

ERFAHRUNGEN MIT THERMODYNAMISCHEN PROBLEMEN IN REAKTORGEBÄUDEN BEI KÜHLMITTELVERLUSTSTÖRFÄLLEN

D. RISSE, J. LANGHANS,

Institut für Reaktorsicherheit der TÜV, Köln, Germany

Abstract

A short introduction is given to the problems of pressure-differences inside reactor buildings during loss-of-coolant accidents and to the fundamental methods of thermodynamic calculations. Subsequently experiences are presented as a result of the application of these calculations to nuclear power plants in operation and under construction.

1. Problem

- Heavy loss-of-coolant accidents produce forces due to pressure on the walls and ceilings in the different compartments of the reactor building. In order not to endanger the components of the safety system (e.g. containment, emergency cooling system) walls and ceilings may not be heavily damaged by missiles.
- Radiation shielding considerations require that holes and penetrations may not be too large. Therefore non-negligible pressure-differences have to be taken into account in the structural design.

2. Thermodynamic methods of calculation

- Brief review of the development of calculation methods with references.
- Computer codes presently used by IRS.
- Further development of computer codes.

3. Experiences

- The influence of some thermodynamic parameters on the results.
- Possibilities in design to decrease the forces due to pressure-differences

4. Research program

- Experimental confirmation of the calculated results
- Evaluation of special thermodynamic parameters by experiments

1. Problemstellung

Als die ERD die Erlaubnis erhielt, sich am Bau und bei der Entwicklung von Kernkraftwerken zu beteiligen, übernahmen Industrie, Gutachter und Behörden zunächst mit den Reaktorkonzepten auch weitgehend die Sicherheitsphilosophie der USA. Diese besagte für den Voll drucksicherheitsbehälter, der den Reaktor mit dem Primärkühlkreis einschloß, daß er das gesamte im Primärkreis enthaltenen Kühlmittel einschließlich zusätzlicher Wärmemengen z.B. durch Nachzerfallswärme aufnehmen mußte. Die Ausströmdauer war dabei wegen der großen Bruchquerschnitte unerheblich für den Druckverlauf, das Kühlmittel konnte bei dieser pauschalen Betrachtungsweise ebensogut auf einmal, plötzlich in den Sicherheitsbehälter freigesetzt werden. Eine grobe Abschätzung im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens zeigte jedoch im Jahre 1965, daß in einem Bruchraum mit relativ engen Querschnitten von innen nach außen Drücke von mehreren at auftreten mußten. Ob die Wände und Decken den Druckkräften, die kurzzeitig einige 100 Mp betragen, standhalten würden, mußte bezweifelt werden (1/, 2/, 3/).

Einstürzende Wände und Decken oder fortgeschleuderte Betonriegel und Bruchstücke können eine unmittelbare Gefahr für weitere Kreisläufe und sicherheitstechnisch notwendige Einrichtungen wie Sicherheitsbehälter, Notkühlanlagen und Unfallüberwachung darstellen. Der Nachweis, daß ein derart beschädigtes Gebäude nicht zu Schäden an sicherheitstechnisch notwendigen Einrichtungen führt, konnte bisher in keinem Falle erbracht werden; also mußte umgekehrt nachgewiesen werden, daß die Wände und Decken den möglichen Belastungen standhalten. Aus Gründen des Strahlenschutzes, der Belüftbarkeit u.a. können die Druckausgleichsöffnungen zwischen den Räumen nicht beliebig groß gemacht werden. Die dementsprechend häufig knappe Auslegung führt bei der Überprüfung oft dazu, daß die thermodynamisch errechnete Belastung bei nur geringfügig geänderten Annahmen die zulässige Belastung überschreitet und Änderungen an den Betoneinbauten notwendig macht. Bei den neuerdings geplanten Anlagen werden die Probleme der Druckdifferenzen bei Kühlmittelverluststörfällen von vornherein bei der Anordnung der Einbauten berücksichtigt, sodaß nennenswerte derartige Belastungen auf einige wenige Räume beschränkt werden können.

Ebenso werden unzulässige Belastungen bei Brüchen außerhalb des Sicherheitsbehälters auf den Sicherheitsbehälter und Gebäudeteile berücksichtigt bzw. mit konstruktiven Maßnahmen verhindert.

In ähnlicher Weise werden auch die Belastungen bei Druckabbausystemen rechnerisch und experimentell ermittelt und berücksichtigt.

Um die noch bestehenden Unsicherheiten bei der Wahl der thermodynamischen und baustatischen Parameter abzubauen, wurden Forschungsvorhaben vom Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft in Zusammenarbeit mit der deutschen Reaktorindustrie in Angriff genommen.

2. Thermodynamische Grundlagen

2.1 Übersicht über die Entwicklung der Berechnungsmethoden mit Literaturhinweisen

Das Problem der Druckdifferenzen über Wände und Decken der Räume innerhalb des Sicherheitseinschlusses während des Ausströmvorganges wurde 1965 in Deutschland erkannt /1/.../4/. Es zeigte sich, daß exakte Berechnungen für mehrfach unterteilte Gebäude nur mit elektronischen Rechenanlagen zu bewältigen sind. Es mußte ein Rechenmodell entwickelt werden, welches bei erträglichem Aufwand an Rechenzeit und -kosten glaubhafte Aussagen über die Druck- und Temperaturverläufe in den einzelnen Räumen des Reaktorgebäudes lieferte.

Wegen der beschränkten Kapazitäten der damaligen Rechenanlagen wurden zunächst für wassergekühlte Reaktoren Modelle entwickelt, die die Räume eines Volldrucksicherheitseinschlusses als Volumina mit Ruhezustand und verbindende Querschnitte in Form von reibungsfreien Blenden darstellten. Strömungsvorgänge wurden also nur an den Blenden zum Massentransport zwischen den Räumen berücksichtigt. Die tatsächlich vorhandenen Öffnungen wurden mit Reduktionsfaktoren versehen, die die Einschnürung am Einlauf, Reibung und Umlenkungen im Kanal berücksichtigten (/5/ bis /10/). Während /5/ die Differentialgleichungen der Massen und Energiebilanzen für jedes Volumen gesondert programmierte und dann mit Hilfe eines allgemeinen Lösungsverfahrens /13/ weiterrechnete, entwickelte /6/ im Rahmen der Genehmigungsverfahren ein Differenzenverfahren mit flexiblem Organisationschema zur gleichartigen Behandlung sämtlicher und beliebig vieler Volumina mit beliebigen Verbindungsquerschnitten durch eine einheitliche Prozedur. Nach /7/ und /8/ wurden noch bei mehreren Stellen in der Bundesrepublik und in einigen weiteren Ländern ähnliche Rechenprogramme entwickelt (z.B. /9/, /9/ und /10/).

Mit der Annäherung an Grenzbelastungen der Einbauten wurden die Programme erheblich weiterentwickelt. Insbesondere mußten die physikalischen Einflußgrößen, wie Reibung und Umlenkung im Überströmkanal, Öffnungsvorgänge von Klappen, Betonriegeln und Türen, Wassermitriß zwischen den Räumen, Luftfeuchtigkeit bei Störfallbeginn und anderes so genau wie möglich erfaßt werden. Schließlich wurden die Programme auf gasgekühlte und Schwerwasserreaktoren ausgedehnt.

Bei fast allen deutschen Reaktorherstellern liegen inzwischen derartige Rechenprogramme vor.

2.2 Derzeitiger Stand der Rechenprogramme beim IRS für Druck- und Temperaturverläufe

Beim Institut für Reaktorsicherheit werden normalerweise die Auswirkungen von Kühlmittelverlusten auf die einzelnen Räume innerhalb eines Sicherheitsbehälters für heutige Reaktorversionen berechnet. Die Entwicklung der Programme für Leichtwasser-Reaktoren, die mit /6/ begann, könnte aufgrund der langjährigen Benutzung in atomrechtlichen Genehmigungsverfahren als nahezu abgeschlossen betrachtet werden. Die Auswirkungen von verschiedenen Öffnungsmechanismen wie Klappen, Reißmembranen, Setzsteinwänden usw. auf die Strömungsvorgänge werden voll berücksichtigt. An komplizierten Überströmkanälen können statt der Blendengleichung entsprechende Beziehungen mit beliebigen Widerstandsbeiwerten angesteuert werden. Auch für schwerwassergekühlte Reaktoranlagen können die oben genannten Berechnungen durchgeführt werden; dabei werden die physikalischen Eigenschaften des D_2O in sämtlichen infrage kommenden Gleichungen verwandt. Die Stoffwerte für Wasser und Dampf werden normalerweise mit Polynomen berechnet. Für genauere Berechnungen, besonders im überhitzten Bereich, können die erheblich rechenzeitintensiveren IFC-Formeln benutzt werden.

Für Druckabbausysteme liegen Programmversionen vor, die die Kondensation des Dampfes im Wasser der Kondensationskammer nach dem Ausblasen des Wasserpfropfens aus den Überströmrohren berücksichtigen.

Hier kann in der Regel mit einem 2-Raumsystem, Druckkammer (DK) und Kondensationskammer gerechnet werden. In besonderen Bruchfällen wird die DK noch einmal in zwei oder drei Räume unterteilt.

Die Berechnungen der Druckdifferenzen für gasgekühlte Reaktoren wurden für Kühlmittel mit relativ konstanten Stoffwerten (z.B. Helium) und für Gase mit stark temperatur- und/oder druckabhängigen Stoffwerten (z.B. Kohlendioxid) durchgeführt.

Für gasgekühlte Reaktoren liegen bisher keine Blowdown-Programme wie für wassergekühlte /11/, /12/ vor. Die oben erwähnten Programme für gasgekühlte Reaktoren schließen die pessimistische Berechnung der Ausströmraten aus dem Bruchquerschnitt ein. Die zukünftige Weiterentwicklung zu zwar konservativen, jedoch realistischeren Annahmen für die Ausströmraten wird in einem folgenden Kapitel beschrieben.

Nach dem Ausgleich der Druckdifferenzen gegen Ende der Ausströmung aus dem Reaktorkühlkreis, beginnt der Langzeit-Druckverlauf, der wegen der starken Kondensationsvorgänge vorwiegend bei Druck- und Siedewasserreaktoren rechnerisch untersucht wird. In diesem Programm gehen für den Wasser- und den Dampf-Luftbereich im wesentlichen die Wärmeübergänge an kalten und heißen Oberflächen, Wärmeleitung, Notkühleinrichtungen, Nachzerfallswärme und chemische Reaktionen ein. Bei gasgekühlten Reaktoren sind diese Probleme bisher kaum aufgetaucht, jedoch wird keine Schwierigkeit darin gesehen, auch Langzeit-Verläufe für diese Baulinie zu berechnen, wenn sich dafür die Notwendigkeit ergeben sollte.

2.3 Geplante Weiter- und Neuentwicklung von Rechenprogrammen

Trotz der nahezu abgeschlossenen Entwicklung unserer Rechenprogramme ergeben sich immer wieder neue Probleme, die berücksichtigt werden müssen. Es wurde bereits erwähnt, daß die IFC-Formeln gegenüber Polynomgleichungen genauere, aber auch erheblich rechenzeitintensivere Ergebnisse liefern. Wir erproben jetzt gerade ein Verfahren, aus den IFC-Formeln, die bei einem Rechenlauf ca. 60 000 mal aufgerufen werden, eine Tabelle im interessierenden Bereich zu errechnen und dann mit immer noch guter Genauigkeit zu interpolieren.

Dann erschien es sinnvoll, den langzeitigen Druck- und Temperaturverlauf in Volldruck- und Druckabbausystemen in einem geschlossenen Programm exakt zu berechnen. Bisher bemühte man sich damit, die maximalen Drücke und Temperaturen über Energiebilanzen zu bestimmen und die Not-

Kühleinrichtungen annäherungsweise zu berücksichtigen. Für die Bestimmung der langfristig auftretenden Temperaturen in den Wänden oder im Wasser des Gebäudesumpfes ist es notwendig, die Zustände des langfristig aus der Bruchstelle austretenden Wassers sowie natürlich die Wirkung weiterer Notkühleinrichtungen, Wärmespeicherung in Wänden usw. zu erfassen. Durch Zusammenfassung mehrerer Einzelprogramme entsteht bei uns z.Zt. ein umfassendes Programm, das vom Beginn des Unfalles an bis in den Bereich des Unterdruckes nach mehreren Stunden Drücke und Temperaturen im Sicherheitsbehälter bestimmt.

Es ist geplant, die Zustände in sehr engen Räumen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten, in denen also der bei allen Programmen vorausgesetzte Ruhezustand nicht zutrifft, genauer zu erfassen. Ob hier eine relativ einfache Version ausreicht, oder ob weitere Arbeit investiert werden muß, werden die begonnenen Versuche zeigen.

Die Berechnung der Auswirkung von Leistungsexkursionen schneller natriumgekühlter Brutreaktoren mit schlagartiger Freisetzung dampfförmigen und flüssigen Natriums und deren Auswirkungen auf die Gebäuderäume ist in Arbeit. Dabei wird im weiteren Verlauf versucht, Na-Kondensationsvorgänge und Wärmeübergang an die Wände und Einbauten zu berücksichtigen. Auch die zusätzliche Energiefreisetzung durch Na-Reaktionen wird betrachtet und bei Bedarf mit in die Berechnungen einbezogen. Zur Bestimmung der Ausströmraten bei gasgekühlten Reaktoren müssen die physikalischen Modellannahmen der Überströmöffnungen innerhalb des Primärkreises verfeinert werden. Zur Zeit wird die Auswirkung der Rohrreibung auf ein kompressibles Strömungsmedium untersucht (zur besseren Darstellung der langen Rohrleitungen).

Des weiteren ist geplant, auch die Aufheizung eines Gases bei Core-, Dampferzeuger-, bzw. Wärmetauscherdurchströmung in Verbindung mit der Reibung möglichst wirklichkeitsgetreu durch ein Berechnungsverfahren nachzubilden.

3. Erfahrungen

3.1 Zusammenstellung der wesentlichen Parameter

Die Berechnung der durch die Öffnungen strömenden Mengen erfolgt in den meisten Fällen nach der Blendengleichung oder einer ihrer Modifikationen. Diese Gleichung ist z.B. in /14/ ausführlich abgeleitet und beschrieben. Sie enthält einige Parameter, die durch die Konstruktion und die betrieblichen Zustände im Gebäude beeinflussbar sind und bei geeigneter Wahl in gewissen Grenzen die bei einem Kühlmittelverlustunfall auftretenden Belastungen verringern können. Diese sind

der freie Querschnitt F
der Faktor für die Einschnürung am Einlauf der Öffnung
die Ausgangszustände in den Räumen

Zu Anfang wurde schon erwähnt, daß aus Abschirmungs- und Lüftungsgründen die freien Öffnungen zwischen den einzelnen Räumen eines Reaktorgebäudes beschränkt sind. Die bei Kühlmittelverluststörfällen notwendigen Öffnungen können für Lüftungszwecke mit leichten Klappen, Reißmembranen oder einfachen Türen wieder verschlossen werden. Sie halten den betrieblich vorgesehenen geringen Differenzdrücken stand, öffnen jedoch, sobald höhere, gut bestimmbare Differenzdrücke im Falle eines Unfalles auftreten. Zur Verringerung der Strahlenbelastung können solche Öffnungen auch mit Setzsteinwänden zugesetzt oder mit Stahlklappen oder Bleitüren verschlossen werden, die ab einem bestimmten Differenzdruck beschleunigt öffnen und schließlich den vollen Querschnitt freigeben. Die hier beschriebenen Lösungswege führen zu einem weiteren Parameter der den Durchsatz und die Differenzdrücke beeinflußt.

Querschnitte die erst bei einem vorbestimmten Differenzdruck öffnen

Bei der Erstellung des Modellraumschemas wird aus Rechenzeit- und damit Kostengründen angestrebt, Volumina, die durch relativ große Querschnitte miteinander verbunden sind, zusammenzufassen und die Anzahl der Modellräume möglichst klein zu halten. Sehr häufig hat man mehrere Möglichkeiten, die Vereinfachungen vorzunehmen. Deren Auswirkungen führen zu einem weiteren Punkt

Einfluß der Raumzusammenfassung bei der Modellerstellung auf die Ergebnisse

Die Trennung von Wasser und Dampf in den einzelnen Räumen eines wassergekühlten Reaktors spielt für die Zustände in nachfolgenden Räumen und damit für den Druckverlauf in sämtlichen Räumen eine wesentliche Rolle. Das Ausmaß der Trennung wird durch den Wassermitrißfaktor beschrieben.

3.2 Der Einfluß des effektiven Überströmquerschnittes auf den sich einstellenden Druck

Der effektive Überströmquerschnitt wie er in der Blendengleichung verwendet wird, ergibt sich aus dem Produkt des geometrischen Querschnittes und des Einschnürungskoeffizienten α . Sein starker Einfluß auf den Druckverlauf ist in /5/ und /6/ ausführlich dargestellt und für Sattwasserausströmung aus dem Primärkreislauf in /6/ zu einer Faustformel zusammengefaßt.

Die Einschnürungszahlen werden bei uns trotz steigender Tendenz bei höheren Geschwindigkeiten konstant für niedrige Geschwindigkeiten angesetzt, da wir normalerweise zur Vereinfachung der Rechenverhältnisse in dem Einschnürungskoeffizienten auch weitere Einflüsse der Geometrie des Überströmkanals wie z.B. Umlenkung, Rauigkeit, behindernde Einbauten zusammenfassen, die mit steigender Strömungsgeschwindigkeit wachsen und damit die günstiger werdende Einschnürungszahl zum Teil kompensieren. Schwierigkeiten ergeben sich für uns in der konservativen Wahl der Einschnürungszahlen, da bisher nur wenig experimentelle Ergebnisse für die vorkommenden Öffnungsformen und Strömungsverhältnisse bekannt sind. Die Diskussion über dieses Problem zwischen Reaktorherstellern und Gutachtern flammt bei jeden neuen Kernkraftwerksprojekten neu auf, weil große α -Zahlen trotz kleiner geometrischer Querschnitte (Baustatik, Strahlenschutz) kleine Differenzdrücke über die Wände ergeben (Armierungskosten).

Zunächst waren wir in der Wahl dieser Werte sehr vorsichtig, da zu viele weitere Unbekannte die Rechnungen belasteten. Mit fortschreitenden Erfahrungen mit den einzelnen Parametern konnten wir die "Ersatzeinschnürungszahlen" realistischer ansetzen.

Sie betragen z.Zt. für die praktische Anwendung bei

geraden Schalungsplatten, kurzen Kanälen ($L/D \approx 1$) mit auf die
Öffnung gerichteter Zuströmung und gut gerundetem Einlauf 0,9

Von diesem günstigen Kanal ausgehend reduzieren wir die Einschnürungs-
zahl etwa wie folgt:

Einlaufkante gebrochen	0 - 0,1
Einlauf scharfkantig	0,1 - 0,2
Kanalachse nicht senkrecht zur Wand	0 - 0,1
gute Zuströmung nur auf einer Seite durch z.B. eine führende Wand	0,1
ungerichtete Zuströmung	0,1 - 0,2
Winkel im Kanal (ca. 60°)	0,2
Langer Kanal ($L/D \approx 2-3$)	0,1

Wir hoffen, diese Werte im Rahmen der begonnenen Forschungsprogramme zu ver-
bessern und abzusichern.

Kreuzen Einbauten den Kanal (z.B. Rohre, Träger), wird deren Fläche vom geo-
metrischen Querschnitt abgezogen und ihre Form bei der Reduktion der Ein-
schnürungszahl berücksichtigt. Bei komplizierteren Kanälen, z.B. mehreren
Winkelstücken, großer Länge oder Rauigkeit, komplizierten Einbauten usw.
werden Widerstandsziffern in der üblichen Weise ermittelt und über den Druck-
verlust bei der überströmenden Menge berücksichtigt. Dies gilt generell
für die Kondensationsrohre bei Druckabbausystemen.

3.3 Querschnitte die erst bei einem vorbestimmten Differenzdruck öffnen

Wie vorher erläutert, besteht häufig die Notwendigkeit, bei Kühlmittelver-
luststörfällen mehr Entlastungsöffnungen zur Verfügung zu stellen, als im
normalen Betrieb aus Lüftungs- und strahlenschutztechnischen Gründen zulässig
sind. Dies erfolgt mittels Setzsteinwänden, Türen, Reißmembranen und Klappen,
die erst bei einer vorgegebenen Differenzdruckbelastung öffnen und im Normal-
betrieb geschlossen sind.

Im folgenden werden Ergebnisse gezeigt, die mit relativ einfachen Modellen er-
zielt wurden. Die einfachen Modelle wurden gewählt, weil gerade an ihnen die
Darstellung der durch die einzelnen Parameter erzielten Effekte klar veran-
schaulicht werden kann.

Kompliziertere Raumanordnungen würden die Deutlichkeit der Darstellungen
wesentlich verschlechtern.

Abb. 2 zeigt den Verlauf der Absolutdrücke für das angegebene Modellraumschema. Man erkennt, daß die zusätzliche Tür eine erhebliche Verminderung der Druckbelastungen und ein früheres Erreichen des Ausgleichdruckes im gesamten Raumsystem bewirkt. Im Fall mit Tür entspricht der Spitzendruck dem Ausgleichsdruck, während ohne Tür der Ausgleichsdruck um ca. 30 % überschritten wird.

Abb. 3 zeigt den gleichen Einfluß auf die Differenzdrücke. Die Spitzen werden durch die öffnende Tür erheblich abgebaut und die hohen Belastungen sind nach bedeutend kürzerer Zeit abgeklungen.

Bei schweren Verschlüssen, wie z.B. dicken Setzsteinwänden, können sehr hohe Spitzendrücke bis zum mehrfachen Ausgleichsdruck in den von solchen Wänden eingeschlossenen Räumen auftreten, bevor die Öffnungen freigegeben sind. In einigen speziellen Fällen mit besonders kleinem Raum und hoher Ausströmrate (Stutzenraum) berücksichtigten wir sogar die Volumenzunahme durch das Ausschleiben der Setzsteine, um die Spitzenbelastung zu reduzieren.

3.4 Einfluß der Ausgangszustände in den Gebäuderäumen

Die Auswirkungen der Ausgangstemperatur auf die Differenzdrücke während der Kurzzeittransienten sind im Rahmen der betrieblich vorkommenden Temperaturbereiche relativ gering. Es genügt im allgemeinen, die Temperaturen in größeren Raumbereichen auf 10 - 20 °C genau abzuschätzen. Der Einfluß der Temperaturen auf den Langzeit-Druckverlauf und den Enddruck soll hier nicht diskutiert werden.

Ähnliches gilt für die Anfangsdrücke, die normalerweise nur geringfügig vom atmosphärischen Druck abweichen.

Der Einfluß der relativen Luftfeuchte auf die maximalen Differenzdrücke und Absolutdrücke ist gering. Genauere Untersuchungen haben gezeigt, daß bei niedriger relativer Luftfeuchte ein geringer Zeitverzug beim Druckanstieg durch die zunächst notwendige Sättigung der Luft auftritt. Die Differenzdrücke und absoluten Maximaldrücke werden dadurch geringfügig niedriger. Bei unseren Sicherheitsanalysen rechnen wir mit Feuchtigkeitsgehalten von 50 - 80 %.

3.5 Einfluß der Raumzusammenfassung auf die Ergebnisse

Bei der Modellerstellung werden häufig zur Rechenzeiterparnis mehrere Räume zu einem Modellvolumen zusammengefaßt, wenn die Querschnitte zwischen zusammengefaßten Räumen relativ groß gegenüber den Zu- und Abströmquerschnitten sind. Dabei besteht oft die Möglichkeit, einige Volumina dem einen oder anderen Modell-

raum zuzuweisen. Wir haben die Auswirkungen dieser Raumgruppierungen dadurch zu verdeutlichen versucht, daß wir Volumenteile von Raum 2 nach Raum 1 verlegt haben. Das Gesamtvolumen der beiden Räume blieb gleich.

Abb. 4 zeigt, daß die maximalen Differenzdrücke sich bei diesem Beispiel um ca. 100 % unterscheiden. So stark wirkt sich hier also die Speicherfähigkeit der Räume aus.

Die Zusammenfassung mehrerer kleiner Volumina, die durch relativ große Querschnitte miteinander verbunden sind, ist im allgemeinen sinnvoll. Wir haben den Raum 1 unseres Modell in drei Einzelvolumina unterteilt, die durch verhältnismäßig große Öffnungen verbunden wurden. In Abb. 5 sieht man, daß die Absolutdrücke der ersten beiden Teilräume und damit auch deren Differenzdrücke deutlich über denen liegen, die mit dem vereinfachten Modell errechnet wurden. Bei Durchgangsräumen zwischen Einströmstelle und relativ großen Volumina ist also Vorsicht bei der Zusammenlegung geboten. Solche Räume sollten sicherheitshalber als Einzelräume erhalten bleiben.

Anders ist es bei Raumgruppen mit relativ kleinen Räumen, die am Ende eines Raumnetzes liegen. Sie können bei der üblichen Anordnung im Reaktorgebäude mit Treppenschächten, Türen, Rohr-, Lüftungs- und Kabeldurchbrüchen im allgemeinen bedenkenlos zusammengefaßt werden. Die Differenzdrücke in diesen Bereichen liegen meistens weit unterhalb der zulässigen Grenzen und können leicht aus den übrigen Druckverläufen abgeschätzt werden. Bei den Berechnungen hat es sich gelegentlich gezeigt, daß nach den ersten Rechenläufen Korrekturen am Raummodell notwendig waren.

In der Praxis hat es sich als zweckmäßig erwiesen, bei mehreren Einströmstellen im gleichen Gebäude (z.B. Druckkesselbereich, Dampferzeugerraum, Frischdampfleitungen) die Räume um die jeweilige Bruchstelle herum sehr genau zu erfassen und weiter entfernte - of symmetrische - Bereiche pauschal zu behandeln. Die dadurch je nach Bruchstelle unterschiedlichen Raummodelle müssen angegeben werden, die Volumina, Querschnitte usw. kann das Programm dann selber berechnen. Bei Druckabbausystemen ist das freie Luftvolumen der Kondensationskammer (KK) im Verhältnis zum Druckkammervolumen ausschlaggebend für den maximalen Druck in beiden Kammern. Während die Volumina in Volldrucksicherheitsbehältern und in der Druckkammer eines DAS nach Beendigung der Bauarbeiten nicht mehr verändert werden, ist das Luftvolumen der KK durch betriebliche Vorgänge wie Speicherung oder Entnahme von Wasser beeinflüßbar. Solche Vorgänge gehen unmittelbar in die sichere Funktion des DAS ein und müssen entsprechend überwacht und abgesichert werden.

3.6 Einfluß des Wassermirifaktors auf die maximalen Differenzdrücke

Der Wassermiri-Faktor wird in den verschiedenen existierenden Rechenprogrammen unterschiedlich definiert.

Er kann sich

- a) auf den Anteil flüssigen Wassers
- b) auf den Anteil des Dampfes und
- c) auf den Gesamtanteil des Wassers (Flüssigkeit und Dampf)
wie z.B. in /5/ und /8/ beziehen.

In unseren Rechenprogrammen für Siede- und Druckwasserreaktoren trifft der Fall a) oder b) zu. Wir haben zur Demonstration bei dem in Abb. 6 dargestellten Modell an der Öffnung zwischen Raum 1 und 2 den Wassermirifaktor nach a) variiert und dessen Einfluß auf die maximalen Differenzdrücke untersucht. Die Kurven der Abb. 6 zeigen deutlich, daß der Einfluß der richtigen Wahl erheblich ist. Im Bereich 0,5 bis 1,0 für den Wassermirifaktor sind Änderungen der maximalen Differenzdrücke zwischen den Räumen 1 und 3 und 1 und 2 von ca. 10 % zu verzeichnen.

Die Schlußfolgerung daraus muß sein, daß bei Differenzdruckberechnungen großer Wert auf möglichst wirklichkeitsgetreue Wahl dieses Faktors für die einzelnen Öffnungen gelegt werden muß.

Leider liegen bisher keinerlei experimentelle Ergebnisse dafür vor. Wir sind bisher ausschließlich auf Schätzungen aus Strömungsgeschwindigkeit, Separationswirkung durch Schwer- und Fliehkraft und räumliche Anordnung der Öffnungen angewiesen. Im allgemeinen halten wir für Öffnungen des Bruchraumes je nach Raumgröße Wassermirifaktoren von 0,6 bis 1,0 für realistisch. Je nach Größe und Lage der Öffnungen in den nachfolgenden Räumen werden dort die Werte 0,4 bis 0,8 angesetzt. Bei Räumen die über mehrere andere Räume mit dem Bruchraum verbunden sind, reicht unseres Erachtens ein Wassermirifaktor von 0,1 aus. Im übrigen treten hier meistens durch Expansion des Dampfes überhitzte Zustände auf, sodaß Wassermiri entfällt. Genauere Erkenntnisse hoffen wir vom z.Zt. angelaufenen Forschungsprogramm.

Beim Literaturstudium wird auffallen, daß die in /5/ dargestellte Kurve für den Einfluß des Wassermirifaktors auf die maximalen Differenzdrücke eine entgegengesetzte Krümmung hat. Auch derartige Kurvenverläufe sind bei uns gelegentlich aufgetreten, sie sind offenbar jeweils abhängig vom vorliegenden Raummodell und dessen Verknüpfungen.

3.7 Mögliche Maßnahmen zur Verringerung der Differenzdrücke

Anlagen, bei denen die errechneten Druckdifferenzen noch in die frühzeitige Planung einfließen können, sollten von vornherein mit genügend großen Überströmquerschnitten an strahlenschutztechnisch ungefährlichen Stellen versehen werden.

Bei älteren Anlagen, insbesondere denen, die vor 1966 geplant wurden, hat sich während des Baues und teilweise nach Fertigstellung der Betoneinbauten die Notwendigkeit ergeben, nachträglich Änderungen vorzunehmen. Da die Tragfähigkeit der Wände und Decken im allgemeinen festliegt und bestenfalls mit aufwendigen Stützkonstruktionen erhöht werden kann, wird zunächst versucht, die Differenzdruckbelastungen zu verringern.

Wie schon im Kap. 3.2 erwähnt, hat die Größe der Einschnürungszahl einen großen Einfluß auf den Durchsatz durch die Druckentlastungsöffnungen. Das Brechen von Öffnungskanten oder in besonderen Fällen deren Abrundung bei bereits bestehenden Öffnungen ist meistens ohne besonderen Aufwand möglich und vergrößert den Durchsatz erheblich (Abb. 7, 1 a-c).

Die oft entgegengesetzten Anforderungen an Wände hinsichtlich des Strahlenschutzes und der Durchlässigkeit für Wasser, Dampf und Luft, können durch Winkelkanäle erfüllt werden. Dabei bringen Abrundungen der Einlauf- und Knickkanten eine sehr starke Verbesserung der Strömungsverhältnisse. In Extremfällen wurden schon Leitschaukeln im Knie des Kanals zur exakten Führung der Strömung eingesetzt (Abb. 7, 2a, b).

Eine andere Form des Winkelkanals wird durch eine in einem bestimmten Abstand vor eine Öffnung gesetzte Wand erreicht, die die Öffnung strahlenschutztechnisch verschließt, strömungstechnisch aber offen läßt (Abb. 7, 3). Hier ist auf die sichere Verankerung solcher Wände zu achten. Montageöffnungen in Wänden und Decken werden nach der Montage meistens mit Setzsteinwänden bzw. Betonriegeln wieder verschlossen. Diese Verschlüsse geben die Öffnungen nur langsam frei und stellen außerdem dann oft aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit (ca. 30 m/sec) und Masse eine Gefahr für den Sicherheitsbehälter und andere Sicherheitseinrichtungen dar. Solche Verschlüsse können häufig durch dünne Blechplatten ersetzt werden, die die Öffnungen bei einem definierten geringen Druck spontan freigeben, geringe Masse besitzen und u.U. mit leichten Gelenken gehalten werden können. Wo dies aus Strahlenschutzgründen nicht möglich ist, können schwere Verschlüsse, statt in der Wand oder Decke, davor angebracht werden (Abb. 7, 4a,b).

Sie geben dann schon vom ersten Augenblick ihrer Bewegung an einen laufend größer werdenden Querschnitt frei. Bei Gefährdung von Sicherheitseinrichtungen durch solche Verschlüsse können Stahl- oder Bleiklappen verwendet werden, deren Gelenke den Druck- und Fliehkräften standhalten (Abb. 7, 5).

Erst wenn die hier skizzierten Maßnahmen nicht ausreichen, die Differenzdrücke auf ein zulässiges Maß zu reduzieren, müssen weitere Möglichkeiten wie Vergrößerung bestehender Öffnungen, Schaffung neuer Öffnungen, Abstützung von Wänden und Decken und ähnliches ausgenutzt werden. Ein besonderes Problem stellen Brüche zwischen Stahl-Sicherheitsbehälter und umschließendem Betongebäude dar, da diese Behälter meistens nur sehr geringen und außerdem nur ungenau bestimm- baren Außendruckbelastungen standhalten. Ist der Abstand zwischen Stahlbehälter und Betongebäude groß genug, daß sich das Kühlmittel von der Bruchstelle aus ohne hohe Strömungsgeschwindigkeiten auf das ganze Volumen verteilen kann, dann sind entsprechend dimensionierte Öffnungen nach außen geeignet, die Druckbelastungen unter den zulässigen zu halten. Bei geringeren Abständen er- scheint es zweckmäßig, die kritischen Bruchstellen druckfest zu ummanteln.

3.8 Beispiele für Differenzdruckkurven, die bei Nachrechnungen für Reaktorgebäude erzählt wurden

In Abb. 8 sind Differenzdruckkurven aufgetragen, die sich bei der Nachrechnung für einen gasgekühlten Reaktor ergaben. Das obere Schaubild zeigt die Wand- bzw. Deckenbelastungen bei einem Primärkreisbruch kaltgasseitig am Reaktorein- tritt. Die Kurve mit der Bezeichnung Δp 1-13 gibt den Differenzdruckverlauf vom Bruchraum (1) zum Dampferzeuger-Raum (13) an.

Die zweite Kurve (Δp 4-13) gilt für die Wand einer Raumkombination, die weiter zum Ende der Voluminakette liegt. Die Belastungen sind hier bedeutend kleiner, wie aus den Maximalwerten deutlich hervorgeht.

Das untere Schaubild zeigt den Verlauf der Differenzdrücke für die gleichen Wände bzw. Decken bei einem anderen Bruchfall (Bruch im Dampferzeugerraum). Die Wand zwischen den Räumen 1 und 13 wird in diesem Fall in der anderen Richtung belastet. Für einen Druckwasserreaktor mit Volldrucksicherheitsbehälter haben wir untersucht, welche Folgen größere Lecks am Druckgefäß haben. Das in Abb. 9 rechts oben gezeigte Schema gibt einen Eindruck von den räumlichen Gegebenheiten in der Nähe des Druckgefäßes. Das Leck wurde, wie eingezeichnet, an der Seite des Druckgefäßes angenommen. Die obere Kurve gibt einen Eindruck, mit welchen Belastungen für die Aufhängung des Druckgefäßes gerechnet werden muß, wenn derartige Störfälle auftreten.

Zum Vergleich ist auch die Kurve für den Differenzdruckverlauf über die Tragplatte aufgezeichnet. Deren Belastung ist bei weitem niedriger als die Auftriebskräfte, die auf das Druckgefäß wirken.

Abb. 10 zeigen den typischen Druck- und Temperaturverlauf im Druckabbausystem eines Siedewasserreaktors bei Bruch einer Dampfleitung. Zu beachten ist der überhitzte Zustand im Drywell mit Temperaturen zwischen 160 und 170 °C.

4. Forschungsvorhaben

Trotz einer großen Zahl von Reaktorbetriebsjahren fehlt es glücklicherweise an praktischen Erfahrungen mit schweren Kühlmittelverluststürfällen. Andererseits beruhen die thermodynamischen und baustatischen Berechnungen größtenteils auf Parametern, die trotz großen Einflusses auf das Ergebnis nur unzureichend experimentell belegt sind. Aus dem Bedürfnis heraus, diese Parameter im einzelnen genauer zu erfassen und u.U. neue, bisher nicht berücksichtigte Phänomene zu erkennen, wurden in der BRD integrale und spezielle Versuche zu diesem Problem begonnen. Bei integralen Versuchen mit einem mehrfach unterteilten Modellcontainment im Maßstab 1:4 sollen, soweit irgend möglich, auch Einzelphänomene wie Wasserseparation in den Räumen, Durchflußziffern von Überströmöffnungen bei Durchströmung von Luft, Wasserdampf und Wasser, Druckwellenfortpflanzung und das Verhalten von Betonwänden bei kurzzeitiger Belastung untersucht werden. Weitere Versuche werden zur Wirksamkeit von Splitterschutzbeton bei auftreffenden Kreislaufteilen und Bruchstücken durchgeführt. Außerdem soll untersucht werden, wie sich die Drücke auf Wände und Hindernisse in sehr kleinen Räumen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten verhalten. Auch in die Erforschung der Vorgänge in Druckabbausystemen bei Land- und Schiffsanlagen werden umfangreiche Mittel investiert. Hier werden u.a. der zeitliche Ablauf des Ausblasens der eingetauchten Überströmrohre, die Separation von Wasser und Luft in einer engen Kondensationskammer, wechselnde Eintauchtiefe und Kondensation in Wasser nahe der Sättigungstemperatur untersucht.

Wir hoffen, mit den Ergebnissen dieser Versuche unsere Rechenmodelle soweit den Realitäten anpassen zu können, daß die wesentlichen Vorgänge während der Ausströmung und Verteilung des Kühlmittels in den Sicherheitsbehälter erfaßt werden.

Literatur

- /1/ H.G. Seipel
Dynamische Belastungen eines Containments bei einem schweren Reaktorunfall
Beitrag zum IRS-Fachgespräch, München 1965
- /2/ H.G. Seipel
Dynamische Belastungen eines Containments bei einem schweren Reaktorunfall
Atomkernenergie 11. Jhrg. (1966) H. 9/10 S. 367/372
- /3/ H. Karwat
Aktuelle Probleme der Auslegung und Beurteilung von Sicherheitsbehältern großer wassergekühlter Leistungsreaktoren
TH München, Institut für Meß- und Regelungstechnik
Bericht MRR 30 (1966)
- /4/ H. Karwat
Aktuelle Probleme bei der Konstruktion von Reaktorsicherheitsbehältern
Atomwirtschaft + Atomtechnik, Vol. 10 Nr. 8/9 (1967), S. 435/438
- /5/ D. Brosche, H. Karwat
The Development of Pressure Differentials Across Containments of Large Water-Cooled Power Reactors
TH München, Institut für Meß- und Regelungstechnik
Bericht MRR 32 (1967)
- /6/ H.G. Seipel, D. Meinhardt, Köln
Differenzdrücke zwischen den Räumen eines Sicherheitsbehälters nach einem Primärkreisbruch
Atomkernenergie 13, Jhrg. (1968), H. 6, S. 401/407
- /7/ J.A. Landoni, M.L. Skinner
Primary Coolant System Blowdown Accident for Peach Bottom
HTR GAMD-Bericht Nr. 2605 (rev. 2) (1962)
- /8/ D.E. Aisch
Analytical Model for the prediction of differential pressure transients in reactor buildings during a loss of coolant
Atomkernenergie, Bd. 16 (1970), S. 6 - 10
- /9/ D. Brosche
Ein Rechenmodell zur Berechnung des dynamischen Druckaufbaues in Sicherheitsbehältern großer wassergekühlter Leistungsreaktoren
TH München, Institut für Meß- und Regelungstechnik
Bericht MRR 66 (1969)

- /10/ K.D. Küper, J. Langhans
Ein Programm zur Berechnung des Druckverlaufs in gekoppelten
Volumina
Atomkernenergie Bd. 17, Heft 3 (1971)
- /11/ F.J. Moody
Maximum Two-Phase Vessel Blowdown from Pipes
AFED-Bericht-4827
- /12/ H. Karwat
Bruch-S. A Code to investigate Blow-Down of Boiling Water
Reactors
Nuclear Engineering and Design 9, p 363 (1969)
- /13/ R. Burlish, I. Stoer
Numerical Treatment of Ordinary Differential Equations by
Extrapolation Methods
Num. Mathematik 8, 1 - 13 (1966)
- /14/ E. Schmidt
Technische Thermodynamik
Springer Verlag

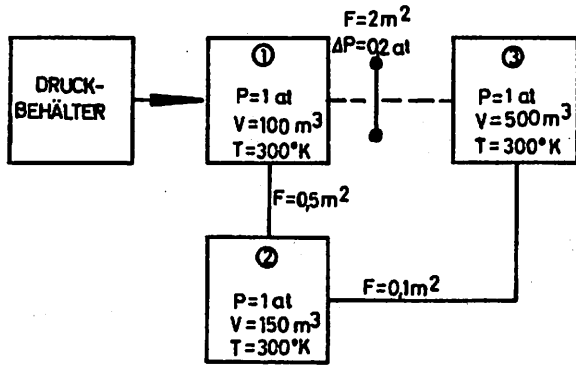


Abb. 1 Modellraumschema

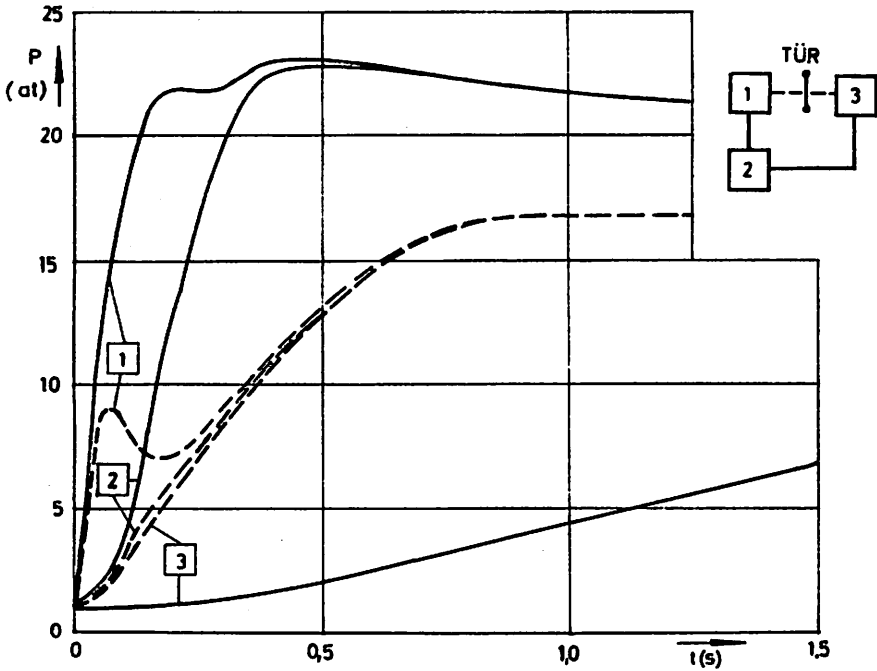


Abb. 2 Verlauf der absoluten Drücke bei offener und geschlossener Verbindungstür

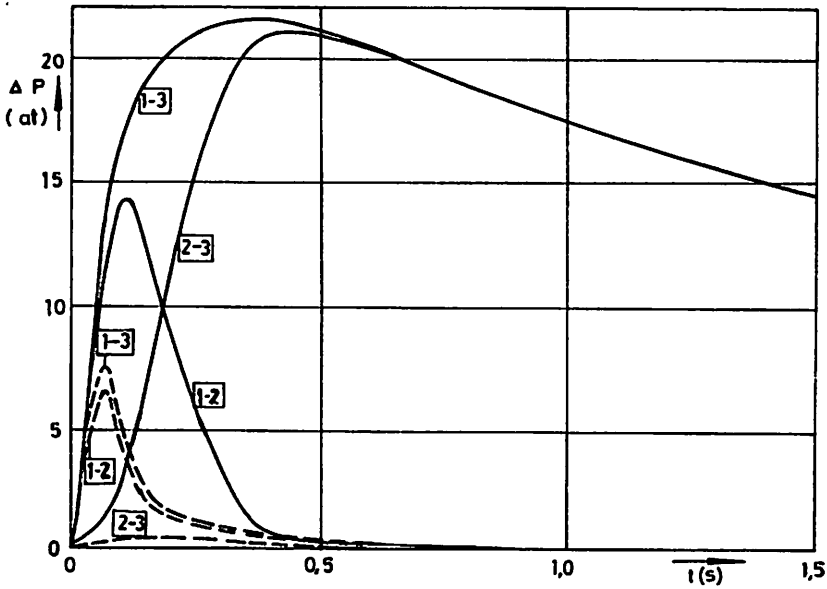


Abb. 3 Verlauf der Differenzdrücke bei offener und geschlossener Tür

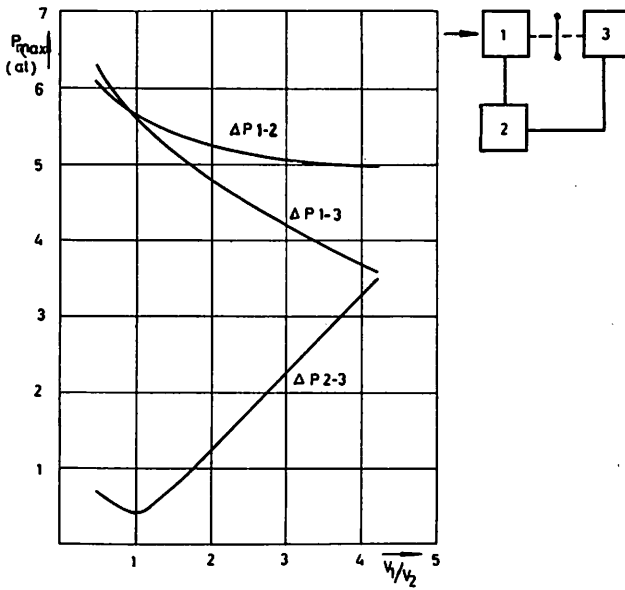


Abb. 4 Einfluß der Modellraumwahl auf die Differenzdrücke

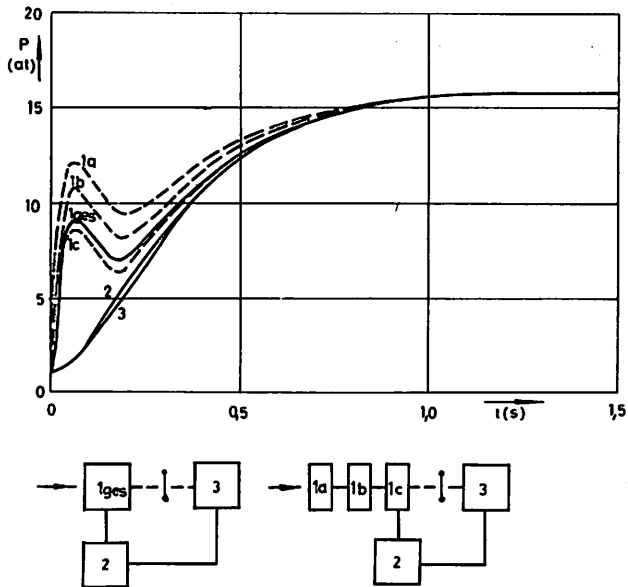


Abb. 5 Einfluß der Raumzusammenfassung auf die Differenzdrücke

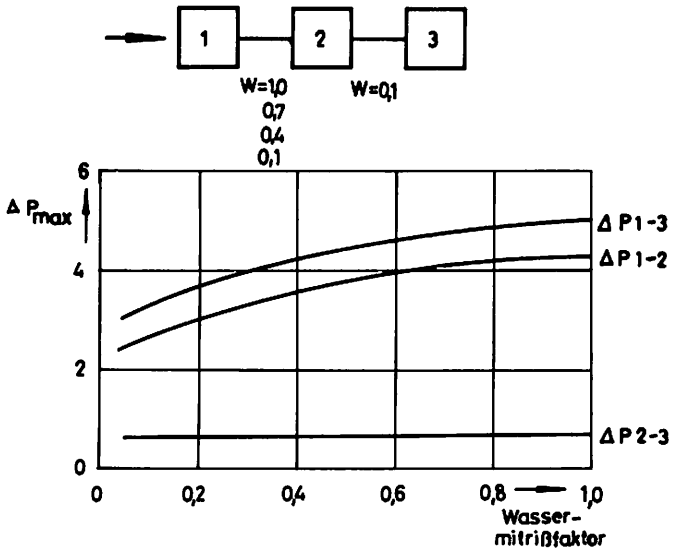


Abb. 6 Einfluß des Wassermitrißfaktors auf die maximalen Differenzdrücke

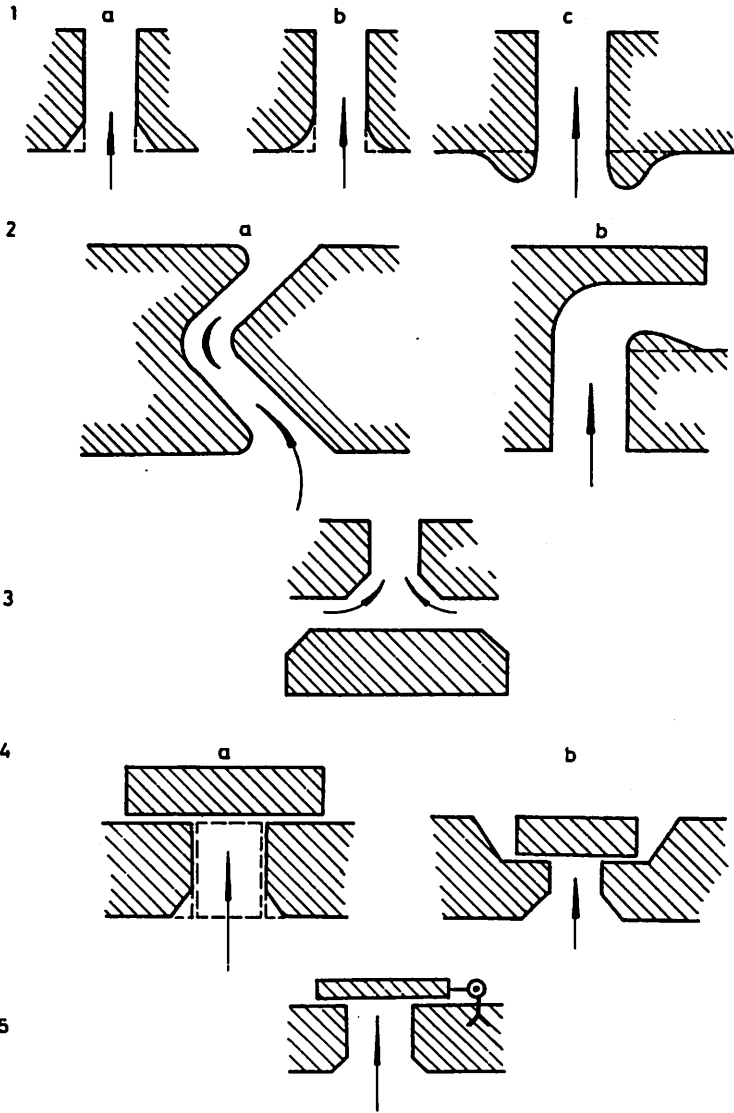


Abb. 7 Änderungsmöglichkeiten an bestehenden Öffnungen

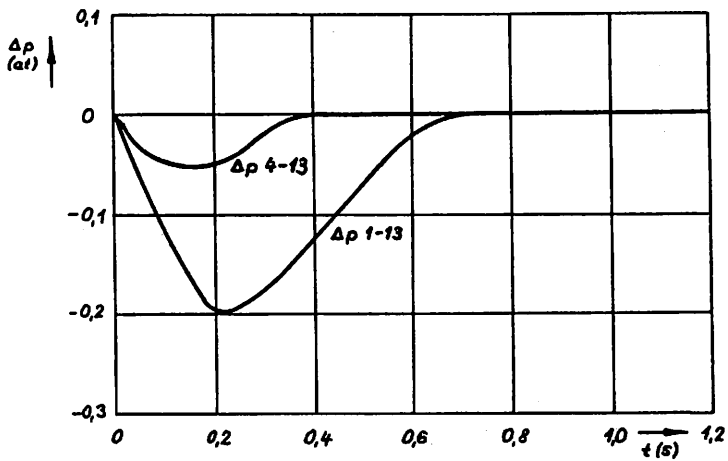
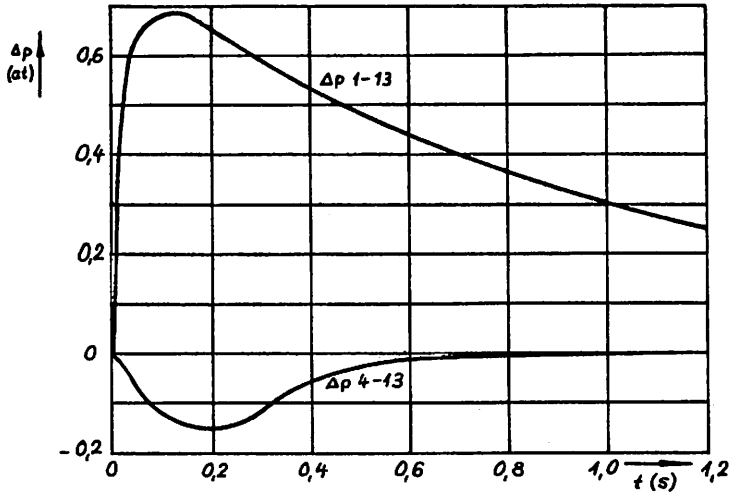


Abb. 8 Wirklich errechnete Druckverläufe

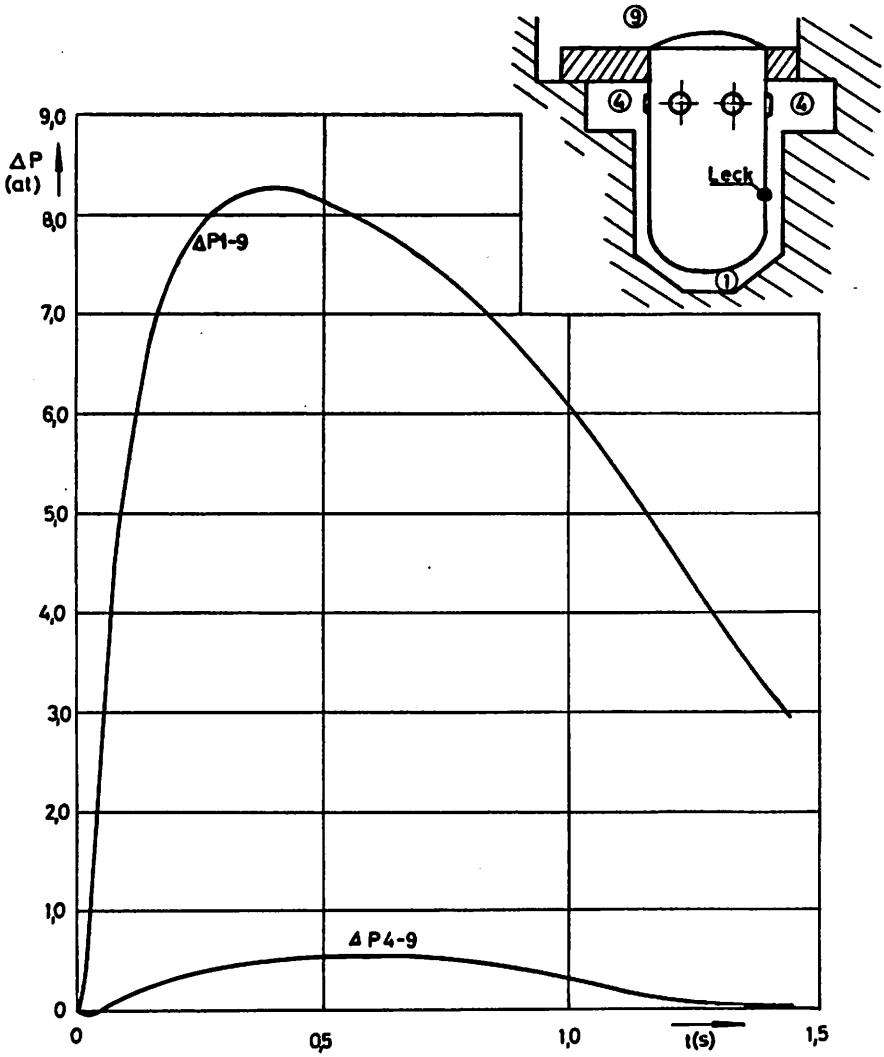


Abb. 9 Belastung einer Druckgefäßaufhängung infolge von Differenzdrücken

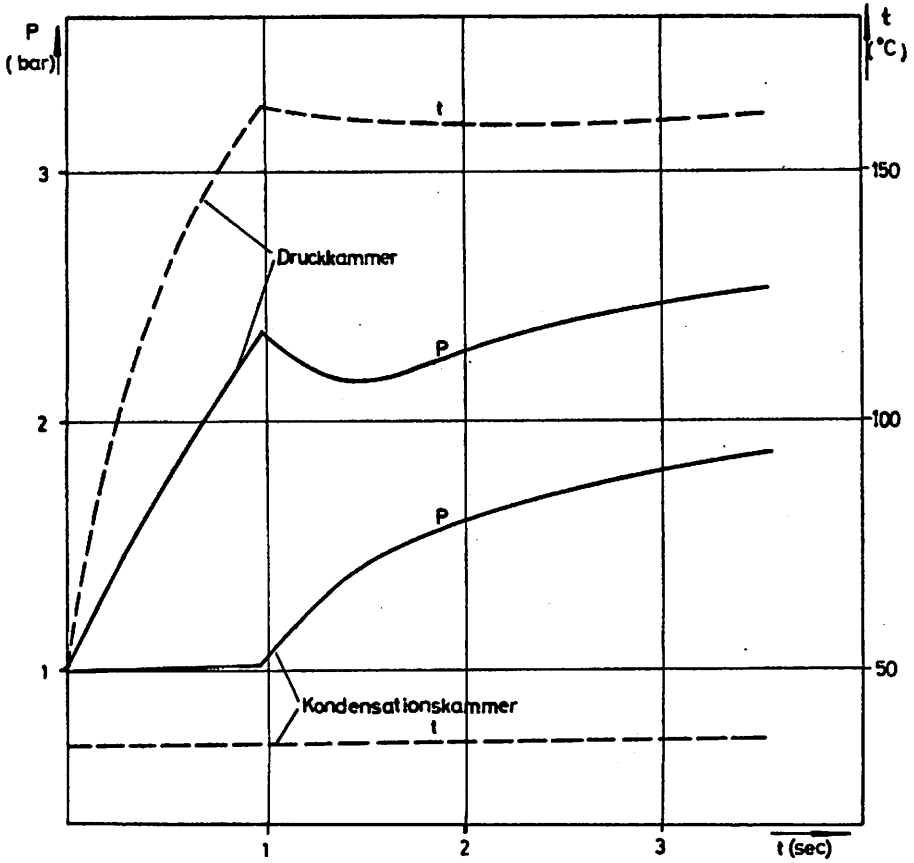


Abb. 10 Druck und Temperaturverlauf in einem Druckabbausystem bei Dampfleitungsbruch

APPENDIX :

BETONKONSTRUKTIONEN UNTER GAU-BELASTUNGSBEDINGUNGEN

H.H. HOFMANN,

*SDK Ingenieurunternehmen für spezielle Statik,
Dynamik und Konstruktion, Lörrach, Germany*

1.0 Allgemeines

Beim Eintreten eines Kühlmittelverlust-Störfalles oder allgemein eines Störfalles, der extremale Bedingungen für die Betonkonstruktion (GAU-Belastungsbedingungen) darstellt, sind die Arten der Konstruktionsbeanspruchungen einer Vielzahl von Begleiterscheinungen unterworfen. Die vielen Einflussparameter deuten darauf hin, dass man nur selten von einem einzelnen Lastfall sprechen kann. Gerade der Einfluss der Zeitabhängigkeit sowie die Primär- und Sekundär-Erscheinungen im zeitlichen Verlauf bewirken, dass man die Belastungsgeschichte sowohl für die Belastungen, wie auch für das Tragverhalten der Konstruktionen berücksichtigen muss.

2.0 Belastungsarten

Die auftretenden, möglichen Belastungen für Betonkonstruktionen in Kernkraftwerksanlagen, die zu extremalen Bedingungen führen können, sollen im folgenden in drei Gruppen zusammengefasst werden. Diese Belastungsarten können sowohl als Primär- wie auch als Sekundär-Erscheinungen auftreten und sollen unter dem Begriff der Zeitabhängigkeit bzw. der Belastungsgeschichte erfasst werden.

2.1 Druckzustand

Die Erfahrungen mit thermodynamischen Problemen bei Kühlmittelverlust-Störfällen sind im Hauptbericht (J 3/4) dargestellt worden. Der Druckzustand durch ausströmendes Kühlmittel wird in Abhängigkeit von der Zeit und vom Ort (hier Druckkammer (DK) und Kondensationskammern (KK)) dargestellt.

2.2 Temperaturzustand

Die Temperaturbelastungen sind meistens mit dem Druckzustand (2.1)

verbunden, doch in der Regel im zeitlich späteren Verlauf als die Druckspitze.

Abweichungen hiervon sind dann möglich, wenn eine direkte Beaufschlagung erfolgt (Kontakt- und Strahlungswärme-Übertragung), oder wenn die Temperaturerhöhung ohne einen Druckzustand erfolgt (z.B. Beschädigung der Isolierung).

2.3 Stoss- und Geschossbelastungen

Die vielseitigen Möglichkeiten der Stoss-, Schock- oder Geschossbelastungen sind in ihrer Auswirkung im wesentlichen eine Funktion ihrer kinetischen Energien.

.31 Kleine Geschosse

Dies sind vorwiegend Teile wie: Ventile, Ventil-Stutzen und -Ringe, Rohrteile, Bolzen etc., die abplatzen oder abgesprengt werden. Ihre Energie ergibt sich zumeist aus der Umwandlung von Spannungsenergie in kinetische Energie. Eine Erhöhung der kinetischen Energie durch Beschleunigungseffekte des austretenden Kühlmittels ist möglich; oftmals sogar die Ursache für die kinetische Energie (herausgeschleuderte Setzsteine).

.32 Schlagende Rohrleitungen

Beim Bruch einer Rohrleitung bewirken die Rückstosseffekte, dass gesamte Rohrleitungssysteme zu "schlagen" beginnen können, bzw. sich die Rohrleitungsenden um ein Momentanzentrum beschleunigend zu drehen beginnen, und schlagende Kräfte verursachen können.

.33 Rotierende Maschinen

Turbinen, Kompressoren und Generatoren besitzen im Betriebszustand eine kinetische Energie. Störfälle können zur Freisetzung dieser Energien führen, d.h. z.B. bei Turbinen können sich ganze Schaufelräder von der Welle lösen und geschossartig ihre Bahn suchen.

.34 Strahlbelastungen (Jet Forces)

Das austretende Kühlmittel kann beim Bruch einer Rohrleitung mit einem direkten Strahl (Jet) - senkrecht oder unter einem Winkel - Betonkonstruktionen treffen.

.35 Naturereignisse

Die speziellen Belastungsarten ergeben sich aus der Art des Naturereignisses wie Erdbeben, Wirbelstürme, Überschwemmungen etc.

.36 Flugzeugabsturz

Diese Zusammenstellung zeigt sehr deutlich die Verknüpfung der Belastungsarten untereinander; ein Umstand, der beim Tragverhalten der Konstruktionen noch deutlicher wird.

3.0 Verhaltensweisen von Betonkonstruktionen

Jede Konstruktion, die belastet wird, setzt der Belastung einen Widerstand entgegen. Je nach Funktion des Tragteiles oder Tragwerkes sollen drei Möglichkeiten unterschieden werden:

- a) Das Tragwerk widersteht der Belastung. Führt der innere Widerstand zu einem Gleichgewicht, so widersteht die Konstruktion der Belastung und trägt die aufgebrachte Last auf andere Tragteile (z.B. Baugrund oder in sich geschlossen wie beim Behälter) ab. Hierbei ist es eine Frage der Zulässigkeit, ob diese Lastabtragung im Bereich elastischen oder plastischen Materialverhaltens oder wie bei Beton mit gerissener Zugzone erfolgen kann.
- b) Das Tragwerk widersteht der Belastung, erreicht jedoch örtlich begrenzt den Bruchzustand, z.B. durch geschossartige Durchschläge.
- c) Die Aufgabe der Betonkonstruktion besteht darin, die durch einen Störfall freiwerdende Energie zu dämpfen, bzw. zu verringern. Im Fall eines Geschosses erfolgt die Verringerung oder der Abbau der kinetischen Energie, wobei die Konstruktion teilweise oder vollständig zu Bruch gehen kann.

Die Mobilisierung des Widerstandes von Betonkonstruktionen soll ebenfalls in drei Gruppen unterteilt werden:

3.1 Statische, quasi-statische Belastung

Das Tragwerk wird im Sinne der unendlich-langsamem Lastaufbringung belastet. Es deformiert sich und mobilisiert die inneren Kräfte, die mit den äusseren Belastungen einen Gleichgewichtszustand herstellen (sofern nicht ein Bruchzustand eintritt). Die mathematische Formulierung sei:

$$[K_{(P,t)}] \{u_{(t)}\} = \{P_{(t)}\}$$

$[K_{(P,t)}]$ = Steifigkeit als Funktion der Belastung
und der Zeit

$\{u_{(t)}\}$ = Deformation als $f(t)$

$\{P_{(t)}\}$ = Belastung als $f(t)$

Hieraus erkennt man, dass die geometrischen Abmessungen, die Geometrie selbst, die Materialeigenschaften und die äussere Belastung das Problem charakterisieren.

3.2 Dynamische Beanspruchung

Das dynamische Verhalten soll in zwei Gruppen unterteilt werden, und zwar in:

- die Systemschwingungen als die nieder-frequenten Schwingungen,
- die Kontinuumsschwingungen als die hoch-frequenten Schwingungen.

Strenggenommen lassen sich beide Schwingungsarten nicht trennen, da sie nur in engen Bereichen dominierend allein auftreten und allgemein gemeinsam und gekoppelt wirksam werden. Die allgemeine mathematische Formulierung sei:

$$[M] \{\ddot{u}_{(t)}\} + [C] \{\dot{u}_{(t)}\} + [K] \{u_{(t)}\} = \{P_{(t)}\}$$

$[M]$ = Masse

$[C]$ = Dämpfung

.21 Nieder-frequente Schwingungen (Systemschwingungen)

Kommen die Lastaufbringungszeiten in den Bereich der Schwingungsdauer der Eigenfrequenz, so wird das Tragwerk zu Schwingungen angeregt. Die Schwingungsanalyse ist dann bezogen auf die System-Linie bzw. -Ebene. Erfasst werden damit die Systemschwingungen. Verkürzen sich die Lastaufbringungszeiten (Erregerzeiten) und ist die Trägheit des Tragwerkes relativ gross, so werden die Systemschwingungen nur gering oder gar nicht angeregt.

.22 Hoch-frequente Schwingungen (Kontinuumschwingungen)

Bei Stossbelastungen, Schockwellenerregung, Schlageinwirkungen, Geschossen etc. ist die Erregung bzw. die Lastaufbringungszeit so kurz, dass das Tragwerk immer weniger Zeit zur Reaktion besitzt, sich also kaum mehr oder mit Verzögerung global deformieren kann. Die Erregung ist jedoch vorhanden, so dass die Kontinuumschwingungen immer stärker in den Vordergrund treten. Schwingungsreflexionen an den Oberflächen und noch vorhandene Systemschwingungen können zu örtlichen Überlagerungen (Resonanzen) führen.

3.3 Durchstoss, geschossähnlicher Durchschlag

Wie unter 3.22 können die Stossbelastung, Schlageinwirkungen, Geschosse etc. derart "hart" und mit hoher Energie behaftet sein, dass nur noch der Durchstosswiderstand wirksam wird. Geschossartig werden Löcher geschlagen, oder die Energie örtlich absorbiert. Hier treten die Energiebetrachtungen in den Vordergrund.

Für die Deformationsenergie folgt:

a) elastisch

$$E_{el} = \frac{1}{2} \int_{(V)} \{\sigma\} \{\epsilon\}^T dV$$

$\{\sigma\}$ = Spannung
 $\{\epsilon\}$ = Verzerrung

b) plastisch (bei einem Bruch)

$$E_{pl} = \int_{(M)} \{\sigma\} \{\epsilon\}^T dV$$

In Abb. 1 wird schematisch als Funktion der Zeit die Verknüpfung der Verhaltensweisen von Betonkonstruktionen und der Belastungsarten dargestellt. Es wird deutlich, dass ein Störfall, ausgedrückt durch die Belastungsarten, in seiner Auswirkung auf die Konstruktion immer in seiner Gesamtheit gesehen werden muss.

Hierzu ein Beispiel:

Bei einem Kühlmittelverlust-Störfall werden die umgebenden Räume geflutet. Im zeitlichen Verlauf treten Differenz-Drücke auf, die über dem Ausgleichsdruck liegen. Im weiteren sind bei Kammer-Systemen Strömungen zu erwarten, die ferner zu unterschiedlichen Drücken in den Kammern führen können. Postulieren wir zusätzlich durch schlagende Rohrleitungen Stoss- und Schlagerregungen, so könnte ein Konstruktionsteil folgende Verhaltensweise zeigen: Die Stosseinwirkung wird örtlich wirksam. Es werden hierdurch Kontinuumschwingungen angeregt, und durch eine örtliche Beule (Deformationen) versuchen sich verzögert Systemschwingungen auszubreiten. Gleichzeitig findet noch ein Druckaufbau statt, der

wiederum dem Druckzustand eigene Verhaltensweisen der Tragkonstruktion aufzwingen möchte. Die daraus entstehenden Überlagerungen im zeitlichen Ablauf können einen Bruchzustand hervorrufen, der unter Umständen bei Separation (wenn jeder Vorgang einzeln erfasst wird) gar nicht auftreten könnte.

Dieses Beispiel zeigt aber auch die Komplexheit solcher Probleme und drückt ferner die Schwierigkeit der Erfassung solcher gekoppelter Vorgänge aus.

4.0 Rechnerische Erfassung

Die Erfassung und die Vorausbestimmung des Tragverhaltens von Betonkonstruktionen, die Störfallbelastungen unterworfen sind, wird nach dem heutigen Wissensstand wohl nur in der Verbindung zwischen dem Testversuch und den Möglichkeiten der Berechnung erfolgen können. Auch dann werden die gekoppelten Vorgänge nur schwer erfassbar sein, da nicht immer eine Simulation der physikalischen Vorgänge möglich sein wird.

Über die Abschätzung der Einzelvorgänge wird man jedoch die Größenordnung erkennen können, um damit zu realistischen Abschätzungen zu gelangen. Für die Schwingungsanalyse bedeutet dies, dass man die Kontinuums-schwingungen, insbesondere in Bezug auf die wohlbekannten Sprödbrech-erscheinungen, genauer untersuchen muss.

4.1 Statische Berechnung

Die möglichen Verfahren und ihre Einschränkungen, insbesondere in den Bereichen des elastischen und plastischen Materialverhaltens, sind gut bekannt.

Die Verfahren sind:

- direkte Lösung der Differentialgleichungen
- Differenzen-Verfahren
- Dynamische Relaxation
- Finite-Element-Methode

Angemerkt sei noch, dass man aus der Kenntnis der Stabstatik nur schwer die Verhaltensweisen von Flächen- und Schalentragsystemen und wohl kaum das der dickwandigen Konstruktionen (Kontinua) erklären kann.

4.2 Dynamische Analyse

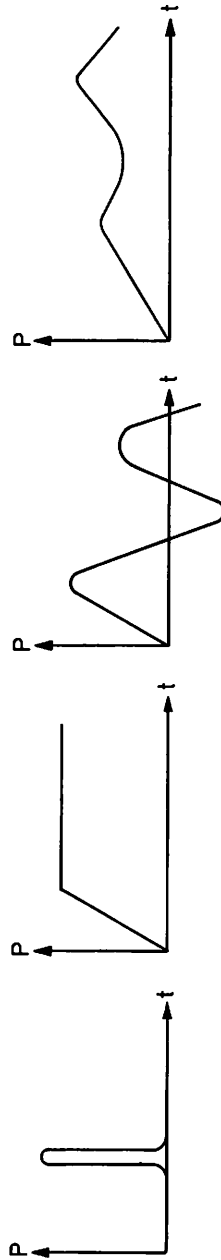
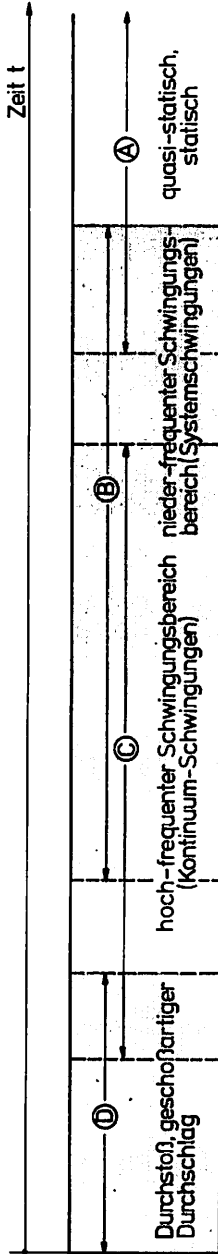
Als mögliche Berechnungsverfahren stehen hier die

- direkte Integration der Bewegungsgleichung,
- Differenzen-Verfahren,
- Dynamische Relaxation,
- Finite-Element-Methode,
- Methode der Feder-Massenpunkte (lumped-mass-method) oder Steifigkeits-Massenpunktsysteme

zur Verfügung. Die charakteristischen Größen sind die geleistete Arbeit, die Deformations-Energie und die kinetische Energie.

4.3 Durchschlag-Probleme

Die Untersuchungen laufen allgemein auf die Energie-Betrachtungen hinaus. In der Literatur gibt es eine Reihe von Hinweisen über die Auswirkungen von Explosiv-Waffen, Sprengwirkungen auf Konstruktionen etc., die die Verhaltensweisen meistens mit empirischen Formeln wiedergeben. Leider führen Berechnungen nach diesen Angaben sehr oft zu erheblichen Überschätzungen.



	Geschosse	Jet-Belastung	Schockwellen	Druckaufbau
Ⓐ	möglich	ja	kaum	ja
Ⓑ	ja	ja	ja	ja
Ⓒ	ja	ja	ja	ja
Ⓓ	ja	möglich	kaum	möglich

Fig.1