

**KONSTRUKTION UND BERECHNUNG
DER SICHERHEITSEINRICHTUNG BERSTMINDERER
(CONSTRUCTION AND CALCULATION OF THE SAFETY INSTALLATION
'BURST DIMINISHER')**

H. BARNERT

*Institut für Reaktorentwicklung,
Kernforschungsanlage Jülich GmbH, D-517 Jülich, Germany*

SUMMARY

The frame of the problem

The non-integrated primary circuit of nuclear reactors in several containers has for high-temperature reactors in addition to other advantages those of easy accessibility, repairability, and exchangeability of heat-consuming equipment (e.g. steam generator), and important cost-savings for the reactor pressure vessel. It is, however, necessary to connect these containers by pipe-conduits of a relatively large diameter. As far as the safety criteria for nuclear power plants are concerned, the rupture of such a pipe-conduit has to be considered already in design, in particular with respect to the system of after-heat removal. This means the burst-diminisher is an equipment to diminish the intensity and effects of bursts from pressure-retaining tube-walls, similar like the flow limiters of boiling-water reactors.

The problem

It is the task of the burst-diminisher:

- (1) to reduce and to limit the flow cross-section of accidents to an arbitrarily small amount;
- (2) to reduce and to limit the size of the bursting surface in the pressure-retaining wall;
- (3) to protect installations in the pressure-region from additional loads in the case of accident.

The solution of the problem

Details regarding the construction of a burst-diminisher are given by the example of the coaxial conduits of a process-heat reactor: The burst-diminisher in a coaxial conduit consists of a pressure-retaining tube-wall with beaded edges. The tube-wall is able to separate a potential region of danger (e.g. the outer tube-walls of a coaxial conduit) from the other space in so far as

- (1) the flow cross-section which is decisive for the amount of coolant-fluid releasing during the accident (burst of a tube), is as low as possible;
- (2) the energy of burst which is decisive for the size of the bursting surface resulting during the accident, is as low as possible.

The limiting flow cross-section is formed by the space between the beaded edges of the "burst diminisher" and the burst-safe regions (connecting branches, e.g. in the pre-stressed concrete pressure vessel). The size of the bursting surface is reduced and limited by the reduction of the volume decisive for burst-energy. The burst-diminisher is designed in such a way that all loads arising during the accident "Rupture of Pressure-retaining Wall" do not affect its functions, and that deformations can be tolerated.

Calculation to design the burst-diminisher

Models and calculations are introduced to design the "burst-diminisher" for different loads. The loads result from the accident "Burst of a Pressure-retaining Tube of the Coaxial Conduit" under realistic and pessimistic assumptions and for the performance of both burst and load experiments. The calculations show that the "burst-diminisher" is capable to fulfill its tasks. Thereby are avoided damages of components in the primary circuit (in particular those for removal of after-heat) which might be caused by a too quick pressure relief after the burst of a coaxial conduit.

1 Einführung

11 Grundlagen

Der Ausgangspunkt für die folgenden Überlegungen ist die Sicherheitsvorschrift, die die Auslegungsgrundlage für das Nachwärmeabfuhrsystem eines Kernkraftwerkes bildet, siehe IRS, [1]. Danach ist das Nachwärmeabfuhrsystem so auszulegen, daß es die in IRS-R-2, [1] angegebenen Funktionen der Kühlung des Cores erfüllen kann, und zwar für alle möglichen Brüche im Primärkühlsystem, deren Bruchquerschnitte kleiner oder gleich dem Querschnitt sind, der einem Abscheren des größten Rohres entspricht. Diese Vorschrift ist sicherlich immer dann anwendbar, wenn der Transport von Wärmeenergie mittels des Transports von Materie, unter Ausnutzung von deren wärmespeichernden Eigenschaften, bewerkstelligt wird, und also bei einem Bruch im Primärsystem mit dem Entweichen von Kühlmittel gerechnet werden muß. Im Sinne der Vorschrift ist eine Aussage in dieser Vorschrift über das Zustandekommen der unterstellten Schäden unnötig.

Desweiteren ist offensichtlich, daß einerseits das Konstruktionselement "Rohr" auch in Zukunft sehr häufig angewendet werden wird, z.B. auch bei Reaktordruckbehältern nach der "Pod"-Bauart (Ein-Behälter-Bauart) und daß andererseits der Terminus "Rohr" in der Sicherheitsvorschrift in der allgemeinsten Bedeutung gemeint ist und interpretiert werden muß. Unmittelbare Anregung zu den Überlegungen zur Konstruktion des Berstminderes ist jedoch die Verwendung der Mehr-Behälter-Bauart des Primärkreises bei Prozeßwärmereaktoren.

12 Mehr-Behälter-Primärkreis

Bei der Mehr-Behälter-Bauart des Primärkreises ist der Primärkreis in mehreren Druckbehältern untergebracht, und die Druckbehälter der Wärmeverbraucher sind mit dem Reaktordruckbehälter durch Rohrleitungen verbunden. Es erscheint vernünftig diese Bauart der Ein-Behälter-Bauart (z.B. Spannbetonbehälter mit Pods) vorzuziehen, und zwar hauptsächlich wegen besserer Wirtschaftlichkeit, verbesserten Konstruktions- und günstigeren Betriebsbedingungen. Die bessere Wirtschaftlichkeit ist in dem sicherlich geringeren Kapitalaufwand, vor allem aber durch kürzere Bauzeiten bei Vor- und Werkstatt-Fertigung, wie dies z.B. für den Vorgespannten Grauguß-Behälter vorausgesagt wird, begründet. Eine solche Technologie ist unter Umständen auch für Vorgespannte Behälter mit Pods und Kavernen möglich, sicherlich wird sie aber zunächst an einfachen Behältern erprobt werden müssen. Die verbesserten Konstruktionsbedingungen sind vor allem für die Wärmeverbraucher in der freien Gestaltungsmöglichkeit und der Anpassungs- und Umstellungsmöglichkeit gegeben. Diese Gesichtspunkte sind bedeutsam

bei der Verwendung der Kernenergie auf dem Gebiet des Nuklearen Prozeßwärme. Die Anordnung der Wärmeverbraucher außerhalb des Reaktordruckbehälters hat darüberhinaus den Vorteil verbesserter Möglichkeiten zur Wartung und Reparatur sowie zur Prüfung und Wiederholungsprüfung, wodurch eine größere Verfügbarkeit erreichbar wird.

2 Prozeßwärmereaktoren

Als typische Beispiele für Kernreaktoren mit Mehr-Behälter-Bauart des Primärkreises können die Prozeßwärmereaktoren PR 500 und PR 3000 dienen. Der PR 500, siehe SCHULTEN, KRIEB, [2], ist ein Prozeßwärmereaktor zur Erzeugung von Prozeßdampf mit einer Leistung von 500 MWt. In Abb. 1 ist die Anordnung der Behälter (für das Core und für die Dampferzeuger) und der Verbindungsleitungen dargestellt. Diese sind Koaxialleitungen, die im inneren Teil das Heißgas vom Core zu dem Dampferzeuger und im äußeren Teil das Kaltgas vom Gebläse zum Core führen, wie das in Abb. 2 schematisch dargestellt ist. Der Festigkeitsnachweis (Kapitel 4) ist durchgeführt für den Berstminderer der Koaxialleitung des PR 500. Ähnliches gilt für den Prozeßwärmereaktor PR 3000, siehe BARNERT, et al., [3], mit einer Leistung von 3000 MWt zur Erzeugung von Wasserstoff aus Erdgas.

3 Funktion des Berstminderers

Die folgenden Überlegungen sind dargelegt für die Anwendung des Berstminderers in der Koaxialleitung des PR 500, gelten ansonsten aber allgemein.

31 Aufgabe des Berstminderers

Die Aufgabe des Berstminderers im allgemeinen ist der Schutz von Einbauten des Primärkreises vor Beschädigung durch zu schnelle Druckbelastung im Fall eines Schadens an einer druckhaltenden Wandung, wie z.B. an dem Druckrohr einer Koaxialleitung. Insbesondere muß die Funktionsfähigkeit des Nachwärmeabfuhrsystems und die Kühlbarkeit des Cores sichergestellt und nachgewiesen werden. Im Sinne der Sicherheitsvorschriften ist der Berstminderer damit eine Sicherheitseinrichtung, die bei Schäden an (durch den Berstminderer geschützten) drucktragenden Wandungen die Überleitung vom Normalbetrieb der Anlage in den Nachwärmeabfuhrbetrieb mit hinreichend kleinen Druckabsenkungsgeschwindigkeiten sichergestellt.

Die Aufgabe im besonderen ist: 1. die Verkleinerung des für die Druckablenkungsgeschwindigkeit maßgeblichen Strömungsquerschnitts, 2. die Verkleinerung des für die Größe der Berstfläche in einer druckhaltenden Wandung maßgeblichen Energieinhalts und 3. der Schutz der Einbauten in unmittelbarer Nähe der Schadensstelle vor äußeren Belastungen, z.B. des Trennrohrs der Koaxialleitung vor Bruchstücken des geborstenen Druckrohrs.

Es ist also nicht Aufgabe des Berstminderers 1. das Bersten von drucktragenden Wandungen zu verhindern und 2. eine Verkleinerung des Nachwärmeabfuhrsystems zu ermöglichen.

32 Lösung der Aufgabe

Voraussetzung für die Lösung der Aufgabe ist das Vorhandensein von "berstsicheren" Bereichen in der druckhaltenden Wandung. Beim PR 500 sind diese Bereiche die Wandung des Spannbetondruckbehälters einerseits und der Anschlußstutzen in der Wandung des Stahlruckbehälters des Dampferzeugers andererseits.

Die Lösung im allgemeinen ist eine belastbare Wandung, die einen potentiellen Schadensbereich einer druckhaltenden Wandung sinnvoll vom Druckbereich abgrenzt. Die Lösung im besonderen, siehe dazu die schematische Darstellung des Berstminders (auch Schutzrohr genannt) in Abb. 3, wird verwirklicht: 1. durch den möglichst kleinen Spalt zwischen den Randwülsten des Schutzrohres und den berstsicheren Bereichen, dies ist der für die Druckentlastung maßgebliche Strömungsquerschnitt, 2. durch den möglichst kleinen hohlzylinderförmigen Zwischenraum, der von dem Schutzrohr, den Randwülsten, den Spalten und dem Druckrohr gebildet wird, dies ist der Maximalwert des Volumens, das bei der Bestimmung des für die Größe der Berstfläche maßgeblichen Energieinhalts zu berücksichtigen ist und 3. durch ausreichende Dimensionierung der Wandung des Schutzrohrs. Der Effekt der Verkleinerung des Energieinhalts durch Verkleinerung des Volumens, läßt sich verstärken, indem der hohlzylinderförmige Zwischenraum mit einem Stoff geringerer Kompressibilität als der des Kühlmittels ausgefüllt wird.

Die Lösung besteht also nicht in einer form- oder kraftschlüssigen, dichten Verbindung zwischen dem Schutz- und dem Druckrohr mit 1. dem Ziel der Lastteilung und auch nicht mit 2. dem Ziel der Lastzuweisung im Störfall (dies wäre eine echte standby-Funktion). Der Berstminderer und das Druckrohr stellen zusammen also keine Doppelrohrleitung dar. Solche Lösungen sind für den hier beschriebenen Anwendungszweck sicherlich schwer realisierbar, weil Lastteilung und Lastzuweisung schlechterdings unmöglich sind und weil darüberhinaus sogar bereits ohne Last Versagen durch innere Ver-

spannung auftreten kann.

Die Voraussetzung der Lösung, nämlich das Vorhandensein von berstsicheren Bereichen bedeutet keine gravierende Einschränkung, da die betrachtete Koaxialleitung relativ kurz ist und die Behälter berstsicher sind. Dies gilt nach heutiger Genehmigungspraxis auch für Stahlbehälter und für Stahlbehälterstützen ("safe ends").

33 Unterschiede zum Durchflußbegrenzer

Der Durchflußbegrenzer wird bei Siedewasserreaktoren, siehe RINGEIS, W., [4], zum Zweck der Verringerung des abströmenden Kühlmittels im Falle des Bruchs einer Frischdampfleitung verwendet. Er unterscheidet sich vom Berstminderer vor allem darin, daß der Durchtrittsquerschnitt für das Kühlmittel bei Normalbetrieb zugleich auch begrenzender Strömungsquerschnitt für den Störfall ist, siehe schematische Gegenüberstellung in Abb. 4. Dies macht, daß die Verringerung der Druckabsenkungsgeschwindigkeit beim Durchflußbegrenzer relativ klein ist, während dieser Wert beim Berstminderer in der Größenordnung von ca. 350 liegt. Der berstsichere Bereich des Durchflußbegrenzers ist die Wandung des Reaktordruckgefäßes, wodurch der abgedeckte Schadensbereich alle außerhalb des Reaktordruckgefäßes liegenden Apparate und Rohrleitungen umfaßt, während der abgedeckte Schadensbereich beim Berstminderer nur das Druckrohr der Koaxialleitung umfaßt und damit relativ klein ist.

34 Konstruktionsmerkmale

Kennzeichnend für den Berstminderer sind die folgenden Merkmale:

1. Kräftefreie Anordnung zur Gewährleistung der Unabhängigkeit der beiden Rohre voneinander durch ausreichende Zwischenräume. Diese werden auch bestimmt von Fertigungstoleranzen und Verlagerungen der Behälter im Bau, während verschiedener Betriebszustände und im Laufe des Betriebs durch Langzeiteffekte, wie z.B. das Kriechen des Spannbetons. Die Zwischenräume sind so bemessen, daß es in keinem Falle zu einer Verspannung zwischen dem Schutzrohr und dem Druckrohr kommen kann.
2. Innenliegende Anordnung, weil neben der für die Aufgabe 1 und 2 auch prinzipiell möglichen, außenliegenden Anordnung dann auch noch die Aufgabe 3 erfüllt wird und weil die Belastungen besser überschaubar sind.
3. Lastfreiheit für den Berstminderer bei Normalbetrieb als kennzeichnendes Kriterium für Sicherheitseinrichtungen.

4. Kräftefreie Positionierung zur Verhinderung von Lageänderungen des Berstminderers z.B. durch federnde Elemente.
5. Möglichkeit der Prüfung und Wiederholungsprüfung z.B. des Werkstoffs auch durch visuelle Inspektion mit Hilfsmitteln.

4 Festigkeitsnachweis für den Berstminderer

Voraussetzung für die Erfüllung der Funktion des Berstminderers ist ausreichende Festigkeit. Pessimistische Abschätzungen des Verformungs- und Spannungszustandes im Störfall "Bersten des Druckrohrs" zeigen, daß das Schutzrohr als Berstminderer der Koaxialleitung realisierbar ist.

41 Rechenmethoden und Voraussetzungen

Die Hauptabmessungen des Druckrohrs und des Schutzrohrs sind: 1044 x 20 x 1800 und 990 x 30 x 2200 (Außendurchmesser x Wandstärke x Länge, jeweils in mm); der mittlere Strömungsspalt beträgt (wegen der Wülste) ca. 3 mm und der mittlere Volumenspalt ca. 7 mm. Damit werden der für die Druckabsenkungsgeschwindigkeit im Primärsystem maßgebliche Strömungsquerschnitt um den Faktor von ca. 350 und das für die Größe der Berstfläche maßgebliche Volumen (unter Berücksichtigung der Verkleinerung durch Reibung und Vergrößerung durch z.B. einen Kompensator) um den Faktor von ca. 100 reduziert. Durch die Anwendung des Berstminderers wird der Maximalwert der Druckabsenkungsgeschwindigkeit bei einem Schaden an dem Druckrohr der Koaxialleitung des Prozeßwärmereaktors PR 500 unter den Wert von 1 bar/s abgesenkt. Mit der in Helium von 40 bar speicherbaren Druckenergie, siehe dazu z.B. BARNERT, [5] ergibt sich pessimistisch ein Arbeitsvermögen von ca. 80 kJ und damit nach KUSSMAUL, K; STURM, D., [6] eine Berstfläche von nur ca. 200 cm² und eine Gaskraft durch den Strahl von nur ca. 6400 kp. Diese Aussagen gelten für die realistische Betrachtung eines möglichen Störfalls.

Als Verformung der beiden Rohre sind Ringbiegung (R) der Querschnitte und Stabbiegung (S) aus der Längsachse der Koaxialleitung sowie örtliche Verformung infolge HERTZscher Pressung beim Stoß möglich. Zum Stoß zwischen dem Druckrohr und dem Schutzrohr kommt es nur infolge der pessimistischen Annahme, daß das Druckrohr frei ist (Guillotine-Bruch); Stoßkraft, Stoßdauer und Pressung sind nach HÜTTE, [7], 735, 965 berechnet. Der Einfluß der Krümmungen an der Stoßstelle ist erheblich, worauf in BARNERT, [8] eingegangen wird.

42 Ergebnisse

Die schematische Darstellung der Voraussetzungen und die Ergebnisse der Spannungs- und Verformungsanalyse sind in Tabelle I angegeben. Es werden 3 mögliche Fälle mit zunehmendem Pessimismus unterschieden:

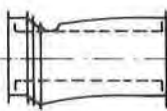
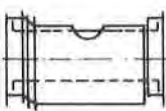
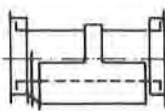











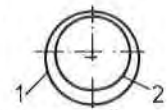
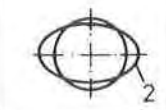
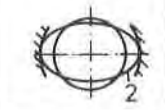
Im Fall 1 (realistisch) erzeugt die Gaskraft Verformungen, im Fall 2 (pessimistisch) wird zusätzlich angenommen, daß das Druckrohr frei ist (infolge eines Guillotinebruchs) und daß es durch die Gaskraft beschleunigt wird und deswegen ein Stoß zwischen dem Druckrohr und dem Schutzrohr entsteht, und im Fall 3 (hypothetisch) gilt das Druckrohr als frei, wie im Falle 2, jedoch wird nunmehr die maximal mögliche Gaskraft (z.B. infolge abgesprengter Halbschalen) in Ansatz gebracht und darüber hinaus angenommen, daß wegen des stehengebliebenen Bügels ein Stoß auf das Schutzrohr erzeugt wird. Die Bedingungen des Falls 3 könnten z.B. für einen extrem harten Test des Schutzrohrs durch eine sinnvolle Einrichtung simuliert und damit die Belastbarkeit des Berstminderers demonstriert werden.

Die Abschätzungen zeigen, daß im realistischen Fall (Fall 1) nur geringfügige Spannungen und Verformungen entstehen und daß insbesondere kein Stoß erfolgt. Die pessimistische Betrachtung (Fall 2) zeigt, daß auch beim Auftreten eines Stoßes die Biegespannungen und Verformungen relativ klein bleiben und daß lediglich die Pressung in der Nähe der Stoßstelle und die daraus resultierenden Spannungen erheblich, aber zulässig sind. Bei den hypothetischen Bedingungen des Falles 3 werden wegen der gegenüber realistischer Betrachtung mehr als 100 mal größeren Gaskraft schließlich die Belastungsgrenzen des Schutzrohrs erreicht.

Literatur

- [1] Institut für Reaktorsicherheit: Schriftenreihe Richtlinien und Empfehlungen: Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke, IRS-R-2 (1969).
- [2] SCHULTEN, R.; KRIEB, K.H. et al.: Abschlußbericht über eine Gemeinschaftsstudie: Industriekernkraftwerk mit Hochtemperaturreaktor PR 500 -Otto-Prinzip- zur Erzeugung von Prozeßdampf, Dez. 1972, JÜL-Bericht, erscheint demnächst.
- [3] BARNERT, H.; KUGELER, K.; KUGELER, M.: Problems on the Safety of Future Process Heat Reactors, IAEA/SM-169/41, Symposium on Principles and Standards of Reactor Safety, 5. - 9. Febr. 1973.
- [4] RINGEIS, W., et al.: Das 670-MW-Kernkraftwerk Würgassen, Atom und Strom, 17, Nov., Dez. 1971; 173 - 192.
- [5] BARNERT, H.: Arbeitsvermögen von Fluidkörpern beim Bersten von Behältern, JÜL-839-RG, März 1972.
- [6] KUSSMAUL, K; STURM, D.: Bauteiluntersuchungen an Druckbehältern und Rohrleitungen, Seite 137 - 186 in IRS-T-22 (1971), 6. IRS-Fachgespräch 1970.
- [7] HÜTTE, Bd. 1, Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin 1955.
- [8] BARNERT, H.: Berechnungen zum Berstminderer, Interner Bericht der KFA Jülich, erscheint demnächst.

Tabelle I: Ergebnisse der Spannungs- und Verformungsanalyse und schematische Darstellung der Voraussetzungen für 3 verschiedene Belastungsfälle des Schutzrohrs (Berstminderers)

Fall	1: realistisch	2: pessimistisch	3: hypothetisch
Bild			
Schema		(1)  (2)  (a) 	(1)  (2)  (a) 
Stabbiegung (S)		(b)  (c) 	(b)  (c) 
Ringbiegung (R)			
Druckrohr (1): Annahmen Biegespg., σ_b , kp/mm^2 Durchbiegg., b , mm	0,8 (S) 0,1 (S)	frei(Guillotine)	1. frei (Guillotine) 2. Halbmantel weg 3. Bügel (B) bleibt
Schutzrohr (2): a) <u>vordem Stoß</u> Biegespg., σ_b , kp/mm^2 Durchbiegg., b , mm	3 (R); 0,2 (S) 1 (R); 0,07 (S)	3 (R); 0,2 (S) 1 (R); 0,07 (S)	10,8 (S); (383 (R)) 0,22 (S); (129 (R))
b) <u>Stoß</u> Gaskraft K , kp Geschw. V_1 , m/s Stoßkraft Q , Mp Pressung q , kp/mm^2 Stoßdauer T , msec	6400 <u>kein Stoß!</u>	6400 1 7,5(R) ... 250(H) 6(R) ... 24 (H) 1,2	825 000 16 2320(S) ... 5300(H) 45 (S) ... 58(H) 0,4
c) <u>nach dem Stoß</u> Geschw. V_2 , m/s Biegespg. σ_b , kp/mm^2 Durchbiegg. b , mm		0 75 3,4(R); 0,24(S) 1,2(R); 0,1 (S)	7,1 56,6 (S); (29,6 (R)) 2,0 (S); (10,3(R))
Erläuterung:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Vorformungsarten; (R): Ringbiegung; (S): Stabbiegung; (H) HERTZsche Pressung, 2. Rohre: (1): Druckrohr, (2): Schutzrohr (Berstminderer), 3. Eingeklammerte Zahlen: Schutzrohr legt sich außen an. 		

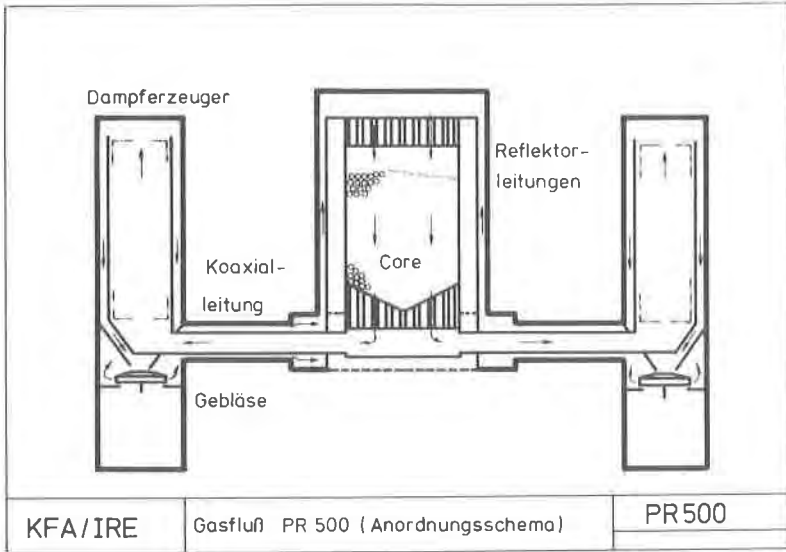


Abb. 2: Schematische Darstellung des Gasflusses im Primärkreis und der Behälter des Prozeßwärmereaktors PR 500

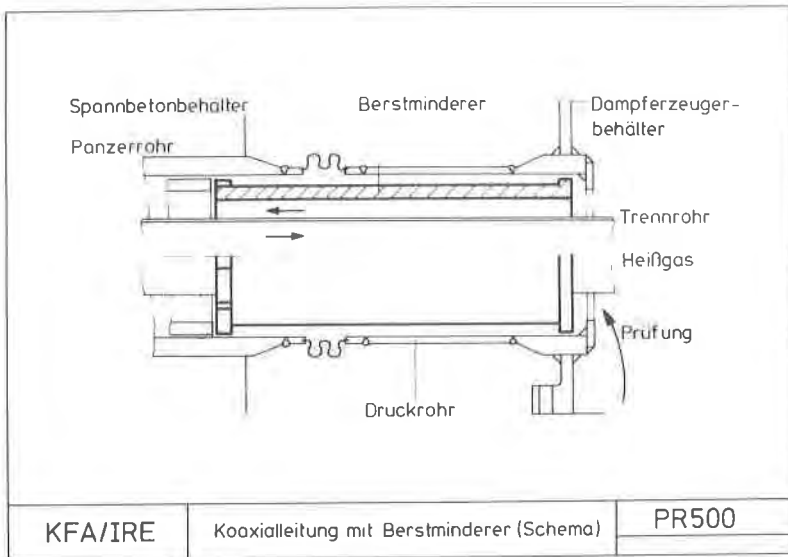


Abb. 3: Schematische Darstellung einer Koaxialleitung mit Berstminderer

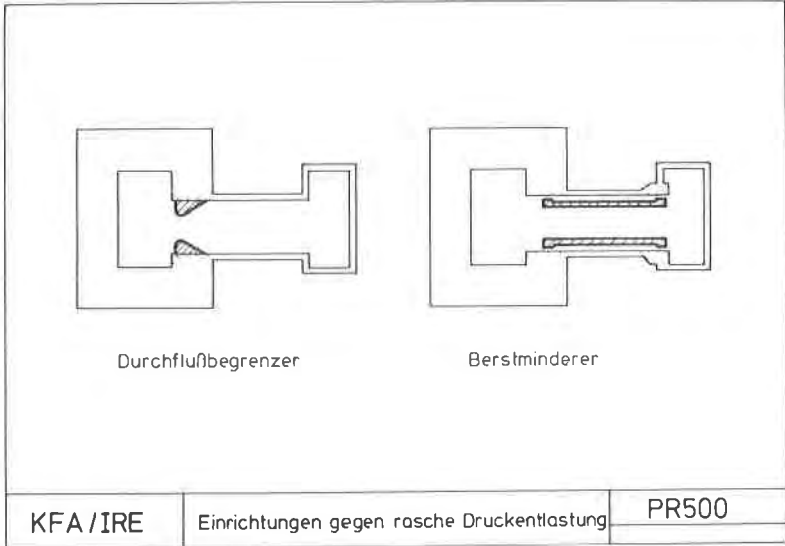


Abb. 4: Schematische Gegenüberstellung von Einrichtungen gegen rasche Druckentlastung: Durchflußbegrenzer und Berstminderer