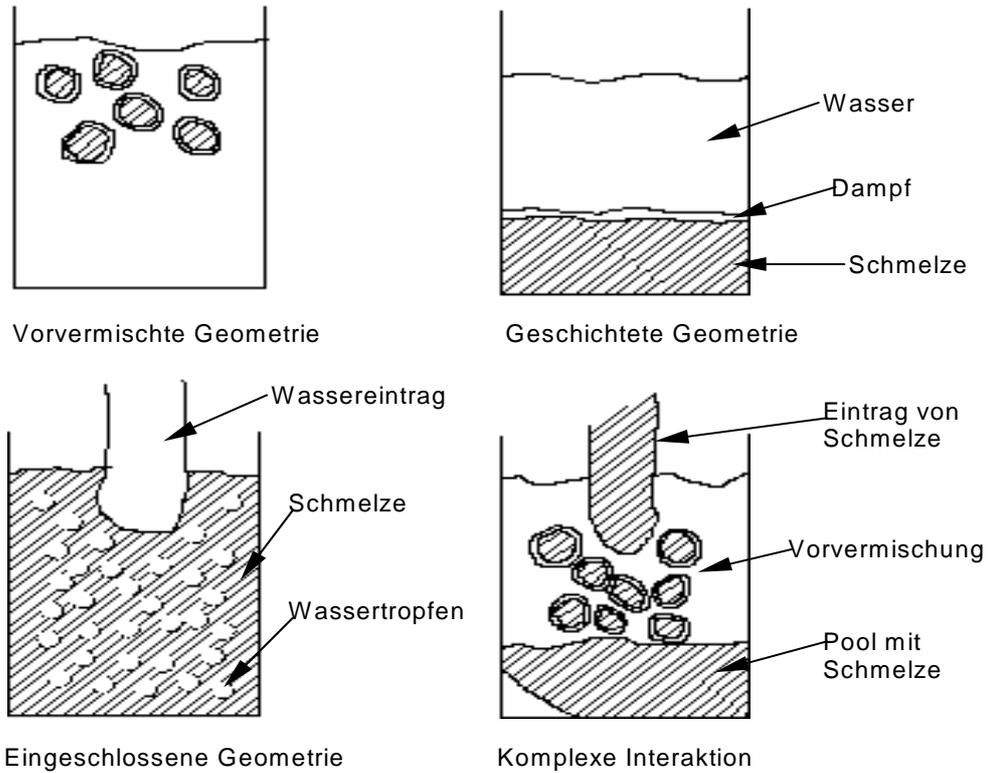


Abb. 2.3 Schematische Darstellung der verschiedenen Kontaktarten zwischen Schmelze und Wasser (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997)

In Tab. 2.1 wird der Durchlauf einer – im Grenzfall stationären (Geschwindigkeit und Druck) – sehr starken Druckwelle (Stoßwelle) durch ein Schmelze-Kühlmittel-Gemisch einer chemischen Explosion gegenübergestellt.

Tab. 2.1 Vergleich zwischen chemischer und physikalischer Explosion (SCHWALBE, 1982)

	Chemische Explosion	Physikalische Explosion
Energiefördernder Vorgang	Chemische Reaktion	Wärmeübergang von der Schmelze zum Kühlmittel
Auslösefähiges Stoffsystem	z. B. Explosivstoff: Nitroglyzerin, Knallgas etc.	Grobverteilttes Gemisch aus heißen Schmelzpartikeln und Kühlmittel bei hoher Temperaturdifferenz (wichtige Voraussetzung hierzu: Filmsieden).
Auslösung des Vorganges	Eine starke exotherme Reaktion erzeugt eine Druckwelle.	Durch den Triggerimpuls (Druckstoß) kommt es zum Filmzusammenbruch und zur Fragmentation. Durch die daraus resultierende rasche Wärmeübertragung und spontane Verdampfung wird eine Druckwelle erzeugt.
Ausbreitung des Druckstoßes	Die Initiierung der chemischen Reaktion im noch nicht reagierten Medium erfolgt entweder durch eine Stoßwelle (Detonation) oder durch kinetische und Transportvorgänge (Deflagration/Explosion).	Die Druckwelle löst fortwährend die Bedingungen für den raschen Wärmeübergang im noch nicht fragmentierten Schmelze-Kühlmittel-Gemisch aus und wird durch die ausgelöste Spontanverdampfung aufrechterhalten.

Bei der kohärenten Interaktion (quasi-stationären Detonation) wird davon ausgegangen, dass nach der bereits beschriebenen Grobvermischung und dem Zusammenbruch des Dampffilms an einem Fragment die Fortpflanzung bzw. der Filmzusammenbruch an den übrigen Fragmenten durch Abscheren aufgrund der Strömung und durch lokalen Druckanstieg aufgrund der starken Wärmeübertragung erfolgt. Bedingt durch die extreme Wärmeübertragung kommt es zur konvektionsbedingten Strömung und Relativgeschwindigkeiten zwischen der Schmelze und dem umgebenden Fluid bzw. der erhitzten und der noch kalten Zone. Dieser Vorgang läuft innerhalb von wenigen Millisekunden ab. Deswegen wird von einem quasi-stationären Vorgang gesprochen, bei dem an der Druckwellenfront bereits hydrodynamisches und thermisches Gleichgewicht zwischen den Phasen vorherrscht. Es wird angenommen, dass dieser Vorgang den „worst case“ bei Interaktionen von großen Schmelze- und Wassermassen darstellt und zu besonders heftigen schnell ablaufenden Explosionen führt (CARACHALIOS et al., 1985).

Eine physikalische Explosion kann nachträglich über die fein verteilten Fragmente (resultierend aus der vorhergegangenen Fragmentation) des ehemals heißen Mediums meist eindeutig nachgewiesen werden (FRÖHLICH, 1977). Eine Ausnahme

dazu bilden die Ereignisse mit den Medien verflüssigtes Gas und Wasser, weil in diesen Fällen die Fragmente nur kurzzeitig in Form von Eiskristallen vorliegen.

Zu den Bedingungen, die eine solche Explosion auslösen („Auslösebedingungen“³), gibt es mehrere Theorien bzw. Modelle. Eine vollständige Klärung dieser Bedingungen, wie sie beim Eintritt eines Ereignisses konkret vorgelegen haben, ist aufgrund der Vielzahl an möglichen Einflussparametern nicht zu erwarten.

Die entscheidenden Parameter für solche Auslösungen sind:

- die Temperaturdifferenz,
- das Massenverhältnis zwischen der kalten und heißen Phase sowie
- die Tropfengröße der eindringenden oder der eingeschlossenen Flüssigkeit.

Weitere Einflüsse sind:

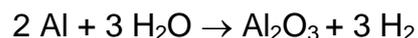
- Geometrie (Form des Versuchsgefäßes und der Kontaktfläche),
- Stoffwerte der kalten und heißen Phase (Schmelzpunkt, Siedepunkt, Dichte, spez. Wärmekapazität etc.),
- Fremdzusätze und
- Störungen (z. B. Stoßwellen).

Bei allen Untersuchungen zu diesem Thema standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Bei welcher Temperaturdifferenz entsteht ein Dampffilm?
- Unter welchen Bedingungen bricht dieser zusammen?

In Untersuchungen nach 1990 wurde zusätzlich noch unterschieden, ob es zu einem spontanen Filmzusammenbruch des instabilen oszillierenden Dampffilms kam oder der Zusammenbruch durch einen externen Triggerimpuls ausgelöst wurde (MATSUMURA und NARIAI, 1996).

In Versuchen mit Aluminium und Wasser kam es aufgrund der großen Kontaktfläche von heißem und kaltem Medium durch die Fragmentation nicht allein zu einer extremen Wärmeübertragung, sondern zusätzlich – bedingt durch die hohe Reaktionsfreudigkeit der Aluminiumschmelze – u. a. zu einer sekundären chemischen Reaktion zwischen den beiden Medien Aluminium und Wasser (WITTE und COX, 1973; MAISCHAK und FEIGE, 1970):



Ist eine physikalische Explosion mit dieser chemischen Reaktion überlagert, dann macht sich dies durch einen sehr starken Lichtblitz und hoher Energiefreisetzung in der Größenordnung von über 5 MJ/kg bemerkbar (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997).

³ In der Literatur wurden die „Auslösebedingungen“ häufig „Zündbedingungen“ und die „Auslösung“ einer physikalischen Explosion auch „Zündung“ genannt.

Generell können in allen Industriezweigen physikalische Explosionen auftreten, in denen der beschriebene Kontakt zwischen heißen und kalten Flüssigkeiten im Störfall möglich ist. Das sind vorrangig die Metallindustrie und Hüttenwerke, in denen z. B. Kondenswasser auf dem Gießtisch, in den Kokillen oder in Schrotteingaben mit den heißen Metallschmelzen aufeinandertreffen. Ebenfalls können Betriebe mit Dampfkesseln betroffen sein, wenn sich beispielsweise heiße Kohleschlacke und Kühlwasser aufgrund einer Leckage vermengen oder sich große Ascheklumpen von Ofenwänden lösen und in den mit Wasser gefüllten Aschesammler fallen (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997). Auch in Betrieben mit Ölbädern, in der Glasindustrie, in der chemischen Industrie, bei der Versinterung von radioaktivem Abfall (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997), während eines unfallbedingten Kontaktes von Kernschmelze und Kühlwasser in Leicht-Wasser-Kernreaktoren und in Flüssiggasleitungssystemen können physikalische Explosionen vorkommen (WITTE und COX, 1973; JENNINGS, 1974).

3 Unfälle

Seit der Erfassung der tödlichen Arbeitsunfälle durch die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (d. h. für den Zeitraum von 1967-2006) liegen 13 Meldungen zu tödlichen Unfällen in der Stahlindustrie vor, bei denen eindeutig eine physikalische Explosion beteiligt oder allein verantwortlich für den Unfall war (HENTER und HERMANN, 1987-1994; HENTER et al., 1995-2001). Bei diesen Unfällen wurde immer eine meist geringe Menge an Wasser in einer Metallschmelze eingeschlossen. Die verunfallten Personen wurden von heißer Schmelze getroffen und erlitten Verbrennungen, wurden durch die Druckwelle fortgeschleudert oder von Gegenständen erschlagen. Diese Explosionen kamen immer sehr spontan, so dass den Beschäftigten keine Möglichkeit blieb, (schadensbegrenzende) Gegen- bzw. Schutzmaßnahmen zu ergreifen. In einigen dieser Fälle trat in Folge der Explosion ein Brand auf. Da sich keine leicht entzündlichen Gegenstände (Kleidung, Holz etc.) in der Nähe des Explosionsortes befanden, liegt die Vermutung nahe, dass die physikalische Explosion von einer chemischen Reaktion überlagert war.

Nachfolgend sollen einige tödliche Arbeitsunfälle und Unfälle mit Verletzten in der Stahlindustrie beschrieben werden:

In einer Gießerei floss heiße Schmelze eines Rinnenofens beim Abstich in eine Ofengrube mit Kühlwasser (von einer Induktorleckage). Die daraus resultierende Explosion führte nur zu einem großen Sachschaden (RUDOLPH, 1988). RUDOLPH (1988) stellt Rinnenöfen, die unter dem Ofen einen Induktor angeflanscht haben, als Schwachpunkt dieses Anlagekonzeptes dar, weil bei Leckagen vom Induktor die gesamte – nach dem Abstich abfließende – Schmelze mit dem „Leckagestrom“ reagieren kann.

1994 ereignete sich ein Arbeitsunfall in einem deutschen Stahlwerk, bei dem einem Beschäftigten eine Getränkeflasche in einen Kessel mit flüssigem Hartzink fiel. Der Beschäftigte wurde vom herausspritzenden Zink tödlich verletzt.

Bei einem weiteren Unfall in 1994 gelangte während des Schmelzvorganges von Alteisen durch ein Leck in der Ofenwand Wasser in den wassergekühlten Elektroofen. Es kam zur Explosion im Ofen und eine große Zahl an Metallteilen wurde aus dem Ofen geschleudert. Dabei wurden sieben Beschäftigte verletzt.

1995 wurde ein Arbeitsunfall bekannt, bei dem ebenfalls Kühlwasser über ein Leck in einen Elektroofen gelangte. Die Explosion war so heftig, dass ein abgerissenes Rohr die Schutzscheibe zum Steuerstand durchschlug. Der am Steuerstand stehende Beschäftigte wurde von der heißen Eisenschmelze getroffen und erlitt tödliche Verbrennungen. Ein zweiter Beschäftigter wurde verletzt.

Bei einem weiteren 1995 bekannt gewordenen Arbeitsunfall in einem Stahlwerk lief durch einen Durchbruch der Abstichrinne ein Roheisen-Schlacke-Gemisch in eine Wasserrinne. Es kam zur physikalischen Explosion. Dabei wurde ein Beschäftigter von einem Mauerstein erschlagen. Zwei weitere Beschäftigte wurden ebenfalls von den Folgen der Druckwelle verletzt und zusätzlich durch Heißdampf verbrüht.

1997 wurde ein Unfall mit einem Ofen bekannt, in den Reinnickel eingebracht und in dem Trockenstampfmasse gesintert wurde. Die Nickelpellets wurden von Fässern mit einem Gabelstapler in den Ofen gefüllt. Vermutlich befand sich in einem Fass eine Flüssigkeit, die beim Einfüllen in den Ofen gelangte. Es kam zur Explosion, und der Gabelstaplerfahrer wurde durch die herausgeschleuderte Schmelze tödlich verletzt.

1999 kam es bei einem Schmelzkübel mit flüssiger Aluminiumschmelze zu einem tödlichen Unfall. Der Kübel war mit einem Gitterrost abgedeckt, der es ermöglichte zu prüfen, ob sich evtl. Wasser im Kübel befand. Der Gitterrost wurde aber auch als Standfläche von den Beschäftigten genutzt. Zum Unfall kam es vermutlich, weil sich Schneereste aus dem Schuhsohlenprofil des Verunfallten lösten und durch den Gitterrost in den Kübel fielen, während der Verunfallte auf dem Rost stand. Die herausgeschleuderte Schmelze verletzte zusätzlich einen weiteren Beschäftigten schwer.

2002 ereignete sich ein Unfall, bei dem ein Radladerfahrer beim Vorbeifahren an einem Schlackebett von heißer Schlacke getroffen wurde. Kurz vor dem Unfall war aus einer Schlackepfanne über 1000 °C heiße Schlacke abgefüllt worden. Aufgrund von Wassereinschlüssen aus Regenfällen kam es zur Explosion.

2003 zeigte ein Unfall, dass aufgrund von Trümmerwurf auch Anwohner betroffen sein können. Bei diesem Unfall kam es in einer horizontalen Stranggussanlage zum Strangabriss, so dass der noch flüssige Stranginhalt in die mit Wasser gefüllte Auffanggrube floss. Aufgrund der großen Masse an Eisen im Verhältnis zur Wassermasse in der Auffanggrube kam es zur Explosion. Aus dem Unfall konnte weiter die Erkenntnis gezogen werden, dass unter bestimmten Umständen die in der ursprünglichen Version des Berichts Fb 771 beschriebene „traditionelle“ Schutzmaßnahme „Wasserstand in der Gießgrube auf mindestens 1 m erhöhen“ nicht ausreicht bzw. sogar ungeeignet ist (LAFRENZ, 1997, S. 26).

Aus der chemischen Industrie wurden ebenfalls Unfälle mit physikalischen Explosionen bekannt. Bei zwei Unfällen wurden in einem Behälter Stoffe erhitzt, auf dessen Boden sich eine Wasserschicht unter den Chemikalien abgesetzt hatte. Diese Wasserschicht erhitze sich weniger als die darüberliegende Schicht, so dass sie eine Temperatur von unter 100 °C behielt, während die darüberliegende Schicht Temperaturen von über 100 °C annahm. Eine spontane Grobvermischung leitete die physikalische Explosion ein.

JENNINGS (1994) schildert weitere Beispiele aus der chemischen Industrie, bei denen durch eine mangelnde Durchmischung bei der Erhitzung Dampfexplosionen ausgelöst werden können.

Des Weiteren wurden Schadensfälle zu physikalischen Explosionen bei der Granulierung von flüssigen Schmelzen (z. B. Kunststoff- oder Schlackeschmelzen) diskutiert. Zu diesen Ereignissen liegen aber keine weiteren Informationen vor.

Zu Kernkraftwerken wurden weltweit insbesondere drei Unfälle, bei denen vermutlich eine physikalische Explosion beteiligt war, bekannt (BUCHNER, 2005): ein Ereignis in Windscale (Sellafield, England) 1973, ein Ereignis in Idaho Falls (USA) 1961 und das wohl bekannteste Ereignis in Tschernobyl 1986. Neben dem Unfall in Tschernobyl mit vielen Toten unter den Beschäftigten und den Anwohnern

fürte auch der Unfall in Idaho zum Tod von drei Beschäftigten. In allen drei Fällen kam es zu weitreichenden lang anhaltenden Folgen durch Verstrahlung der Beschäftigten und der Umgebung. Deswegen kommt diesen Unfällen, trotz der geringen Unfallhäufigkeit, eine besondere Bedeutung zu.

Die beschriebenen tödlichen Arbeitsunfälle, die sich ab 1994 ereigneten, fanden vorrangig in Stahlwerken statt. Dies bestätigt die Vermutung, dass dieser Industriezweig bezüglich physikalischen Explosionen besonders gefährdet ist. Bei diesen Unfällen führte ein unerwarteter Einschluss von kalter Flüssigkeit (Wasser) in die heiße Schmelze zur Explosion.

Abschließend sei vermerkt, dass aufgrund eingeschränkter Meldepflicht und Vertraulichkeit der Informationen nur ein kleiner Teil der Ereignisse mit physikalischen Explosionen bekannt wurde. Die tatsächliche Zahl der Ereignisse ist vermutlich viel höher.

4 Wissenschaftliche Untersuchungen

Die Schwere der Unfälle führte dazu, dass schon frühzeitig umfangreiche Untersuchungen zur Beschreibung der Vorgänge und zur Vermeidung physikalischer Explosionen vorgenommen wurden.

Bereits in den 70er und 80er Jahren wurden theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die Auslösebedingungen für das Auftreten einer physikalischen Explosion zu ermitteln und um Modelle zur Wärmeübertragung und Druckwellenausbreitung zu erstellen.

Folgende Medienkombinationen wurden u. a. untersucht (BENZ et al., 1976; FRÖHLICH, 1978; TSO und TIEN, 1980; SHOJI und TAKAGI, 1986; MIYAZAKI et al., 1984; TAKAMASA, 1986; ZIMANOWSKI et al., 1986; FLETCHER und THEOFANOUS, 1997):

- Zinn/Wasser,
- Aluminium/Wasser,
- Aluminiumoxid(Al_3O_2)/Wasser,
- Gallium/Wasser,
- Glas/Wasser,
- Silikonöl/Ethanol,
- Silikate, Karbonate/Wasser,
- Magma/Wasser,
- CORIUM A und B/Wasser,
- UO_2/ZrO_2 /Wasser und
- Flüssiggas/Wasser.

Den Kombinationen ist zu entnehmen, welche bedeutende Rolle Wasser bei physikalischen Explosionen spielt. Die Gründe sind leicht einzusehen – zumal es durch Kühlwasser, Regenwasser etc. leicht zu unerwünschten Einträgen in die Schmelze kommen kann. In den 90er Jahren wurde versucht, die Auslösebedingungen weiter zu erklären und die Modelle für physikalische Explosionen – mit Hilfe der Beschreibung der Wärmeübergänge – zu verfeinern. Neben den Ergebnissen aus den Untersuchungen von Fröhlich und Unger (FRÖHLICH und

UNGER, 1985), wurden weitere wichtige Ergebnisse insbesondere in Japan und den USA erarbeitet (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997).

In darauf folgenden Forschungsvorhaben erfolgten wichtige Versuchsreihen im Rahmen des Reactor Safety Research Programms der Europäischen Union sowie anschließend im OECD-Projekt SERENA (Steam Explosion Resolution for Nuclear Application) unter der Beteiligung zahlreicher internationaler Forschungsinstitutionen. Um die Ergebnisse der Versuchsreihen des Reactor Safety Research Programms überschaubar darzustellen, wurde ein Datenbasis-Programm STRESA (Storage of Reactor Safety) vom Joint Research Centre (JRC) aufgestellt (ANNUNZIATO et al., 2006). Von den in diesem Rahmenprogramm durchgeführten Projekten sind bezüglich physikalischer Explosionen insbesondere das FARO (Fuel Melt and Release Oven) Programm (1987-1999) und das sich teilweise anschließende KROTOS Programm (finanziert von der EU über die Plattform PLINIUS) zu nennen, die auf die Vorgänge von möglichen physikalischen Explosionen in Leicht-Wasser-Kernreaktoren abzielen. Das noch laufende Projekt SERENA dient dazu, aus bestehenden Modellen und Untersuchungen der Phasen einer physikalischen Explosion die noch bestehenden Unsicherheiten (Diskrepanzen zwischen Modellen und experimentell ermittelten Werten) zu sichten und im zweiten Schritt zu beseitigen. Bei den experimentellen Untersuchungen wurden Schmelzmassen im Kilogramm- bzw. Tonnenbereich eingesetzt. Sie dienten nicht mehr vorrangig dazu, die Auslösebedingungen zu ermitteln, sondern die Vorgänge bei der Vorvermischung, Auslösung und Ausbreitung der physikalischen Explosion sowie die Überlagerung mit einer chemischen Reaktion unter der Bildung von Wasserstoff weiter zu erforschen.

4.1 Experimentelle Untersuchungen zu den Auslösebedingungen

Die ersten experimentellen Untersuchungen wurden mit geringen Mengen an heißer Schmelze (Schmelzetropfen im Grammbereich) durchgeführt. Beim Ablauf der Interaktion handelte es sich jeweils um inkohärente Vorgänge. In den nachfolgenden Überlegungen zur Reaktorsicherheit wurde festgestellt, dass die Ergebnisse dieser Versuche mit geringen Mengen (Single Drop Experiments) sich insbesondere bezüglich der Vorvermischungsphase und der Fortpflanzungsphase nicht auf Ereignisse mit größeren Mengen an Schmelze übertragen lassen (BERTHOUD, 2000). Weil diese „Single Drop Experiments“ aber die Anfänge der Untersuchungen zu physikalischen Explosionen darstellen, werden sie hier zunächst beschrieben.

ANDERSON und ARMSTRONG (1981) führten ihre Untersuchungen mit Aluminium und Wasser durch. Sie ließen sowohl Wasser in einen mit flüssigem Aluminium gefüllten Tank tropfen, als auch umgekehrt Aluminium in einen Wassertank. Der variable Parameter war dabei die Wassertemperatur. Ihre Versuche ergaben, dass die Wahrscheinlichkeit und die Heftigkeit einer Dampfexplosion mit der Wassertemperatur steigt. Die Explosionen waren gelegentlich von einer chemischen Reaktion begleitet. Eine Gesetzmäßigkeit dafür konnte aber nicht gefunden werden.

Long führte ebenfalls Versuche mit Aluminium und Wasser durch (WITTE und COX, 1973). Er ließ flüssiges Aluminium in einen Wassertank tropfen und beobachtete dessen Ausbreitung und das Absinken. Indem er die Wassertiefe des Tanks und die Temperatur des Aluminiums variierte, konnte er ermitteln, dass mit steigender Aluminiumtemperatur und sinkender Wasserbadtiefe die Wahrscheinlichkeit für eine Dampfexplosion steigt. Abb. 4.1 zeigt den Aufbau und die Messergebnisse.

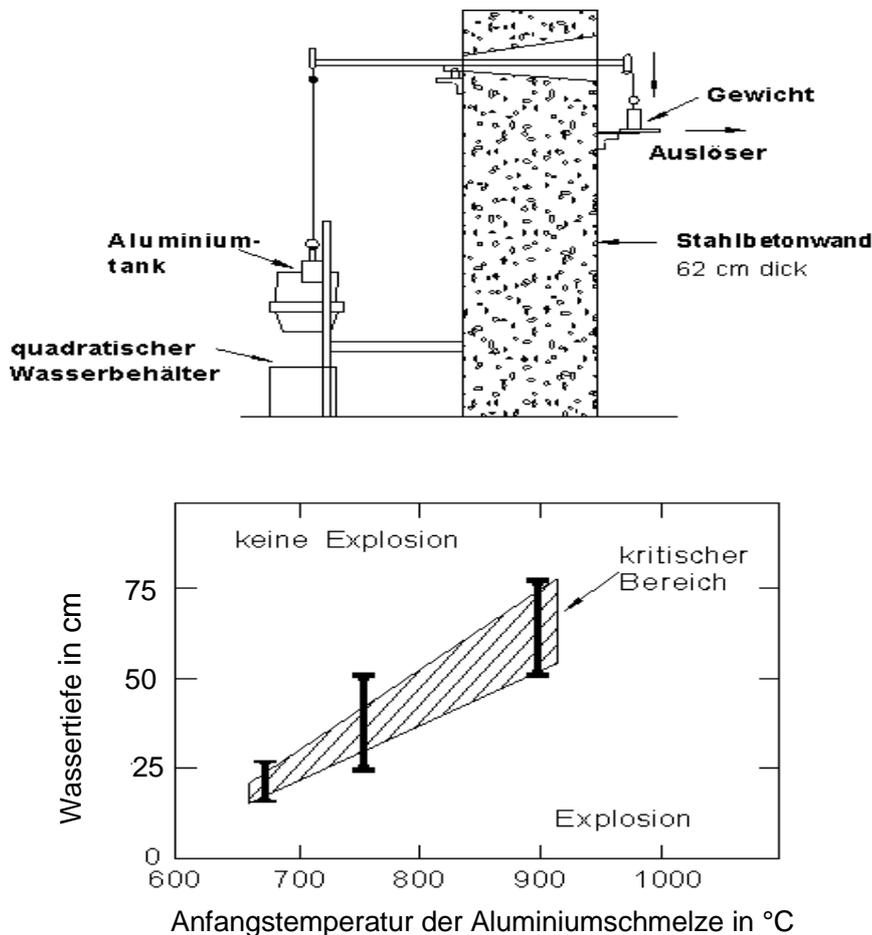


Abb. 4.1 Versuchsaufbau und Ergebnisse der Experimente von Long (WITTE und COX, 1973)

Die Untersuchungen von FRÖHLICH und UNGER (1985) ergaben, dass generell die Gefahr einer physikalischen Explosion besteht, sobald die heißere Flüssigkeit eine Temperatur oberhalb des Siedepunktes der kälteren besitzt. Es kann also auch bei kleinen Temperaturdifferenzen zu solchen Explosionen kommen. Sie stellten fest, dass die Auslösung von so vielen Einflussparametern abhängt, dass die Bedingungen dafür nicht genau festgelegt, sondern nur Tendenzen dazu formuliert werden können.

TSO und TIEN (1980) führten Versuche mit den Medienkombinationen Aluminium/Wasser, Zinn/Wasser, Gallium/Wasser, Blei/Wasser, Kupfer/Wasser und Glas/Wasser durch. Sie ließen 12 g des heißen Mediums in Wasser fallen. Die

physikalischen Explosionen wurden in 4 Typen eingeteilt, denen in einem Temperatur-Diagramm Interaktionszonen zugeordnet werden können:

- Typ A: Der Dampffilm bricht zusammen und es kommt zu einer Explosion.
- Typ B: Nach dem Zusammenbruch des Dampffilms erstarrt die heiße Flüssigkeit zu festen Fragmenten und es kommt zu einer Explosion.
- Typ C: Es findet keine Filmverdampfung statt, sondern eine lokale spontane Verdampfung geht sofort auf die restlichen Fragmente über und führte zu einer Explosion.
- Typ D: Die heiße Flüssigkeit erstarrt direkt am Beginn des Kontakts zur kalten, es kommt aber nicht zur Filmverdampfung.

Die Versuchsergebnisse zeigten, dass es in den beschriebenen Zonen A-D nicht zwingend zu einer Explosion kommen muss, aber eine solche prinzipiell immer ausgelöst werden kann. Es muss allerdings bedacht werden, dass in diesen Versuchen nur charakteristische Temperaturen der kalten und der heißen Flüssigkeit als Einflussparameter betrachtet wurden.

SHOJI und TAKAGI (1983) konnten in ihren Versuchen, in denen Metallschmelzetropfen in ein Wasserbad fallen gelassen wurden ($h = 20 \text{ cm}$), eine Abhängigkeit zwischen der Zinn- und Wassertemperatur und der Eindringtiefe des Tropfens bis zur physikalischen Explosion feststellen. Die Eindringtiefe stieg mit den beiden genannten Temperaturen. Sie beobachteten aber eine mangelnde Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse und hielten dies in einem Diagramm fest (siehe Abb. 4.2). Im Diagramm beschreibt die obere Zahl jeweils die Anzahl der eingetretenen physikalischen Explosionen und die untere Zahl die Anzahl der durchgeführten Versuche. Die Größe der Kreise gibt ungefähr die Eintrittswahrscheinlichkeit wieder. Dies zeigt, dass es schwierig ist, genaue Auslösebedingungen für physikalische Explosionen anzugeben.

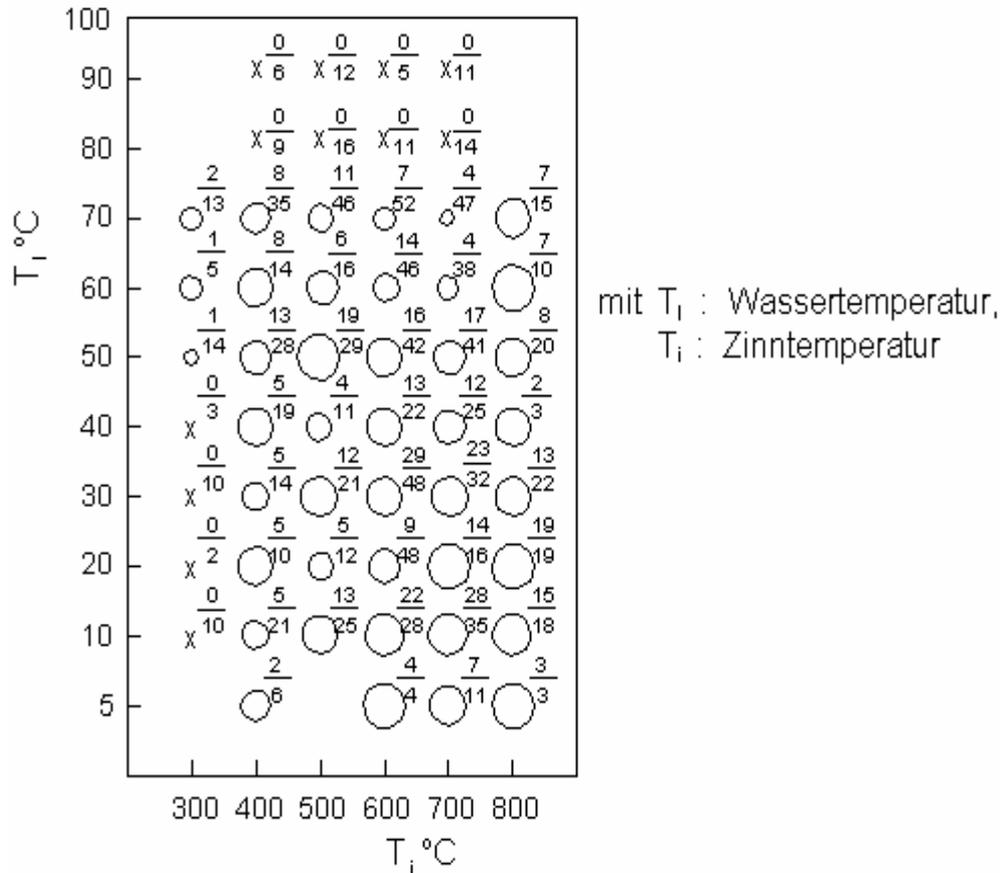


Abb. 4.2 Häufigkeit der physikalischen Explosionen (SHOJI und TAKAGI, 1983)

SHOJI und TAKAGI (1986) führten – neben den Versuchen mit Zinn – auch Versuche mit Ethanol und Silikonöl durch, wobei einzelne Ethanoltropfen in ein Silikonölbath tropften. Sie teilten die Siedevorgänge in fünf Stufen (a-e) ein, wobei die Temperatur des Silikonöls T_h von a nach e ansteigt:

- Der Ethanoltropfen verdampft an der Oberfläche des Silikonöls (Foating state beneath the surface);
- der Ethanoltropfen dringt in das Silikonöl ein, zerteilt sich und Dampfblasen steigen zur Oberfläche (Slow boiling);
- der Ethanoltropfen dringt in das Silikonöl ein, zerteilt sich und es kommt zu einer heftigen Verdampfung, bei der das Silikonöl verspritzt (Instantaneous boiling in hot liquid);
- der Ethanoltropfen dringt gerade in das Silikonöl ein und verdampft nahe an der Oberfläche des Öls (Instantaneous boiling on hot surface);

e) der Ethanoltröpfchen dringt nicht in das Silikonöl ein, sondern verdampft auf der Oberfläche (Floating state on the surface).

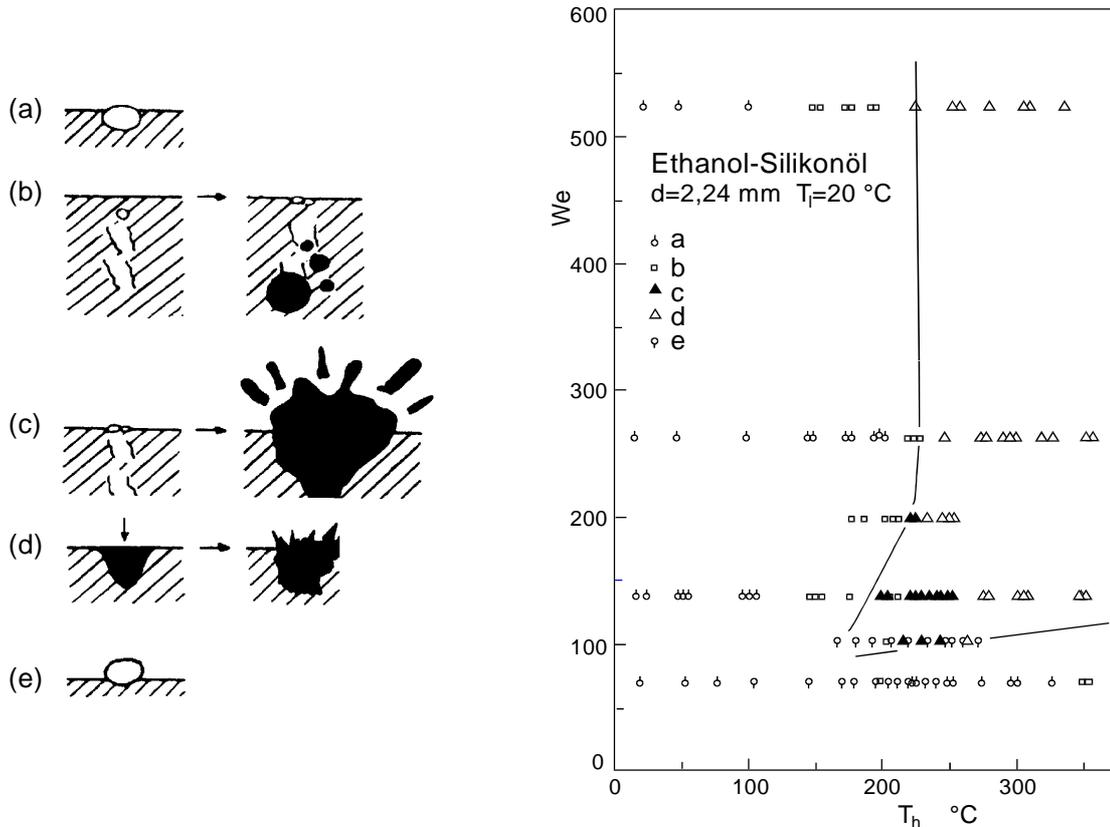


Abb. 4.3 Bildliche Darstellung des Auftreffvorgangs von Ethanoltröpfchen und Versuchsergebnisse zur physikalischen Explosion von Ethanol in Silikonöl (SHOJI und TAKAGI, 1986)

SHOJI und TAKAGI (1986) trugen ihre Versuchsergebnisse in Abhängigkeit zur Weberzahl und der Temperatur des Silikonöls auf (siehe Abb. 4.3). Sie konnten feststellen, dass bei hohen Temperaturen des Silikonöls kein Silikonöl mehr verspritzt wurde. Kein Eindringen bedeutet aber auch: keine Explosionsgefahr.

In den nachfolgenden Untersuchungen konnte ermittelt werden, dass der gesamte Vorgang einer starken Explosion unmittelbar von den jeweiligen geometrischen und physikalischen Gegebenheiten eines Systems abhängt und keine Pauschalaussagen zu Auslösebedingungen und zum Ablauf der Explosion gemacht werden können.

4.2 Theoretische Modelle und vertiefende experimentelle Untersuchungen zur Vorvermischung

Die Aufmerksamkeit wendete sich in weiteren Untersuchungen ab von den energetischen Voraussetzungen zur Vorvermischung hin zur hydrodynamischen Limitierung der Vermischung von Wasser mit grobfragmentiger Schmelze (Fragmente

in der Größenordnung von 2-10 mm). Diese Limitierung wird bedingt durch die Verdampfung des Wassers während des Vorgangs und ist bekannt als Wasser-Verbrauchs-Phänomen. HENRY und FAUSKE stellten zu diesem Phänomen das „Critical heat flux model“ (CHF) auf. Dieses Modell wurde inzwischen verworfen, weil es von einem eindimensionalen stetigen Vorgang ausging und gerade bei größeren Massen im Tonnenbereich kein realistisches Bild wiedergibt. Es folgten mehrere mehrdimensionale Modelle, die alle drei Phasen: Wasser, Schmelze, Dampf berücksichtigten (CHYMES, PM-ALPHA, THIRMAL; vgl. FLETCHER und THEOFANOUS, 1997).

Weitere Untersuchungen galten u. a. der Dampfbildung während des Kontaktes der Schmelze mit Wasser, weil eine starke Dampfbildung einerseits einer Abkühlung der Schmelze entgegenwirkt, andererseits aber auch einen Dampfkollaps als Triggerimpuls erschwert sowie hohen Drücken durch Kompressibilität entgegenwirkt (GESELLSCHAFT FÜR REAKTORSICHERHEIT, 2005). Untersucht wurde in den nachfolgend beschriebenen Versuchsreihen, insbesondere aber auch die Zerteilung des eintretenden Schmelzestrahls im Wasser (Breakup), weil eine schnelle Verteilung und starke Wärmeübertragung von Schmelze zum Wasser eine rasche Verfestigung der Schmelzefragmente vor der Auslösung einer Explosion begünstigt.

Am IKE Stuttgart (Institut für Kernenergetik und Energiesysteme der Universität Stuttgart) wurde die Energiebilanz unter der Berücksichtigung der Schwingungen des instabilen Dampffilms untersucht und später das zweidimensionale Mehrphasenmodell IKEMIX entwickelt (VUJIC, 2006). Das Modell beruht u. a. auf der Überlegung, dass der Breakup des eintretenden Schmelzestrahls durch Abtragen der Wellenberge des Strahls bedingt durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Schmelze und Wasser erfolgt. Bei unterkühltem Wasser schwanken hierzu die Reynolds-Zahlen zwischen 10 und 2000. Dieses führt zur Scherflussinstabilität (VUJIC, 2006). Das Modell wurde dahingehend weiterentwickelt, dass in den verschiedenen Bereichen der Mischung unterschiedliche Dampfgehalte (Akkumulation von Dampf) und unterschiedliche Strömungen (der Dampf behindert den Wärmetransport) vorliegen. Ebenso wird stellenweise der Dampfgehalt dadurch vermindert, dass der Dampf über eine Kanalbildung aus der Mischung austritt. Die neuen Modellberechnungen ergeben, dass der Gehalt an fragmentierter Schmelze in den Zonen mit 20-40 % Dampfgehalt am höchsten ist. Eine Berücksichtigung der Verfestigung der Schmelzetropfen im Modell steht noch aus.

Auf die theoretische Modellierung folgten eine Reihe von experimentellen Untersuchungen zur Validierung der Modelle. Hierzu sollen einige herausragende Projekte weiter beschrieben werden.

Neben dem Ausbreitungsverhalten der Schmelze in Wasser wurden im Projekt FARO (Joint Research Centre (JRC) in Ispra) in 12 Versuchsreihen das Abkühlungsverhalten (Quenching) der Schmelze zunächst in einem einfacheren Reaktor THERMOS und später in der weiterentwickelten Versuchseinheit FAT untersucht (MAGALLON und HOHMANN, 1995 und 1997; MAGALLON et al., 1999; MAGALLON und HUHTINIEMI, 2001). Im Gegensatz zu den vorgehend beschriebenen Versuchen wurde die Schmelze in relativ großen Mengen über eine Düse in ein Wasserbecken eingebracht (siehe Abb. 4.4).

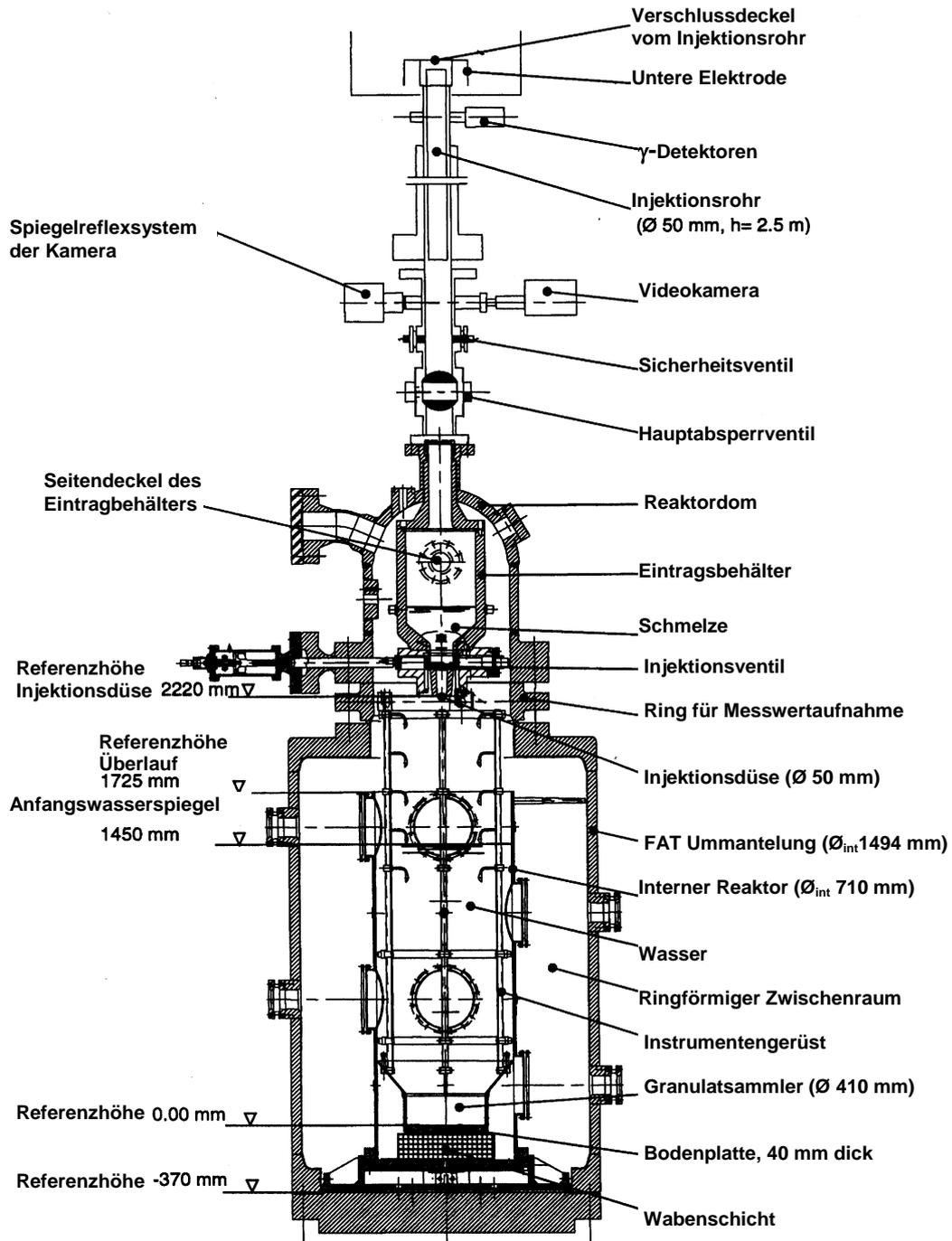


Abb. 4.4 Versuchsanlage zur Testreihe von FARO (Reaktor FAT; MAGALLON und HUHTINIEMI, 2001)

Als Schmelze wurden hierzu verschiedenen Mischungen UO_2 und ZrO_2 und Zr in der Größenordnung von jeweils 18 kg - 200 kg sowie jeweils 120 kg Wasser oder 255 kg Wasser eingesetzt, um den störungsbedingten Kontakt im Leichtwasserreaktor in Kernkraftwerken zu simulieren. Untersucht wurde die Fragmentierung der Schmelze sowie die Dampfbildung bezüglich ihrer Masse und ihrer Temperatur – ohne dabei eine Explosion auszulösen. Die Versuche wurden bei einer Ausgangstemperatur der Schmelze von 1400 °C und einer Wassertemperatur nahe dem Sättigungszustand bei bis zu 5,0 MPa Betriebsdruck (also bei einer Wassertemperatur bis zu ca. 263 °C (Siedetemperatur)) durchgeführt. Variiert wurden die Masse und die Zusammensetzung der Schmelze, die Wassertiefe des Wassertanks, in den die Schmelze fiel, und der Systemdruck. In weiteren Versuchen mit niedrigeren Wassertemperaturen wurde festgestellt, dass auch bei einer Wassertemperatur von 38 °C unterhalb der Sättigungstemperatur während der Versuche keine Explosion stattfand (MAGALLON et al., 1999). Der Betriebsdruck stieg einmal stark beim Kontakt der Schmelze mit Wasser und darauf nochmals beim Auftreffen der Schmelze am Boden der Versuchseinheit an. Der Partialdruck des Dampfes erreichte sein Maximum beim Auftreffen der Schmelze auf dem Boden der Versuchseinheit. Die Zusammensetzung der Phasen hatte Einfluss auf die Oxidationsreaktion des Zr mit dem Sauerstoff des Wassers, so dass die Fragmentierung und die Verfestigung der Schmelze aufgrund dieser Reaktion noch vor dem Erreichen des Bodens der Versuchseinheit zum Erliegen kam. Zur Analyse der Wasserstoffbildung reichten die Versuche von FARO allerdings nicht aus. Der Systemdruck hatte dagegen einen geringen Einfluss auf den Abkühlungsprozess der Schmelze. Aus den Versuchsergebnissen wurde ermittelt, dass mehr als 50 % der Energie der Schmelze während des Falls durch den Wassertank an das System abgegeben wurde (MAGALLON und HUHTINIEMI, 1995). Nur beim Einsatz von über 150 kg Schmelze kam es zu einem starken Druckanstieg über 10 MPa, so dass der Dampf über das Sicherheitsventil abströmte (MAGALLON und HOHMANN, 1997).

Wie bei den Versuchen im Rahmen von FARO stellten KATO und NAGASAKA (2005) in ihren Versuchsreihen COTELS fest, dass Beimengungen von Metallkomponenten zur Kernschmelze zu einer Zerteilung der Schmelze im Wassertank mit einer Fragmentationsrate von bis zu 100 % führen können (KATO und NAGASAKA, 2005). Das Vorhandensein von nichtkondensierbaren Gasen wie Stickstoff oder Argon bewirkten bei den Testreihen von COTELS, dass die erste starke Druckerhöhung beim Breakup ausblieb.

Im Rahmen des Programms KROTOS wurde (teilweise auf die Erfahrungen aus Versuchen mit Zinn und auf die Ergebnisse von FARO aufbauend) in einer relativ kleinen Versuchsanlage die Vorvermischung bei spontan ausgelösten und getriggerten physikalischen Explosionen untersucht (ANNUNZIATO et al., 2005). Als Schmelze wurden sowohl UO_2/ZrO_2 -Gemische als auch Aluminiumoxid (Al_2O_3) von bis zu 10 kg über eine Düse aus einem beschleunigten Tiegel in einen Druckbehälter mit einem Wasserbecken eingebracht. Dabei erfolgten die Versuche einerseits nahe der Sättigungstemperatur des Wassers und andererseits mit unterkühltem Wasser (Wassertemperatur unterhalb der Sättigungstemperatur) bei Anfangsdrücken von 0,1 MPa. Bei einer Wassertemperatur von um die 20 °C kam es bei einem Aluminiumoxid/Wasser-System zu einer spontanen Explosion, bei höheren Wassertemperaturen wurde die Explosion extern ausgelöst (Druckstoß als Triggerimpuls). Während der spontanen Explosion stieg – im Vergleich zur über

einen Triggerimpuls ausgelösten Explosion – der Dampfgehalt im Wasserbecken, ermittelt über den Anstieg des Wasserpegels, stark an und es entstanden besonders feine Fragmente der erstarrten Schmelze. Der maximale Druck betrug 100 MPa (HOHMANN et al., 1995). Es konnte anhand von Videoaufnahmen festgestellt werden, dass bei der Vorvermischung ebenfalls die Zerteilung der Schmelze beim Austritt aus der Düse und beim Durchlaufen der Gasphase vor dem Auftreffen auf das Wasserbad mitbetrachtet werden müssen. Ein Vergleich der Versuche mit Aluminiumoxid und Uranoxidmischung (Kernschmelze) zeigte (HUHTINIEMI et al., 1999):

- Die Kernschmelze drang als Strahl in das Wasser ein, die Aluminiumoxidschmelze fein verteilt als Schmelzefragmente. Dadurch kam die Kernschmelze nicht in Kontakt mit Wänden des Druckbehälters der Testeinheit. Dies kann zum Ausbleiben der Explosion beigetragen haben (HUHTINIEMI und MAGALLON, 2001).
- Die Aluminiumoxidschmelze konnte unabhängig von der Wassertemperatur Explosionen (entweder spontan oder über Triggerimpuls ausgelöst) verursachen.
- Während der Testreihen mit Kernschmelze dagegen wurden weder mit stark unterkühltem Wasser noch mit Wassertemperaturen nahe des Sättigungspunktes eine starke, sondern nur eine milde Explosion durch einen externen Triggerimpuls ausgelöst.

Generell schien der Wasserverlust aufgrund einer starken Verdampfung der Bildung eines instabilen Dampffilms und somit einer Explosion entgegenzuwirken. Die experimentellen Ergebnisse von KROTOS wurden mit den errechneten Werten aus mehreren Modellen (COMETA, VESUVIUS etc.) verglichen. Mit dem mehrdimensionalen Modell VESUVIUS (Vapor Explosion Simulations Under ex-Vessel conditions with the Integrated modular Software) konnten diese Vorvermischungsvorgänge gut beschrieben werden, so dass eine Verifizierung der errechneten Daten zum Anstieg der Wasserhöhe im Wassertank fast mit den experimentell ermittelten Daten übereinstimmten (VIEROW, 2000). Des Weiteren stellten MORIYAMA et al. (2002) vom Japan Atomic Energy Research Institute ein einfaches Modell zur groben Abschätzung der Massenverteilung der verschiedenen Phasen (geschmolzene Fragmente, Schmelzestrahle, erstarrte Fragmente, Dampf) in Korrelation zu den experimentellen Ergebnissen von KROTOS vor. Die Anwendung des Modells bestätigte nochmals das unterschiedliche Verhalten von Aluminiumschmelze und Kernschmelze. Danach bildet die Kernschmelze viel schneller erstarrte Fragmente (höhere Wärmeübertragung) als die Aluminiumschmelze. Dies kann ein Grund sein, warum in den Versuchen mit Kernschmelzen keine starken physikalischen Explosionen ausgelöst wurden. Eine schnelle Zerteilung im Wasser (Breakup) bewirkte eine größere Masse an Schmelzefragmenten mit einer größeren Dampfreaktion. Das Modell korrelierte ebenfalls gut mit den Ergebnissen des an der Universität von Wisconsin (USA) entwickelten TEXAS-Codes (MORIYAMA et al., 2002).

Aus der vorhergehenden Untersuchungen geht hervor, dass die genannten Modelle zur Beschreibung der Vorvermischung teilweise gut mit experimentell ermittelten Ergebnissen übereinstimmen. Dabei muss bedacht werden, dass in den Versuchen festgelegte und kontrollierte Rahmenbedingungen vorlagen (Ausgangsdruck, Betriebstemperatur etc.) und weitere Einflussfaktoren von außen

ausgeschlossen wurden. Dies ist in der Praxis – insbesondere während Betriebsstörungen – nicht der Fall. Deshalb kann der Ablauf der Vorvermischung insbesondere beim ungewollten Kontakt von Schmelze und Wasser nach wie vor für die Praxis nur bedingt vorausberechnet werden.

4.3 Vertiefende Untersuchungen zum Vorgang der Auslösung und Fortpflanzung von physikalischen Explosionen

Bei der vertiefenden Betrachtung der Auslösung einer physikalischen Explosion durch den Zusammenbruch des Dampffilms zwischen Wasser und Schmelze wird aufbauend auf die Untersuchungen zur Vorvermischung zwischen:

1. spontaner Explosion und
2. ausgelöster (getriggert) Explosion

unterschieden.

1. Bei der spontanen Explosion erfolgt ein Zusammenbruch des Dampffilms um den Tropfen der heißen Phase, weil die Oberflächentemperatur der Schmelzefragmente unter die Mindesttemperatur des Filmsiedens fällt. Dies kommt häufig bei Systemen mit Schmelzen mit geringeren Schmelztemperaturen (z. B. Zinn und Wasser) oder bei Systemen mit flüssigen Gasen, bei denen durch das Verflüchtigen einiger Bestandteile im Gasmisch sich die Mindesttemperatur ändert und deshalb unterschritten wird, vor.
2. Bei der ausgelösten Explosion führt ein externer Triggerimpuls zum Filmzusammenbruch. Dieser Impuls wird z. B. ausgelöst durch einen Druckstoß, bedingt durch die Strömung des Wassers oder durch lokale Einschlüsse von Kühlwasser in der Schmelze oder zwischen Ofenwand und Schmelze.

Die ersten Modelle, die zur Beschreibung des Mechanismus aufgestellt wurden, gingen von eindimensionalen stark idealisierten Systemen aus. Diese Modelle waren bisher noch nicht geeignet, Methoden zu entwickeln, um den Filmzusammenbruch sicher auszuschließen (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997).

Die experimentellen Untersuchungen reichen von einfachen Experimenten, bei denen ein Tropfen heißer Schmelze in einen Behälter mit Wasser fällt, bis hin zu integralen Experimenten, bei denen 5-25 kg heiße Schmelze in einen Behälter mit Wasser gegeben werden. Bei den Versuchen, in denen es nicht zur spontanen Explosion kam, wurde der externe Triggerimpuls über Druckstöße in der Größenordnung von 0,1-3 MPa aufgebracht und die Explosion ausgelöst. In diesen zahlreichen Versuchsreihen wurde u. a. Folgendes herausgefunden (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997):

- Die Explosion kann beim direkten Eintreten der Schmelze in Wasser, beim Durchlaufen der Schmelze im Wasserbehälter oberhalb des Bodens des Behälters und auch nach der Ansammlung der Schmelze auf dem Behälterboden stattfinden.
- Die Auslösung einer spontanen Explosion wird erschwert, wenn der Anfangsdruck um ca. 0,5-1,5 MPa erhöht wird.

- Das Eintreten einer Explosion ist bei stark unterkühltem Wasser bedeutend wahrscheinlicher als bei gesättigten Bedingungen.
- Eine vorher dispergierte Schmelze scheint dagegen dem Auslösen einer Explosion entgegenzuwirken.
- Eine Verfestigung der Schmelze während des Wasser-Schmelze-Kontaktes erschwert eine Auslösung der Explosion.

SAITO und SAITO (1999) untersuchten in zwei Versuchsreihen die Auslösung von physikalischen Explosionen ohne eine vorherige Filmverdampfung. Dazu wurde die Temperaturabhängigkeit der Bewegung zwischen den Fluiden und das Verhalten von Wasser, Dampf und Schmelze in einer Verdrängungsbox beobachtet. In zwei Versuchapparaturen (siehe Abb. 4.5) wurde zum einen das Verhalten von Lötzinn, Zinn, Blei und Zink im Wassertank über eine Kamera beobachtet und eine Druckmessung vorgenommen sowie zum anderen eine „künstliche“ Verdrängung über eine Kanüle, durch die Wasser direkt in die Schmelze eingebracht wurde, simuliert und als Möglichkeit zu einer Auslösung einer Explosion geprüft. Wie auch schon in den vorhergehenden Versuchen, stellten die Autoren in Abhängigkeit zur Temperatur der Schmelze und der Wassertemperatur einen Bereich fest, in dem in ihren Versuchen eine Auslösung der Explosion aufgrund eines Dampfblasenkollapses durch Kondensation möglich war (SAITO und SAITO, 1999).

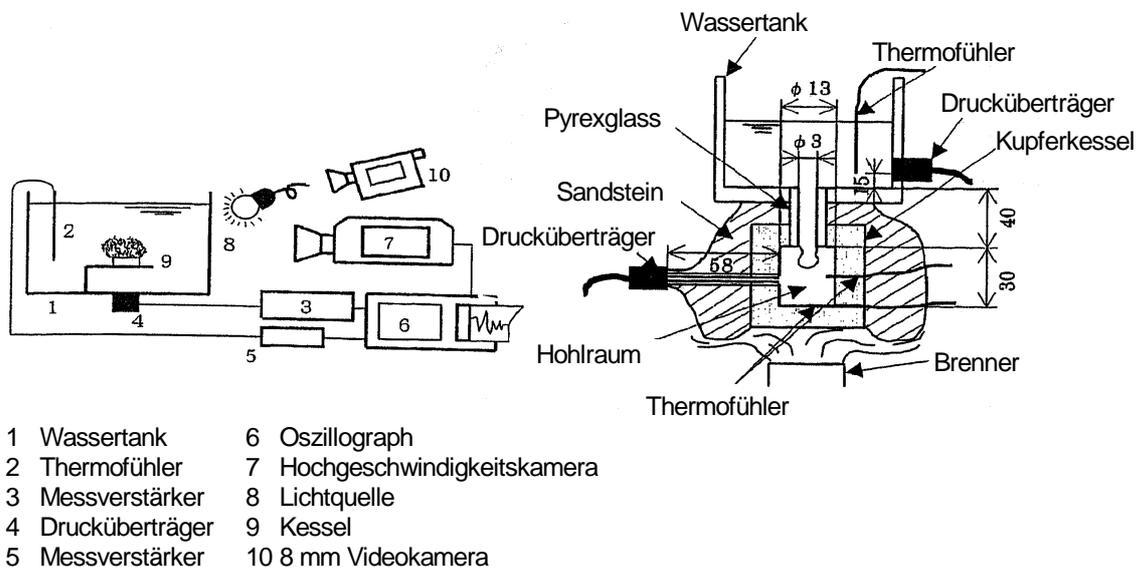


Abb. 4.5 Versuchsaapparaturen zu den Versuchsreihen 1 und 2 (SAITO und SAITO, 1999)

Die Sandia National Laboratories (SNL, Winfrith) und das Japanese Atomic Energy Research Institute (JAERI) führten unabhängig voneinander Versuche im größeren Maßstab durch, in denen Schmelzen bis zu 20 kg UO_2 in einen Tank oder Pool mit kalter Flüssigkeit flossen. Das JAERI entwickelte ihr „Interfacial disturbance model“ (siehe Abb. 4.6) dahingehend weiter, dass in die Betrachtungen zusätzlich die Effekte aufgrund von Wärmeübertragung durch Strahlung mit eingingen (MATSUMURA und NARIAI, 1997). Es wurde insbesondere festgestellt,

dass eine spontane Explosion bei einem stabilen Dampffilm schwerlich ausgelöst wird. Für die Stabilität des Dampffilms ist eine schnelle Wärmeübertragung vom Dampffilm zum Wasser verantwortlich. Dies wird maßgeblich durch ein hohes Austauschverhältnis zur Wärmeübertragung durch Strahlung (ε , stoff- und temperaturabhängig) und einen niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten von der Dampfphase zum Wasser (in deutscher Literatur α , bei MATSUMURA h , u. a. strömungsabhängig) erreicht.

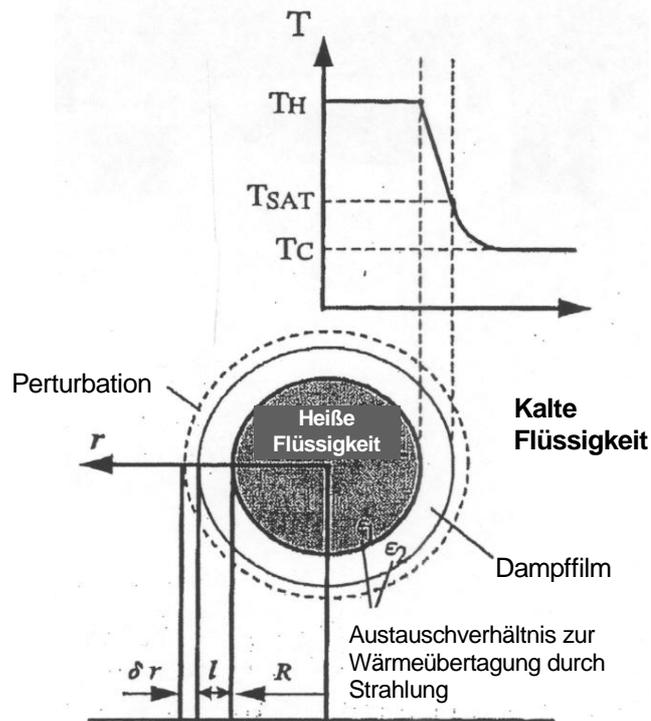


Abb. 4.6 Bildliche Darstellung zum Konzept des „Interfacial disturbance model“ (MATSUMURA und NARIAI, 1997)

ABE et al. (2002) stellten in ihren Versuchen mit Zinn, Blei, Zink und Aluminium weiterhin fest, dass nach einer Verfestigung des Schmelztropfens aufgrund einer geringen Temperatur der Dampfphase unterhalb des Kristallisationspunktes der Schmelze auch keine getriggerte Explosion stattfand.

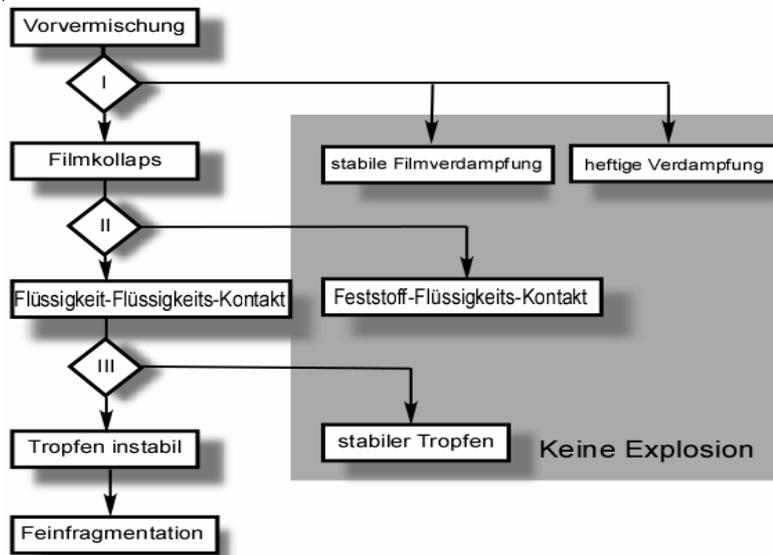


Abb. 4.7 Diagramm zum Prozess zur Auslösung einer physikalischen Explosion (ABE et al., 2002)

In dem vom IKE Stuttgart entwickelten Modell IDEMO wird davon ausgegangen, dass eine starke Wärmeübertragung von Schmelze zum Kühlmittel nur in kleinen „Mikro-Interaktions-Zonen“ stattfindet (BUCK und BÜRGER, 1997). Weiter entfernte Zonen werden nicht erhitzt (siehe Abb. 4.8). Diese Mikrozonen wachsen zeitlich mit dem Eintritt von mitgerissenem Kühlmittel. Dabei wird der Wärmetransport von Schmelze zum Kühlmittel als langsam gegenüber der Auslösung und Fortpflanzung der Explosion angesehen. Das Modell setzt weiter voraus, dass bei einer spontanen Explosion die thermischen Übertragungsvorgänge und bei einer ausgelösten Explosion die hydrodynamischen Vorgänge dominieren. Insgesamt wird von einem kohärenten Ablauf der Explosion (quasi-statischen Detonation) mit konstantem Wärmeübertragungskoeffizient ausgegangen.

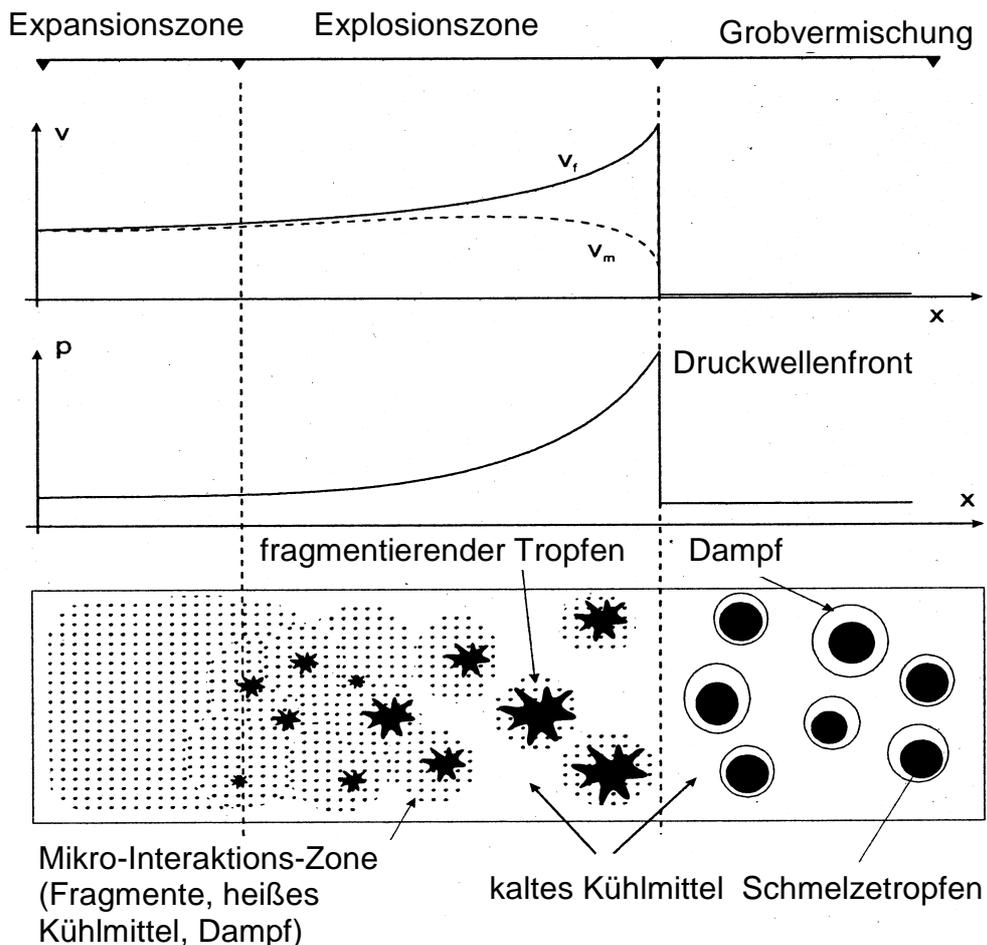


Abb. 4.8 Schematischer Ablauf einer physikalischen Explosion (BUCK und BÜRGER, 1997)

Gestützt auf die experimentellen Untersuchungen von FARO berücksichtigt das Modell, dass ein hoher Dampfgehalt durch seine Kompressibilität die Auslösung durch einen Triggerimpuls und den darauffolgenden Wärmetransport erschwert. Ein Dampfgehalt von 50-60 % im Gemisch führt zu einer merklichen Abschwächung des Aufbaus der Druckwelle. Der Aufbau der Druckwelle ist weiterhin abhängig vom Zeitpunkt des Triggerimpulses (z. B. Kontakt der Schmelzetropfen mit kalter Reaktorwand), weil der Anteil an fragmentierter Schmelze in Zonen mit geringem Dampfgehalt mit der Zeit steigt. Die Ausbreitung der Druckwelle wird in

Bereichen mit hohem Dampfgehalt abgebremst. Der angenommene Triggerimpuls liegt bei ca. 0,1 MPa. Es wird vermutet, dass, wenn der Triggerimpuls stark genug ist, die Explosion auszulösen, dessen Stärke auf den weiteren Verlauf der Explosion keinen entscheidenden Einfluss mehr nimmt. Weitere Untersuchungen zum Absichern dieser Vermutung stehen noch aus (VUJIC, 2006).

Die Modellierung zur Ermittlung der Geschwindigkeit (Hydrodynamik) der Fragmentation basiert in den meisten Veröffentlichungen auf der Weberzahl oder Bondzahl, wobei zwischen Gas-Flüssigkeit- und Flüssigkeit-Flüssigkeit-Systemen (zur Diskussion der Thermodynamik bzw. Phasenwechsel) unterschieden wurde. Die neueren mehrdimensionalen Modelle gehen davon aus, dass sich ein Teil des Kühlwassers mit der Schmelze vermischt und schnell erhitzt wird, ein anderer Teil sich langsam erwärmt und als kompressibles Medium auf den Druck Einfluss nimmt. An der Wellenfront herrscht nach diesen quasi-stationären Detonationsmodellen Strömungsgleichgewicht zwischen den Phasen und Sättigungsbedingungen bezüglich Dampfproduktion (CARACHALIOS et al., 1986).

Eine Sonderstellung nimmt die physikalische Explosion bei geschichteten Phasen ein, bei denen nur ein kleiner Anteil der einen Phase in die andere dringt. Hierzu wurden Versuche mit Freon-12 und Wasser sowie mit Lava und Wasser gefahren (FLETCHER und THEOPHANOUS, 1997). In den Versuchen, in denen die Phasen heiße Flüssigkeit, Dampffilm und Wasser überwiegend als Schicht vorlagen, traten nach der Auslösung einer explosionsartigen Verdampfung nur kleine Drücke mit geringer Fortpflanzungsgeschwindigkeit auf.

4.4 Untersuchungen zur Überlagerung einer physikalischen Explosion mit einer chemischen Reaktion

Die Überlagerung einer physikalischen Explosion mit einer chemischen Reaktion ($2 \text{ Al} + 3 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{ H}_2$) wurde bisher insbesondere bei Aluminium/Wasser-Systemen beobachtet, könnte aber auch bei Materialien in Kernreaktoren von Bedeutung sein.

In den Modellen hierzu wurde bisher davon ausgegangen, dass

- diese chemische Reaktion die Anwesenheit von Dampf voraussetzt;
- eine oxidierte Schmelzoberfläche die Diffusion von Sauerstoff und somit die Oxidation des Aluminiums begrenzt;
- eine Diffusion des Wasserdampfes und Verdrängung des Wasserstoffes an der Schmelzoberfläche eine Voraussetzung zur fortlaufenden Oxidation ist (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997).

Bei den experimentellen Untersuchungen von FLETCHER und THEOFANOUS (1997) mit Aluminiumschmelzen kam es

- bei unter 1400 °C Schmelztemperatur zu Fragmenten mit hoher Oberfläche, aber zu keiner chemischen Reaktion;
- bei 1400-1600 °C zu 10-40 % oxidierten Fragmenten (der Rest unoxidierte Metallfragmente) in einer Größe von 100-1000 µm;

- bei über 1600 °C zu feinen vollständig oxidierten Fragmenten in der Größe von 1-10 μm .

Die experimentell ermittelten Ergebnisse zur Wasserstoffbildung sind noch unsicher und bedürfen weiterer Untersuchungen bezüglich ihrer Reproduzierbarkeit und zur Validierung der aufgestellten Rechenmodelle (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997; MAGALLON et al., 2005).

4.5 Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den Wärmeübertragungsvorgängen und Druckwellen

Nicht wenige Untersuchungen galten dem Zusammenhang zwischen den Wärmeübertragungsvorgängen und dem Druckverlauf während einer physikalischen Explosion, die entscheidend sind für Energiefreisetzung und Zerstörungswirkung. In seinen Untersuchungen konnte Fröhlich die freiwerdende mechanische Energie über eine Energiebilanz abschätzen und so den Maximaldruck bei einer physikalischen Explosion berechnen (FRÖHLICH, 1978). Diese Werte lagen über den experimentell gemessenen Werten.

Abb. 4.9 stellt den Verlauf der Druckwelle zu einem inkohärenten instationären Ablauf über eine Strecke z während einer physikalischen Explosion dar. Es wird ersichtlich, dass beim Übergang von der Vor- zur Feinfragmentationszone der Druck sprunghaft ansteigt, auf die weiteren Teile des Systems übergreift und nach der Feinfragmentation wieder absinkt.

Dabei können – je nach Art und Masse an fragmentierender Schmelze – Drücke von mehreren hundert MPa entstehen.

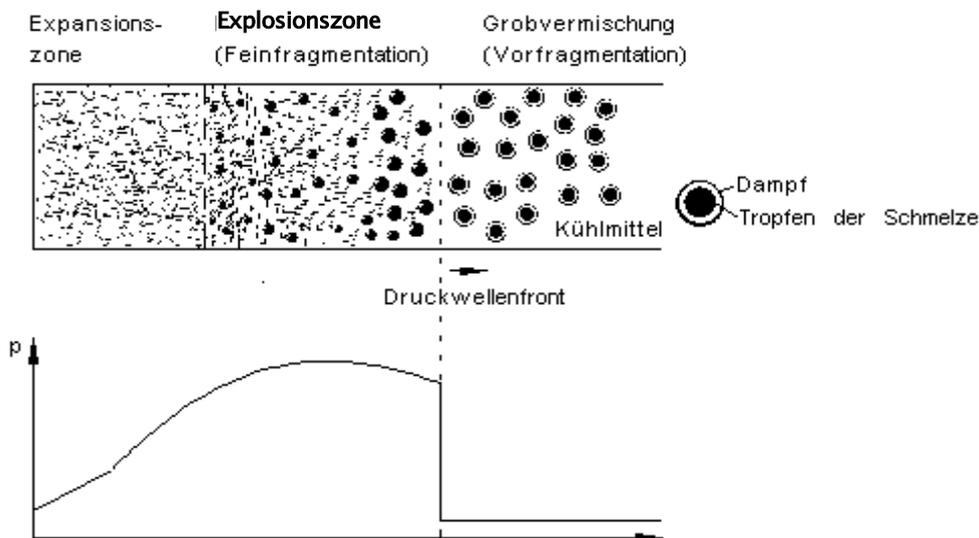


Abb. 4.9 Druckverlauf während einer physikalischen Explosion (FRÖHLICH, 1978)

SHOJI und TAKAGI (1986) ermittelten in ihren Versuchen mit der gleichen Medienkombination den Zusammenhang zwischen der Wassertemperatur T_1 , der Zinntemperatur T_i und dem Maximaldruck p_e (mit p_0 als Umgebungsdruck) während einer physikalischen Explosion. Diese Versuche wurden mit Schmelzemas-

sen im Grammbereich durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind nicht auf Ereignisse mit größeren Schmelzemassen übertragbar (BERTHOUD, 2000).

4.6 Untersuchungen zu den Wärmeübertragungsvorgängen und Druckwellen speziell im Rahmen der Reaktorsicherheit in Kernkraftwerken

Physikalische Explosionen können im Zusammenhang mit einem Kernschmelzeunfall in Kernkraftwerken ein ernstes Problem darstellen. Es handelt sich in diesem Fall teilweise auch um einen erwünschten Kontakt zwischen Kühlwasser und Kernschmelze, der zur Abkühlung und Verfestigung der Schmelze als Maßnahme zur Begrenzung der Störfallauswirkungen dient. Deshalb wurden mit sehr großem Aufwand entsprechende Untersuchungen durchgeführt.

WITTE und COX (1973) stellten dazu weitere thermodynamische Modelle mehrerer Wissenschaftler vor, die zusätzlich die Oberfläche des Tropfens des heißen Mediums mit einbeziehen.

PEEHS et al. (1986) erarbeiteten das KODEX-Modell als ein weiteres Rechenmodell zur Abschätzung der Auswirkungen einer physikalischen Explosion in Kernkraftwerken. Dieses Modell berücksichtigte bereits die Einbauten des Reaktordruckbehälters. Die offenen Parameter werden aus den Experimenten FITS und EXOFITS der Firma SANDIA (USA) modellangepasst übernommen. Zur Beschreibung der fluidmechanischen Vorgänge wird das Modell PISCES herangezogen.

In der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH wurde im Rahmen der Kernreaktorsicherheit die „Beanspruchung des Reaktordruckbehälters bei einer physikalischen Explosion“ (BERDA I, II, und III) untersucht (KRIEG und MESSEMER, 1998). Dazu wurde in einem Testreaktor heiße Schmelze (Größenordnung 80 t) beschleunigt und auf den Deckel des Reaktors prallen gelassen. In Abhängigkeit von der Temperatur und der Geschwindigkeit der Schmelze bzw. der daraus resultierenden Druckstöße wurden darauf die Spannungen, Dehnungen, Verformungen und Risse aufgezeichnet. Das Forschungszentrum stellte u. a. fest, dass

- die Schmelze eine um den Faktor 3-4 kleineren Kraftstoß und dadurch eine entsprechend geringere Beanspruchung ausübt als vergleichbare Masse an Feststoff mit gleicher Geschwindigkeit;
- mit den üblichen inneren Aufbauten die Belastung für den Deckel erheblich gemindert werden können und
- der Reaktor kinetischen Belastungen von 0,1 GJ ohne Einbauten und von 0,8 GJ mit Einbauten standhält.

THEOFANOUS et al. (1999) führten Analysen zur Integrität von Kernreaktoren des Typs AP600 unter der Belastung von möglichen physikalischen Explosionen innerhalb des Reaktors durch. Hierzu verwendeten sie die Risiko orientierte Unfallanalysenmethode ROAAM und die umfassenden Erkenntnisse aus allen relevanten bzw. bekannt gewordenen Unfallszenarien. Ihre Analysen ergaben, dass unter den gegebenen Voraussetzungen die Annahme eines Versagens des Reaktors physikalisch unvernünftig (unreasonable) ist (THEOFANOUS et al., 1999).

CHERDRON et al. (2005) führten in ihrer Versuchsreihe „Energy Conversion experiments (ECO experiments)“ Messungen von Druckverläufen von getriggerten physikalischen Explosionen durch. Dabei wurde bis zu 18 kg und 2600 K heiße Al_2O_3 -Schmelze in einen Wassertank gegeben. Dies entsprach einer Kapazität an thermischer Energie von 50 kg und 2900 K heiße Kernschmelze. In den Versuchen konnten bis zu 100 MPa Drücke und eine maximale Energieumwandlung von 3 % durch Deformation von sogenannten „Crushing material“ (mehrere Lagen aus Stahlplatten) bei einer Explosion erzeugt bzw. festgestellt werden.

Weiter wurden die Ergebnisse mit dem vorher aufgestellten fluid-dynamischen mehrdimensionalen Modell zur Energieumwandlung bei physikalischen Explosionen MATTINA verglichen und eine gute Übereinstimmung festgestellt (siehe Abb. 4.10).

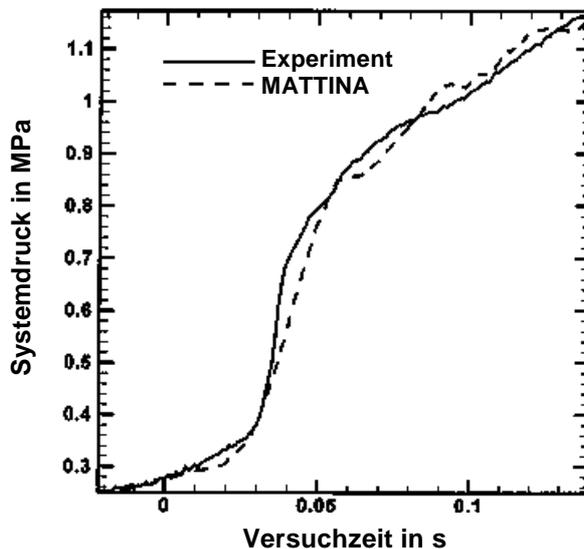


Abb. 4.10 Vergleich von gemessenen und errechneten Druckverläufen während einer physikalischen Explosion (CHERDRON et al., 2005)

Von der OECD wurde im Januar 2002 das Programm SERENA (Steam Explosion Resolution for Nuclear Application) gestartet, an dem weltweit 13 Institutionen maßgeblich beteiligt sind. Dieses Programm dient dazu, die Experten weltweit zusammenzubringen und einen Konsens zur Beschreibung von physikalischen Explosionen im Rahmen der Reaktorsicherheit zu erzielen. In der ersten Phase dieses Programms sollten die Unsicherheiten der bestehenden Rechenmodelle zur Beschreibung der Abläufe einer physikalischen Explosion identifiziert und in der zweiten Phase die Modelle zur Behebung der Unsicherheiten weiterentwickelt werden. In die Betrachtung gingen z. B. die Modelle MATTINA (Karlsruhe), IKEMIX und IDEMO (Stuttgart), MC3D (Frankreich IRSN-CEA) und ESE-2 (University of Ljubljana, Slovenien) ein. Dazu wurden die experimentellen Daten aus den Projekten u. a. FARO, KROTOS und TROI (Test for Real Corium Interaction with Water, Korea) als besonders geeignet, um realistische Bedingungen während eines Kernschmelzeunfalls wiederzugeben, herangezogen (MAGALLON et al., 2005; MEYER et al., 2005).

Untersucht wurden der Ablauf von physikalischen Explosionen innerhalb und außerhalb eines Reaktorbehälters und außerhalb des Reaktorbehälters (siehe Abb. 4.11).

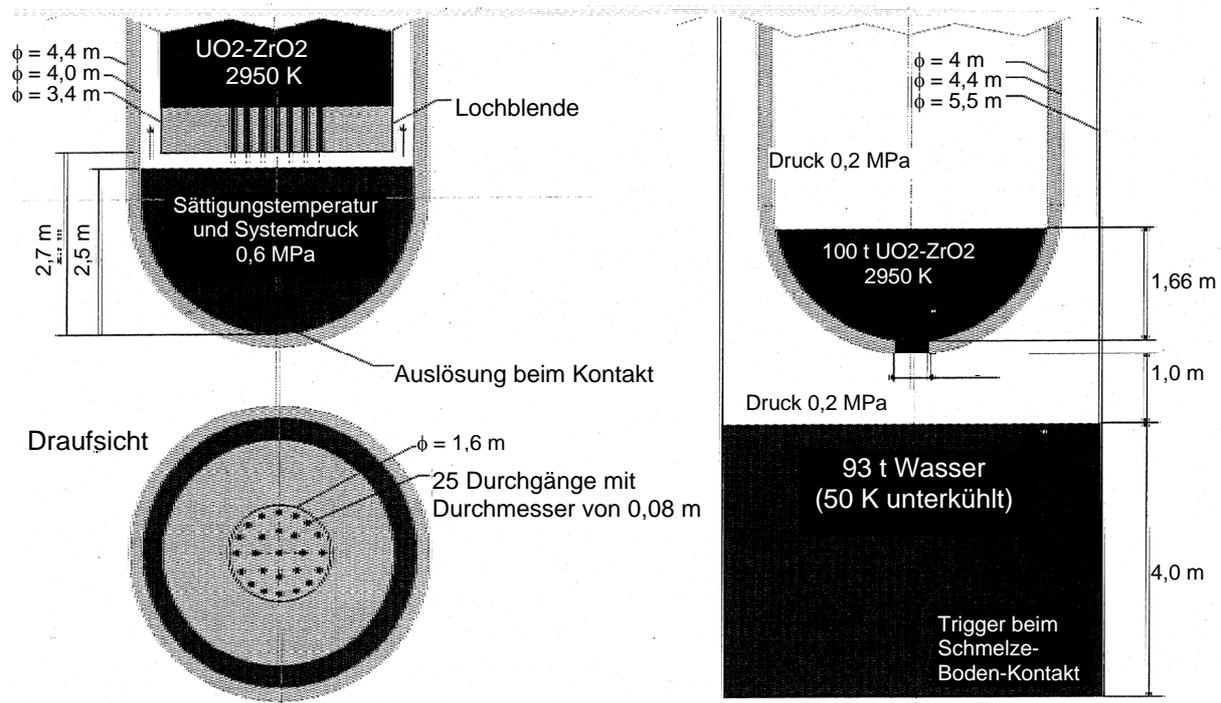


Abb. 4.11 Physikalische Explosion innerhalb und außerhalb eines Behälters (MAGALLON et al., 2005)

Dabei wurde in Anlehnung an die untersuchten bzw. möglichen Kernreaktorunfälle davon ausgegangen, dass die Kernschmelze bei einer Explosion innerhalb des Reaktorbehälters als ein Strahlbündel in die Wasserphase und bei einer Explosion außerhalb des Reaktorbehälters als einzelner Strahl in den mit Wasser gefluteten Auffangraum eintritt. Es wurde festgestellt, dass keines der untersuchten Modelle alle Einflüsse der physikalischen Explosion gleich optimal berücksichtigt (MAGALLON, 2003). Als Unsicherheiten zwischen den Modellen und den experimentellen Ergebnissen wurden z. B. die Dampfbildung, die Einflüsse von Wassertropfen in der Dampfphase und die Krustenbildung der Schmelzefragmente identifiziert. In die Untersuchungen gingen die Einflüsse zur Druckentlastung bedingt durch die Ableitung der Dampfphase („venting“) ein. Während die erste Phase von SERENA abgeschlossen ist, dauern die Untersuchungen der zweiten Phase an (MAGALLON et al., 2005).

Im April 2004 wurde im Rahmen des 6. Forschungsprogrammes der Europäischen Union das „Severe Accident Research Network of Excellence“ (SARNET), dem 49 europaweite Organisationen angehören, gegründet, um die Forschung im Bereich schwerer Kernreaktorunfälle abzustimmen. In diese Abstimmung floss auch die letzte Versuchsreihe von ECO ein (MEYER et al., 2005).

5 Gesetzliche Vorschriften und technische Regeln

Physikalische Explosionen gehören nach § 7 Abs. 2 Satz 5 Gefahrstoffverordnung („Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, die nicht gekennzeichnet sind“) zu den stofflichen Gefährdungen und nach § 3 Abs. 1 Satz 2 Betriebssicherheitsverordnung zu den Gefährdungen durch die Wechselwirkung von Arbeitsmitteln mit Arbeitsstoffen, die im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung nach dem Arbeitsschutzgesetz berücksichtigt werden müssen. In der Technischen Regel für Betriebssicherheit „Gefährdungen durch Wechselwirkung“ (TRBS 2210) werden unter Nr. 4.2.3 beispielhaft Schutzmaßnahmen gegen physikalische Explosionen aufgeführt. In dem Handlungsleitfaden der Arbeitsschutzverwaltung NRW „Gefährdungsbeurteilung am Arbeitsplatz“ werden „Thermische/physikalische Explosionen“ in der Checkliste zu Gefährdungsfaktoren unter der Rubrik „Brand- und Explosionsgefährdung“ genannt. Anhand dieser Liste sollen die vermuteten Gefährdungsfaktoren ausgewählt werden, auf dessen Basis dann eine abschließende Überprüfung bzw. Beurteilung am Arbeitsplatz durchgeführt wird (Gefährdungsbeurteilung am Arbeitsplatz – Ein Handlungsleitfaden der Arbeitsschutzverwaltung NRW, 2004).

Betriebe, in denen physikalische Explosionen vorkommen können, fallen nur unter die Störfall-Verordnung (Störfall-Betriebe), wenn in deren Betriebsbereichen Stoffe in bestimmten Mengen vorhanden sein oder entstehen können, die im Anhang I der Verordnung aufgeführt sind oder die dort festgelegten Kriterien erfüllen (gefährliche Stoffe im Sinne von § 2 Nr. 1 Störfall-Verordnung). Die Gefährdungen durch eine mögliche physikalische Explosion müssen nur dann im Sicherheitskonzept bzw. im Sicherheitsbericht berücksichtigt werden, soweit sie für die Verhinderung von Störfällen oder deren Begrenzung relevant sein können. Ereignisse mit physikalischen Explosionen in Betrieben, die unter die Störfall-Verordnung fallen, sind u. a. dann meldepflichtig, wenn ein gefährlicher Stoff die unmittelbare Ursache bestimmter Unfallfolgen ist. Bisher liegen keine Meldungen zu physikalischen Explosionen nach Störfall-Verordnung vor. Die Gefährdungen durch diese Explosionen sind aber in der chemischen Industrie, die den Hauptanteil an Störfall-Betrieben in Deutschland darstellt, bekannt und werden von Jennings beschrieben (JENNINGS, 1974).

Darüber hinaus sind viele Anlagen wie Hüttenwerke nach der 4. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV) genehmigungsbedürftig und müssen die Erfüllung der Vorgaben zur Anlagensicherheit nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und der 9. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Verordnung über das Genehmigungsverfahren - 9. BImSchV) im Genehmigungsantrag nachweisen.

Die Unfallverhütungsvorschrift VBG 32 „Gießereien“, in der die Trockenhaltung von Arbeitsmitteln, auf die Eisen, Metall oder Schlacke im flüssigen Zustand gelangen können, gefordert wird, wurde 2004 außer Kraft gesetzt. Dafür enthält nach wie vor die BGI 549 „Sicherheitslehrbrief für Gießereiarbeiter“ Anforderungen zur

Trockenhaltung von Stellen (einschließlich Gießlöffel, Kokillen und andere Dauerformen), auf die diese heißen Medien betriebsmäßig gelangen können.
Die Unfallverhütungsvorschrift BGV C 19 „Metallhütten“ behandelt das Problem ähnlich mit:

„§ 31 Ausrüstung, Einsatzmaterial und Arbeitsplätze

(4) Unternehmer und Versicherte haben Stellen, auf die Metall oder Schlacke in flüssigem Zustand gelangen können, trocken zu halten.“

und

„§ 32 Einsatz von Pfannen für den Transport feuerflüssiger Massen

(1) Die Versicherten haben sich davon zu überzeugen, dass Gieß-, Transport- und Schlackenpfannen vor ihrem Einsatz trocken sind.“

sowie

„§ 35 Angießen von Stranggießanlagen

Versicherte dürfen Stranggießanlagen erst angießen, wenn sichergestellt ist, dass

1. sich kein Wasser auf dem Anfahrkopf befindet ...“

Um einen Kontakt oder zumindest eine Grobvermischung von heißer Schmelze und Wasser oder den Einschluss von Wasser in heißer Schmelze zu vermeiden, wird in der Unfallverhütungsvorschrift BGV C 17 „Stahlwerke“ verlangt:

- „§ 15 Einsatzmulden: In Einsatzmulden müssen Bodenöffnungen zum Abfluss von Wasser vorhanden sein“.
- „§ 32 Kippen und Kühlen flüssiger Schlacke
 - (1) Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, dass flüssige Schlacke nur auf trockenem Untergrund verkippt wird.
 - (2) Versicherte dürfen flüssige Schlacke nur auf trockenem Untergrund verkippen.
 - (3) Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, dass flüssige Schlacke, die mit Wasser gekühlt werden soll, zuvor ausgebreitet wird.
 - (4) Versicherte dürfen flüssige Schlacke nur mit Wasser kühlen, nachdem diese zuvor flach ausgebreitet wurde. Sie haben das Kühlwasser zu versprühen.“
- „§ 34 Transport feuerflüssiger Massen in Pfannen
 - (5) Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, dass Schlackepfannen und -kübel nicht mit flüssiger Schlacke gefüllt werden, wenn sich in ihnen Stoffe befinden, die bei oder nach dem Befüllen Gase oder Dämpfe entwickeln ...“
- „§ 35 Einsatz von feuerfestem Material
 - (1) Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, dass feuerfestes Material beim Einsatz trocken ist.“

Der Verein deutscher Gießereifachleute (VDG) fordert in seinem VDG-Merkblatt „Ausführungen von Notauffanggruben“ (S 80) eine Drainage für diese Gruben, die zur Aufnahme von Schmelze beim unkontrollierten Austreten aus Schmelz- und Warmhalteöfen für Eisengusswerkstoffe dienen. Durch diese Drainage sollen Flüssigkeiten wie z. B. Wasser und Hydrauliköl abfließen, aber Schmelzen nicht nachfließen können und Dampf gefahrlos abgeleitet werden. Die physikalische

Explosion wird als Gefährdung konkret angesprochen und es werden genaue Anforderungen an die Durchlässigkeit des Drainagematerials gestellt sowie zusätzlich eine regelmäßige Prüfung des Drainagesystems von Notauffanggruben gefordert. Entsprechend der Wichtigkeit von Notauffanggruben wird weiter verlangt, dass diese Gruben „ausschließlich von sachkundigen Firmen oder – wenn vorhanden – von der werkseigenen sachkundigen Fachabteilung zu installieren“ sind.

Der Vollständigkeit halber wird RSK-Leitlinie für Druckwasserreaktoren des Kerntechnischen Ausschusses, die eine druckfeste Bauweise des Reaktor- und des Sicherheitsbehälters auch gegenüber Dampfdrücken im Störfall fordert, genannt.

6 Schutzmaßnahmen

Die beschriebenen Untersuchungen zeigten, dass keine genauen Auslösebedingungen einer physikalischen Explosion festgelegt werden können. Sobald die Temperatur der heißen Flüssigkeit (in der Regel eine Schmelze) über dem Siedepunkt der kalten (in der Regel Wasser) liegt, muss mit solchen Explosionen gerechnet werden. Der auftretende Maximaldruck in der Stoßwelle kann dagegen abgeschätzt werden.

Deshalb werden in der Literatur zwei Strategien für Schutzmaßnahmen empfohlen:

1. Vermeidung des Kontaktes zwischen kalter und heißer Flüssigkeit und
2. Schutz vor den Auswirkungen einer physikalischen Explosion.

In den Gießereien und Metallhüttenbetrieben wird bezüglich der ersten Schutzstrategie schon seit langer Zeit folgendes praktiziert (OTTO, 1969):

- Masseln, Kokillen und Altmittel trocken.
- Bei Druckabfall im Kühlwasserkreislauf sollte eine automatische Schnellschlussschaltung aktiviert werden. Der Gießvorgang ist dann abubrechen.
- Gießtische trocken halten.

Speziell für Dampfkessel mit einer Schmelzfeuerung kommen folgende Maßnahmen zum Einsatz (JAERSCHKY und HENGSTLER, 1989; MAISCHAK und FEIGE, 1970):

- Ansammlungen von Asche vermeiden,
- das Kühlsystem mit Schnellschlussschaltung ausrüsten und
- die Schmelzkammer mit Video überwachen.

In der chemischen Industrie können eventuell in Ausnahmefällen durch Verfahrensänderungen die Auslösebedingungen vermieden werden, indem die Temperatur der heißen Flüssigkeit unterhalb der Siedetemperatur der kalten Flüssigkeit gehalten wird.

Bezüglich der zweiten Schutzstrategie werden Schutzschirme, Schutzkabinen und Schutzdächer sowie eine druckfeste Bauweise von Reaktoren (Kerntechnik) als Schutz für die Beschäftigten im Betrieb empfohlen. Für deren Auslegung sind die Rechenmodelle zur Abschätzung der Druckwelle und des Druckstoßes durch die heiße Schmelze von Bedeutung.

Bei der Granulierung wird eine Fragmentation der Schmelze durch den Kontakt von heißer Schmelze und Kühlmittel (Wasser) erwünscht. Um eine Explosion z. B. in einem in Pietersburg (USA) entwickelten Granulator für Siliconmetall zu vermeiden, sorgen eine Mindestfließgeschwindigkeit und eine limitierte Temperatur des Wassers im Granulator für eine schnelle Abkühlung der Schmelze. Dies verhindert eine Ablagerung von flüssiger Schmelze auf dem Boden des Granulators und so-

mit dem Einschluss von Wasser innerhalb der Schmelze. Die Zugabe der Schmelze ist über den Wasserstrom und die Wassertemperatur verriegelt. Als zusätzliche Maßnahmen zum Schutz gegen die Druckwelle dienen die Seitenwände des Granulatortanks mit Entlastungseinrichtungen und eine Schutzkabine mit einer Sicherheitsverglasung zur Einhausung des Steuerstandes (STRYDOM et al., 1996).

Ebenso ist bei der Abkühlung durch Ablöschung von flüssiger Schlacke der direkte Kontakt mit Wasser erwünscht. In Metallhütten wird zur Verhinderung der Vorvermischung und des Einschlusses von Wasser dazu die Schlacke an einer trockenen Stelle großflächig ausgebreitet und mit Wasser besprüht.

Aus den praktischen Erfahrungen heraus wurden Schutzmaßnahmen zur Verminderung der Eintrittswahrscheinlichkeit von physikalischen Explosionen durch Stabilisierung des Dampffilms ermittelt, ohne die eigentlichen Vorgänge während der Auslösung einer physikalischen Explosion näher zu betrachten:

- Auskleiden des Behälterbodens mit einem Fettfilm oder
- Erhöhung der Viskosität des Wassers durch Zugaben wie z. B. Celluloseverbindungen.

Die Wirkung dieser Maßnahmen ist wissenschaftlich nicht nachgewiesen (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997).

Der VDG fordert in seiner Leitlinie S 80 (siehe Kapitel 5) für Notauffanggruben eine Drainageschicht, die eine Ableitung von Wasser und Dampf ermöglicht – ohne dass Schmelzen in die Poren nachfließen können. Um hierzu geeignete Materialien zu ermitteln, wurden an der Universität in Wien verschiedene Drainagebaustoffe (z. B. Formsand) anhand von Prüfkörpern mit verschiedenen Porengrößen auf ihre Penetration (Eindringen von Metallschmelze), ihre Gasdurchlässigkeit und ihre Ableitung von Wasser hin untersucht (HASSE et al., 2003; HASSE und ANNAU, 2003). Anschließend wurde eine Eignungsprüfung für Porenbaustoffe als Drainagematerial in Notauffanggruben erarbeitet. Danach gilt ein Porenbaustoff als geprüft und für Notauffanggruben geeignet, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Die Feuerfestigkeit muss ausreichend gegenüber dem Flüssigmetall sein.
- Die Porosität muss mindestens 35 % (Verhältnis Porenvolumen zur Dichte) betragen.
- Die Eindringtiefe von Flüssigmetall darf maximal 2 mm erreichen.
- Die Kornstruktur bzw. die einzelnen Körner dürfen (von der Schmelze) nicht umspült werden (Einschließen von Wassertropfen in Sacklöchern).
- Die Sinterschicht (chemische Reaktion des Porenbaustoffes mit der Metallschmelze) muss geringer als 1 cm sein (Vermeiden der Verstopfung der Poren des Porenbaustoffes, um einen ausreichenden Wasser- und Wasserdampfabfluss zu ermöglichen).
- Das Wasser muss unterhalb der beaufschlagten Zone normal abrinnen.

7 Zusammenfassung

Gegenstand des Berichtes sind physikalische Explosionen als schnellablaufende Verdampfungen, wenn heiße Schmelze und Kühlmittel in Kontakt kommen.

Der Ausgangspunkt sind mehrere Unfälle insbesondere in Hütten- und Stahlwerken als Folge dieser Explosionen, bei denen Beschäftigte getötet oder schwer verletzt wurden. Die diskutierten Ereignisse in diesen Werken hatten somit erhebliche Auswirkungen auf die Beschäftigten, aber nur in einem Fall Auswirkungen auf die Umwelt, weil nur in einem vorliegenden Ereignis die in die Luft gewirbelten Teile der Anlage über die Grenzen des Betriebsgeländes hinaus gerieten (Trümmerwurf in die Gärten der Anwohner). Die Wirkung der Druckwellen und der herausgeschleuderten Schmelzen blieb dagegen auf das Betriebsgelände begrenzt. Daraus geht hervor, dass es sich vorrangig – abgesehen von der Kerntechnik – um ein Arbeitsschutzproblem handelt.

Die Schwere der Unfälle führte zu umfangreichen Untersuchungen zu den Auslösebedingungen dieser Explosionen, der Ausbreitung der Druckwellen sowie zur Beschreibung der Phasen dieser Explosionen: Vorvermischung, Auslösung, Feinfragmentation. Die ersten Versuche wurden mit kleinen Mengen an Schmelze (Single Drop Experiments) zur Ermittlung der Auslösebedingungen durchgeführt. Die nachfolgenden Untersuchungen erfolgten überwiegend im Rahmen der Sicherheit von Kernreaktoren mit Schmelzmassen im Kilogramm- und Tonnenbereich. Es wurde erkannt, dass die Vorvermischungsphase einen entscheidenden Einfluss auf den Druck- und Temperaturverlauf der nachfolgenden Phasen der Explosion besitzt. Weil die Vorvermischung von größeren Schmelzmassen sich stark von der Vorvermischung von kleinen Massen unterscheidet, lassen sich die Ergebnisse der „Single Drop Experiments“ nicht auf größere Maßstäbe übertragen. Aus den Ausführungen geht weiterhin hervor, dass Ursachen und Abläufe von physikalischen Explosionen weitgehend bekannt sind. Die genauen Auslösebedingungen mit konkreten Aussagen zur Eintrittswahrscheinlichkeit einer physikalischen Explosion lassen sich aufgrund der vielen Einflussparameter schwer bestimmen. Zur Berechnung des Druckverlaufes und der Wärmeübertragung wurden mehrere Modelle entwickelt. Die letzten Unsicherheiten bei der Berechnung der Vorgänge sollen durch das OECD-Projekt SERENA ausgeräumt werden. Die Unsicherheiten liegen insbesondere in der Dampfbildung und den Wärmeübertragungsvorgängen während einer Explosion vor.

Die Gefährdungen, bedingt durch physikalische Explosionen, müssen im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung nach dem Arbeitsschutzgesetz und nach den das Gesetz konkretisierenden Verordnungen vom Arbeitgeber betrachtet werden. In der Technischen Regel für Betriebssicherheit „Gefährdungen durch Wechselwirkungen“ (TRBS 2210) werden hierzu konkrete Schutzmaßnahmen zur Konkretisierung der Betriebssicherheitsverordnung beispielhaft aufgeführt. Einige Vorschriften und Empfehlungen der Unfallversicherungsträger nennen speziell für den Bereich Gießereien und Stahlwerke weitere Maßnahmen zur Vermeidung des Kontaktes von heißer Schmelze und Wasser sowie zur Vermeidung einer Grobvermischung zwischen Schmelze und Wasser. Beispielhaft sei die vom Verein

deutscher Gießereifachleute in dem Merkblatt „Ausführungen von Notauffanggruben“ geforderte Drainageschicht für Gruben, die zur Aufnahme von Schmelzen beim unkontrollierten Austreten aus Schmelz- und Warmhalteöfen für Eisengusswerkstoffe dienen, genannt.

Über die konsequente Trennung hochsiedender Schmelzen (z. B. Metall) von niedrigsiedenden Flüssigkeiten (z. B. Wasser) hinaus kommen Maßnahmen zur Vermeidung der Grobvermischung oder eines instabilen Dampffilms zur Anwendung. Ergänzend zu diesen primären Schutzmaßnahmen werden sekundäre Maßnahmen gegen die Auswirkungen der Druckwelle wie Schutzschirme, Schutzkabinen und Schutzdächer sowie eine druckfeste Bauweise von Reaktoren empfohlen.

Nach wie vor ist es nicht möglich, genaue Auslösebedingungen für eine physikalische Explosion zu bestimmen. Deshalb können diese Explosionen nur durch eine konsequente Trennung von heißen Schmelzen und Kühlmittel sicher verhindert werden. Ist dies nicht möglich, wie z. B. bei der gezielten Granulation oder beim störfallbedingten Austreten von Kernschmelze aus dem Reaktorsicherheitsbehälter, werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten dieser Explosionen minimiert (z. B. durch Stabilisierung des Dampffilms und schnelle Kristallisation der Schmelze während der Vorvermischung) und die Auswirkungen einer möglichen Explosion begrenzt (Minimierung der fragmentierten Schmelzemassen).

Die experimentellen Untersuchungen zu physikalischen Explosionen sind in Deutschland – bis auf wenige Nachuntersuchungen – weitgehend abgeschlossen. Weitere theoretische Überlegungen finden nahezu ausschließlich im Rahmen des Projektes SERENA statt.

8 Literatur

- Abe, Y.; Nariai, H.; Hamada, Y.:** The Trigger Mechanism of Vapor Explosion. Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 39, No. 8, 2002, 845-853.
- Anderson, R. P.; Armstrong, D. R.:** Experimental Study of Small Scale Explosions in an Aluminium-Water System. Symposium on Fuel-coolant Interactions at the 1981 Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineering. Washington, D. C. USA, Nov. 15-20, 1981, Publ. by ASME, New York, NY, USA, 1981, 31-40.
- Annunziato, A.; Addabbo, C.; Brewka W.:** The STRESA (Storage of Reactor Safety) Database. (2005) Internetseite <http://asa2.jrc.it/stresa> .
- Benz, R., Fröhlich, G.; Unger, H.:** Literaturstudie zur Dampfexplosion. Technischer Fachbericht zum Forschungsvorhaben BMFT-RS 76, Februar 1976.
- Berthoud, G.:** Vapor Explosions. Annu. Rev. Fluid Mech., No. 32, 2000, 573-611.
- BGI 549 „Sicherheitslehrbrief für Gießereiarbeiter“** 1999, Arbeitsgemeinschaft der Metall-Berufsgenossenschaft. Carl Heymanns Verlag, Luxemburger Straße 449, 50939 Köln.
- BGV C 17 „Stahlwerke“** vom 1. April 1993 in der Fassung vom 1. Januar 1997, Ausgabe 1999. Carl Heymanns Verlag, Luxemburger Straße 449, 50939 Köln.
- BGV C 19 „Metallhütten“** vom 1. Oktober 1989 in der Fassung vom 1. Januar 1997, Ausgabe 1999; Carl Heymanns Verlag, Luxemburger Straße 449, 50939 Köln.
- Buchner, K.:** Übersicht Atomkatastrophen - Sind deutsche Atomkraftwerke sicher? Ödp, Bundesgeschäftsstelle Sartoriusstraße 14, 97072 Würzburg, 2005.
- Buck, M.; Bürger, M.:** IDEMO – A Thermal Detonation Model of Vapor Explosions: Multi-Fluid Model, Constitutive Law and Verification Lines. Japanes-German Syposium on Multiphase Flow, Tokio, 25.-27. September 1997.
- Bürger, M.; Carachalios, C.; Unger, H.:** Detonation and fragmentation modeling for the description of large-scale vapor explosions. Atomkernenergie Kerntechnik, Vol. 47, Nr. 4, 1985, 238-241.
- Carachalios, C.; Bürger, M.; Unger, H.:** Untersuchungen des Trigger- und Eskalationsverhaltens von thermischen Detonationswellen mit Hilfe eines transienten Modells. Jahrestagung Kerntechnik, 21.-23. Mai 1985, München.

Carachalios, C.; Bürger, M.; Unger, H.: The Thermal Detonation Theory in Comparison with Large Scale Vapor Explosion Experiments. International annual topical meeting on thermal reactor safety. Februar 2-6, 1986, San Diego, California, USA.

Cherdron, W.; Jacobs, H.; Kaiser, A.; Schütz, W.: Measurement of Steam Explosion Loads: The ECO Experiments. The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11), Popes' Palace Conference Center, Avignon, France, Oktober 2-6, 2005.

Fletcher, D. F. und T. G. Theofanous: Recent progress in the understanding of steam explosions, J. Loss Prev. Process Ind., 1994, Volume 7, Number 6, 457-462.

Fletcher, D. F. und T. G. Theofanous: Heat Transfer and Fluid Dynamic Aspects of Explosive Melt-Water Interactions. Advances in Heat Transfer, Volume 29 (1997), 129-213.

Fröhlich, G.: Maximaldruckabschätzungen bei Wasserdampfexplosionen. Deutsche Physikalische Gesellschaft (VI) 12 (1977), Verhandlungen, Weinheim.

Fröhlich, G.: Dampfexplosionen durch Kontakt zwischen Wasser und heißen Schmelzen. Chem.-Ing.-Tech. 50 (1978) Nr. 11, 861-866.

Fröhlich, G.; Unger, H.: Investigation of Steam Explosions for Prevention of severe Accidents in Plants. Publ. by Int. Assoc. for Structural Safety & Reliability, New York, NY, USA, 1985, 597-601.

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz BImSchG) v. 26.09.2002 (BGBl. I S. 3830), zuletzt geändert am 25.06.2005 (BGBl. I S. 1865).

Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG) vom 07.08.1996 (BGBl. I S. 1246) zuletzt geändert am 30.07.2004 (BGBl. I S. 1950).

GRS (Gesellschaft für Reaktorsicherheit): Weiterentwicklung und Verifikation/Validierung von Rechenprogrammen für die Reaktorsicherheit. 30. November 2005, Internetseite: <http://www.grs.de> .

Gefährdungsbeurteilung am Arbeitsplatz – Ein Handlungsleitfaden der Arbeitsschutzverwaltung NRW. Ministerium für Wirtschaft und Arbeit des Landes Nordrhein-Westfalen (MWA), MWA 1056, 5. Auflage, 2004.

Hasse, S.; Holubetz, V.; Kromp, W.; Seidelberger, E.: Einsatz und Eignungsprüfung von Porenbaustoffen als Drainagematerial in Notauffanggruben. Teil 1: Grundlagen und theoretische Betrachtungen. Gießerei-Praxis 3 (2003), 91-98.

- Hasse, S.; Annau, G.:** Einsatz und Eignungsprüfung von Porenbaustoffen als Drainagematerial in Notauffanggruben. Teil 2: Praktische Untersuchungen und Prüfeinrichtungen. Gießerei-Praxis 4 (2003), 149-153.
- Henter, A.; Hermanns, D.:** Tödliche Arbeitsunfälle 1981 und 1982 – Statistische Analyse nach einer Erhebung der Gewerbeaufsicht. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1987 (Schriftenreihe der BAU-Forschung Fb 492).
- Henter, A.; Hermanns, D.:** Tödliche Arbeitsunfälle 1983 bis 1986 – Statistische Analyse nach einer Erhebung der Gewerbeaufsicht. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1989 (Schriftenreihe der BAU-Forschung Fb 600).
- Henter, A.; Hermanns, D.:** Tödliche Arbeitsunfälle 1987-1991, Statistische Analyse nach einer Erhebung der Gewerbeaufsicht. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1993 (Schriftenreihe der BAU-Forschung Fb 666).
- Henter, A., Hermanns, D.; Brenscheidt, F.:** Tödliche Arbeitsunfälle 1992 – Statistische Analyse nach einer Erhebung der Gewerbeaufsicht. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1994 (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Fb 707).
- Hohmann, H.; Magallon, D.; Schins, H.; Yerkess, A.:** FCI experiments in the aluminiumoxid/water system. Nuclear Engineering and Design, Volume 155, No. 1, 1995, 391-403.
- Huhtiniemi, I.; Magallon, D.; Hohmann, H.:** Results of recent KROTOS FCI tests: alumina versus corium melts. Nuclear Engineering and Design, Volume 189, No. 1, 1999, 379-389.
- Huhtiniemi, I.; Magallon, D.:** Insight into steam explosions with corium melts in KROTOS. Nuclear Engineering and Design, Volume 204, No. 1, 2001, 391-400.
- Jaerschky, K.; Hengstler, N.:** Die Explosion des Schmelzkammer-Dampferzeugers „Leiningerwerk Block 3“. VGB Kraftwerkstechnik, Heft 3, März 1989, 237-244.
- Jennings, A. G.:** The Physikal Chemistry of Safety. The Chemical Engineer, October, 1974, 637-652.
- Kato, M.; Nagasaka, H.:** COTELS Fuel Coolant Interaction Tests under Ex-Vessel Conditions. 2005, Internetseite:
http://www.nupec.or.jp/database/paper/paper_11/p11_system/R11-09-11.htm .
- Krieg, R.; Messemer, G.:** Reactor Pressure Vessel Reponse to a Postulated Internal Steam Explosion – Investigation by Model Experiments. Konferenz-Einzelbericht: ASME/PVP, Band 362, 1998, 11-18.
- Magallon, D.; Hohmann, H.:** High pressure corium melt quenching tests in FARO. Nuclear Engineering and Design, Volume 155, No. 1, 1995, 253-270.

- Magallon, D.; Hohmann, H.:** Experimental investigation of 150-kg-scale corium melt jet quenching in water. Nuclear Engineering and Design, Volume 177, No. 1, 1997, 321-337.
- Magallon, D.; Huhtiniemi, I.; Hohmann, H.:** Lessons learnt from FARO/THERMOS corium melt quenching experiments. Nuclear Engineering and Design, Volume 189, 1999, 223-238.
- Magallon, D.; Huhtiniemi, I.:** Corium melt quenching tests at low pressure and subcooled water in FARO. Nuclear Engineering and Design, Volume 204, No. 1, 2001, 369-376.
- Magallon, M.:** OECD Programme SERENA (Steam Explosion Resolution for Nuclear Applications). Work Programme and First Results. The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), 5.-9. Oktober, 2003.
- Magallon, D.; Bang, K.-H.; Basu, S.; Berthoud, G.; Bürger, M.:** Insight into the Results of International Programme SERENA on Fuel-Coolant Interaction. The 11th International International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11), Popes' Palace Conference Center, Avignon, France, Oktober 2-6, 2005.
- Maischak, K.-D.; Feige, W.:** Ursachen und Verhütung von Al-H₂O-Explosionen. Neue Hütte 11 (1970), 662-665.
- Matsumura, K.; Nariai, H.:** Self-Triggering Mechanism of Vapor Explosions for Large-Scale Experiments Involving Fuel Simulant Melt. Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 34, No. 3, 1996, 248-255.
- Meyer, L.; Wilkening, H.; Jacobs, H.; Paillere, H.:** Overview of Containment Issues and Major Experimental Activities. The first European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2005), Aix-en-Provence, 14-15 November 2005.
- Miyazaki, K.; Morimoto, K.; Yamamoto, O.:** Thermal Interaction of Water Droplet with Molten Tin. Journal of Nuclear Science and Technology, 21, Dec. 1984, 907-918.
- Moriyama, K.; Maruyama, Y.; Nakamura, H.:** A Simple Evaluation Method of the Molten Fuel Amount in a Premixing Region of Fuel-Coolant Interaction. Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 39, No. 1 (2002), 53-58.
- Otto, K. H.:** Explosionsartiger Auswurf von Aluminium aus Gießformen und Gießgruben – Unfallgefahren beim Umgang mit flüssigen Metallen. Gießerei-Praxis, Nr. 16, 1969, 279-283.

RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren, Bekanntmachung von Empfehlungen der Reaktor-Sicherheitskommission vom 1. März 1982 (Beilage zum Bundesanzeiger Nr. 69 vom 14. April 1982), letzte Änderung am 15.11.1996, Reaktor-Sicherheitskommission, RSK-Geschäftsstelle, Postfach 12 06 29, 53048 Bonn.

Rudolph, A.: Beitrag zur Betriebssicherheit von Induktionsöfen. Gießerei 75, 1988, Nr. 22, 656-657.

Saito, S.; Saito, T.: Study on Vapor Explosion Mechanism Related to Vapor Condensation. JSME International Journal, Series B, Vol. 42, No. 3, 1999, 444-450.

Schwalbe, W.: Theoretische Analyse Thermischer Schmelze-Kühlmittel-Reaktion zwischen großen Schmelzmengen und Wasser. Dissertation, Stuttgart (IKE), Februar 1982.

Shoji, M.; Takagi, N.: An Experimental Study of Small-Scale Vapour Explosions for Molten Tin Dropped Into Water. Bull-Jpn-Soc-Mech-Eng, May 1983, No. 26, (215), 791-796.

Shoji, M.; Takagi, N.: Thermal Interaction – When a Cold Volatile Liquid Droplet Impingers on a Hot Liquid Surface. Bull-Jpn-Soc-Mech-Eng, April 1986, No. 29, (250), 1183-1187.

Strydom, J. C.; Bennie J. P. W.; Kenchington, D. J.: Commercial Granulation of Silicon at Silicon Smelters, Pietersburg. Konferenz-Einzelbericht: Silicon for the Chemical Industry III, Norwegen, 18.-20. Juni 1996, 47-55.

Takamasa, T.: Fundamental Experiment on Vapor Explosion with Mass of Grains. Journal of Nuclear Science and Technology, No. 23, 1986, 695-701.

Technische Regel für Betriebssicherheit „Gefährdungen durch Wechselwirkungen“ (TRBS 2210) vom 09. September 2006 (Beilage zum Bundesanzeiger vom 9. Dezember 2006 S. 7237).

Theofanous, T. G.; Yuen, W. W.; Angelini, S.; Sienicki, J. J.; Freeman, K.; Chen, X.: Lower head integrity under steam explosion loads. Nuclear Engineering and Design 189, 1999, 7-57.

Tso, C. P.; Tien, C. I.: A Multi-Mechanism Physical Model for Vapor Explosion and its Applications to Metal-Water Systems. PCH Physicochemical Hydrodynamics, 1980, Vol. 1, No. 4, 281-295.

UVV VBG 32 „Gießereien“ vom 1. April 1979, in der Fassung vom 1. Januar 1993. Carl Heymanns Verlag, Luxemburger Straße 449, 50939 Köln.

UVV VBG 33 „Metallhütten“ vom 1. Oktober 1989, in der Fassung vom 1. Januar 1997. Carl Heymanns Verlag, Luxemburger Straße 449, 50939 Köln.

VDG–Merkblatt „Ausführungen von Notauffanggruben“ S 80, August 2007, Verein deutscher Gießereifachleute VDG, Postfach 10 51 44, 40042 Düsseldorf.

Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV) vom 23.12.2004 (BGBl. I Nr. 74, S. 3855) zuletzt geändert am 31. Dezember 2005 (BGBl. I 2005 S. 3855).

Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV) vom 27.09.2002 (BGBl. I Nr. 70), zuletzt geändert am 7. Juni 2005 (BGBl. I 2005 S. 1970).

Vierow, K.: Analytical Investigation of Effect of Fuel Composition on the Premixing Phase of a Steam Explosion. Second Japan–Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, Fukuoka, Oktober 15–18, 2000.

Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes–Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV) vom 24. Juli 1985 (BGBl. I S. 1586), zuletzt geändert am 20. Juni 2005 (BGBl. I S. 1687).

Vujic, Z.: Further Development and Verification of Steam Explosion Models – Calculations for Experiments and First Applications to Reactor Conditions. Wissenschaftliche Berichte FZKA 7155 März 2006, Erstes HGF Doktorandenseminar „Nukleare Sicherheitsforschung“, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 9.–10. März 2005.

Witte, J. E.; Cox, J. E.: Thermal Explosion Hazards. Advanced in Nuclear Science Technology 7 (1973), 329–364.

Zimanowski, B.; Lorenz, V.; Fröhlich, G.: Experiments on Phreatomagmatic Explosions with Silicate and Carbonatitic Melts. Journal of Volcanology and Geothermal Research, No. 30, 1986, 149–153.

Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes–Immissionsschutzgesetzes (Störfall–Verordnung) – 12. BImSchV – Neufassung vom 8. Juni 2005 (BGBl. I S. 1598).

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schematischer Ablauf einer physikalischen Explosion (SCHWALBE, 1982)	9
Abb. 2.2	Schematische Darstellung des Ablaufs einer physikalischen Explosion für eine mögliche Art des Kontaktes zwischen heißer Schmelze und Wasser (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997).....	10
Abb. 2.3	Schematische Darstellung der verschiedenen Kontaktarten zwischen Schmelze und Wasser (FLETCHER und THEOFANOUS, 1997).....	11
Abb. 4.1	Versuchsaufbau und Ergebnisse der Experimente von Long (WITTE und COX, 1973)	19
Abb. 4.2	Häufigkeit der physikalischen Explosionen (SHOJI und TAKAGI, 1983)	21
Abb. 4.3	Bildliche Darstellung des Auftreffvorgangs von Ethanoltröpfchen und Versuchsergebnisse zur physikalischen Explosion von Ethanol in Silikonöl (SHOJI und TAKAGI, 1986).....	22
Abb. 4.4	Versuchsapparatur zu der Testreihe von FARO (Reaktor FAT; MAGALLON und HUHTINIEMI, 2001)	24
Abb. 4.5	Versuchapparaturen zu den Versuchsreihen 1 und 2 (SAITO und SAITO, 1999).....	28
Abb. 4.6	Bildliche Darstellung zum Konzept des „Interfacial disturbance model“ (MATSUMURA und NARIAI, 1997).....	29
Abb. 4.7	Diagramm zum Prozess zur Auslösung einer physikalischen Explosion (ABE et al., 2002)	30
Abb. 4.8	Schematischer Ablauf einer physikalischen Explosion (BUCK und BÜRGER, 1997)	31
Abb. 4.9	Druckverlauf während einer physikalischen Explosion (FRÖHLICH, 1978).....	33
Abb. 4.10	Vergleich von gemessenen und errechneten Druckverläufen während einer physikalischen Explosion (CHERDRON et al., 2005).....	35
Abb. 4.11	Physikalische Explosion innerhalb und außerhalb eines Behälters (MAGALLON et al., 2005).....	36

10 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Vergleich zwischen chemischer und physikalischer Explosion (SCHWALBE, 1982).....	12
-----------------	--	----